
Giuliano Maselli Locosselli

Análise integrada de dendrocronologia, anatomia e isótopos estáveis de carbono de duas espécies de jatobá (*Hymenaea*, LEGUMINOSAE) para identificação de possíveis efeitos da elevação do CO₂ atmosférico e mudanças climáticas.

Multi-proxy analysis on dendrochronology, anatomy and stable carbon isotopes of two species of jatobá (*Hymenaea*, LEGUMINOSAE) to identify possible atmospheric CO₂ concentration and climate change effects.

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, para a obtenção de Título de Mestre em Ciências, na Área de Botânica.

Orientador:
Prof. Dr. Gregório Ceccantini

São Paulo

2010

Maselli Locosselli, Giuliano

Análise integrada de dendrocronologia, anatomia e isótopos estáveis de carbono de duas espécies de jatobá (*Hymenaea*, LEGUMINOSAE) para identificação de possíveis efeitos da elevação do CO₂ atmosférico e mudanças climáticas.

91 páginas

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. Departamento de Botânica.

1. Dendrocronologia
 2. *Hymenaea* spp.
 3. Mudanças Climáticas
- I. Universidade de São Paulo. Instituto de Biociências. Departamento de Botânica.

Comissão Julgadora

Prof(a). Dr(a).

Prof(a). Dr(a).

Prof. Dr. Gregório Ceccantini

Orientador

**Dedico esta dissertação
à minha família.**

Agradecimentos

A realização do presente trabalho não seria possível sem a ajuda direta e/ou indireta de muitas pessoas, a quem dedico os meus sinceros agradecimentos. Sendo assim, agradeço:

À minha família pelo apoio, amor e carinho. Dentre todos, dedico especial agradecimento ao meu pai Leonardo e minha mãe Maria Cristina pelo amor à moda de cada um, por terem auxiliado incondicionalmente o meu caminho para chegar até este momento, e ainda possibilitarem que eu cresça muito. Também dedico especial atenção ao meu irmão José Leonardo, meu maior amigo e companheiro.

À Viviane Jono, uma garota especial que eu conheci na minha caminhada pela botânica, que sempre me ajudou e deu suporte, a quem eu admiro muito. Além do grande amor.

À Myuki Jono por ter hospedado e alimentado o garoto que atacava a dispensa sem pedir e guardava o leite aberto no armário e o achocolatado em pó na geladeira.

Aos amigos do 2001N com quem passei momentos tão bons e com quem eu amadureci muito.

Ao meu orientador, Gregório Ceccantini, que me ensinou muito na matéria de botânica e, além disso, sobre muitas coisas da vida. Agradeço também por ter acreditado no garoto que nem sabia o que era lenhoso!!! Além das relações profissionais, ficarão os bons momentos que passamos nas muitas viagens, nos jantares japoneses, entre outros, selando uma amizade certamente duradoura.

Aos amigos e colegas do laboratório que sempre me ajudaram, com especial atenção aos membros da equipe dentro: Gustavo Burin, Ricardo Cardin, Bruno Balboa (membro honorário) e Luis Horta, com os quais aprendi muito e passei bons momentos (entre eles, na Europa e Argentina), e ao Guilherme Freire pela amizade e pelos campos e coletas que viabilizaram esse trabalho.

À Gisele Costa pela amizade de tantos anos, e pela ajuda na execução do meu trabalho.

Aos professores da anatomia: Prof^a Dra. Nanuza de Menezes, que sempre me deu um carinho especial, a Prof^a Dra. Flávia de Mello de Pinna pela amizade, e a Prof^a Dra. Veronica Angyalossy pelas dicas e críticas desde a época da iniciação científica, e pelo enorme coração.

À Claudia Soliz pela grande amizade, e por nos ajudar nos pequenos detalhes dos estudos de dendrocronologia, aqueles que, se não forem resolvidos, interrompem todo o processo.

À Adriana Grandis, Amanda Pereira de Souza, Bruna Arenque e Wanderley dos Santos, que dedicaram tanto tempo em me auxiliar nos testes das técnicas de extração de celulose, e por terem me ensinado a trabalhar em uma laboratório de fisiologia vegetal.

Ao Prof. Dr. Marcos S. Buckeridge, pelas rápidas conversas, mas não menos instrutivas, pelo excelente curso de pós-graduação intitulado “Respostas de Plantas às Mudanças Climáticas Globais e seus Impactos sobre a Sociedade”, cujo conteúdo auxiliou na discussão dos meus dados. Também agradeço pelo auxílio financeiro a viagens e às análises isotópicas.

Ao Marcelo Moreira, pela discussão sobre os isótopos, pelo “tour” detalhado no laboratório e explicação das técnicas de isotopia realizadas no laboratório de Ecologia Isotópica, CENA-ESALQ, e pela prontidão em ajudar.

Aos pesquisadores: Fritz H. Schweingruber, Holger Gartner, Patrick Fonti, Jochen Schöngart, Kerstin Treydt, Ricardo Villalba, Brian Luckmann, Donald Falq, que transmitiram as bases da dendrocronologia à equipe dendro em muitos cursos no Brasil, na Argentina e na Suíça.

Ao Claudio Lisi por ter auxiliado indiretamente este trabalho, ao conseguir uma empresa para a fabricação do trado motorizado e ter indicado uma furadeira nacional à gasolina que de fato funcionava.

Ao Seu Guilherme, proprietário da Fazenda Jagoára Velha, local de onde foram extraídas as amostras.

À Eliana, proprietária do hotel homônimo, que sempre nos hospedou, mesmo com pedidos em cima da hora, e também pelo apoio logístico.

À Fapesp pela concessão da bolsa.

E ao parecerista anônimo por ter acreditado na nossa capacidade, mesmo sugerindo a redução do trabalho (que no fim não foi atendida).

Índice

Apresentação	8
Introdução	9
Capítulo 1	
Análise dos sinais climáticos registrados nos anéis de crescimento e áreas de vaso de duas espécies tropicais: <i>Hymenaea courbaril</i> e <i>Hymenaea stigonocarpa</i> , e os possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre as espécies	17
Capítulo 2	
Isótopos estáveis de carbono e eficiência intrínseca no uso da água de duas espécies tropicais do gênero <i>Hymenaea</i> (LEGUMINOSAE), e suas implicações ecológicas	47
Capítulo 3	
Análise das taxas de crescimento radial utilizando métodos dendrocronológicos aplicada à conservação das espécies de jatobá de mata (<i>Hymenaea courbaril</i> L.) e de cerrado (<i>Hymenaea stigonocarpa</i> Mart ex. Hayne)	74
Considerações finais	85
Conclusões gerais	89
Resumo	90
Abstract	91

Apresentação

A dissertação foi estruturada em três capítulos escritos no formato de artigo científico. Essa disposição auxiliará a banca a avaliar, criticar e dar sugestões já com a estrutura do artigo científico em mente.

O primeiro capítulo intitulado “Análise dos sinais climáticos registrados nos anéis de crescimento e áreas de vaso de duas espécies tropicais: *Hymenaea courbaril* e *Hymenaea stigonocarpa*, e os possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre as espécies” será submetido à revista **Trees, Structure and Function**. O segundo capítulo intitulado “Isótopos estáveis de carbono e eficiência intrínseca no uso da água de duas espécies tropicais do gênero *Hymenaea* (LEGUMINOSAE), e suas implicações ecológicas” será submetido à revista **Global Change Biology**. E o terceiro capítulo intitulado “Análise das taxas de crescimento radial utilizando métodos dendrocronológicos aplicada à conservação das espécies de jatobá de mata (*Hymenaea courbaril* L.) e de cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart ex. Hayne)” será submetido à revista **Scientia Florestalis**.

Introdução

A preocupação com as mudanças nos ambientes por conta do desenvolvimento das atividades humanas remonta a década de 1970, em especial o ano de 1972 com a Conferência de Estocolmo, organizada pela Organização das Nações Unidas, que resultou no Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. A Conferência de Estocolmo foi o primeiro passo e, como resposta às crescentes preocupações internacionais em relação à deterioração do meio ambiente, foi instituída a Comissão Mundial do Meio Ambiente e Desenvolvimento em 1983, também conhecida por Comissão de Brundtland. Após quatro anos da criação da comissão, esta produziu um relatório cujos dados desencadearam, após um ano, a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) que tem como objetivo promover uma análise das bases científicas a respeito das mudanças climáticas induzidas pelo homem (Lombardi 2008).

Dos relatórios produzidos pelo IPCC, o quarto foi publicado em 2007 e produziu um grande impacto na mídia internacional e na opinião pública por afirmar categoricamente que as mudanças no clima têm origem nas atividades humanas (Lombardi 2008). As mudanças no clima estão associadas à emissão dos gases do efeito estufa (GEE), sendo o CO₂ o principal GEE produzido pelas atividades humanas. Como consequência dessas emissões, as concentrações de CO₂ atmosféricas elevaram-se de 280ppm antes da revolução industrial para 379ppm em 2005, atingindo uma concentração superior às naturais nos últimos 650.000 anos (IPCC 2007).

As principais fontes antropogênicas de CO₂ são o uso de combustíveis fósseis e as mudanças no uso do solo (IPCC 2007). O desmatamento emite cerca de 1.6 bilhões de toneladas equivalentes de carbono ao ano, que é uma quantidade considerável quando comparada às emissões provenientes do uso de combustíveis fósseis, que contribui com seis bilhões de toneladas ao ano (Goldemberg & Lucon 2008).

As emissões de CO₂ por desmatamento são importantes principalmente nos países tropicais denominados em desenvolvimento, dentre os quais se encontra o Brasil, onde 75% das emissões de CO₂ decorrem de mudanças no uso do solo (Cerri *et al.* 2009).

Porém, a contribuição do desmatamento das florestas tropicais para as mudanças climáticas não decorre apenas das emissões de dióxido de carbono, mas também, do importante papel destas florestas na regulação do clima global (Fearnside 2001).

Estes fatos colocam o Brasil, e suas florestas, em posição de destaque por possui 28,3% das florestas primárias remanescentes do mundo e, simultaneamente, ter uma das maiores perdas líquidas de florestas com 3,1 milhões de hectares por ano (FAO 2009).

Um bioma brasileiro que não deve ser esquecido nas questões apresentadas é o Cerrado, que é o segundo maior bioma do país, estendendo-se por mais de 200 milhões de hectares, sendo que apenas 2.2% deles são protegidos (Silva *et al.* 2006). O Cerrado possui um importante papel de regulação de energia e trocas de massa com a atmosfera sendo que a maior parte do carbono fixado nesse bioma encontra-se dentro do solo (Batle-Bayer *et al.* 2010).

Portanto é imprescindível compreender como estas formações vegetacionais estão respondendo às mudanças do clima e tentar prever o que acontecerá com elas num futuro próximo, e a dendrocronologia, como um estudo de registros naturais, é essencial para compreender como as espécies lenhosas presentes nestas regiões estão respondendo às mudanças do clima.

Os anéis de crescimento em árvores são considerados um dos registros naturais mais precisos, com alto grau de confiança nas datações, sendo capazes de registrar até 60% da variação dos dados de temperatura e precipitação, conforme os dados climáticos de plataformas de coleta (Huges 2002).

Estudos das séries de anéis de crescimento em árvores têm desempenhado um importante papel na reconstrução de séculos de temperatura e precipitação, auxiliando os pesquisadores a determinar se essas mudanças são naturais ou estão ocorrendo como consequência das atividades antropogênicas (Jacoby & D'Arrigo 1997 e Briffa 2000).

Muitos trabalhos de dendroclimatologia vêm mostrando que recentemente a temperatura está aumentando numa taxa considerada anormal para os últimos milênios. Essa tendência é mostrada por D'Arrigo *et al.* (2006), estudando *Tectona grandis*, e Esper *et al.* (2002) e Briffa (2000) que analisaram cronologias de várias espécies temperadas do hemisfério Norte. Essas espécies mostram um sinal comum da evolução da temperatura, com um período claramente mais quente durante a Idade Média,

seguido de uma pequena glaciação, e um aumento de temperatura abrupto nos últimos 150 anos.

No hemisfério Sul, Villalba *et al.* (1997) também mostram que existe um aumento na temperatura registrada por *Nothofagus pumilo* de uma região ao norte e outra ao sul da Cordilheira dos Andes. Fica claro também que no local de coleta ao sul da Cordilheira dos Andes o aumento de temperatura é maior do que ao norte.

Além da temperatura a precipitação também está mudando. Schongart *et al.* (2004) estudando *Piranhea trifoliata*, uma espécie amazônica de florestas alagáveis, foram capazes de reconstruir os eventos de El-Niño dos últimos dois séculos e verificaram indícios de que os eventos de El-Niño estão se tornando mais severos. Schongart *et al.* (2006), mostraram a partir da reconstrução da precipitação, utilizando *Azelia africana* e *Pterocarpus erinaceus*, que as condições de seca estão aumentando nos últimos 160 anos no oeste africano.

Apesar das respostas do crescimento das plantas não dependerem somente da precipitação e da temperatura, podendo variar entre espécies e locais de estudos (Cook *et al.* 2001, Villalba *et al.* 1997), atualmente já é relativamente bem conhecido como o crescimento das espécies arbóreas respondem a essas variáveis climáticas. Anos muito frios e/ou anos muito secos são reconhecidamente limitantes do crescimento (Schweingruber 1996).

Mais recentemente, outra linha de estudo da dendrocronologia, a que estuda a variação da anatomia dos anéis de crescimento, está produzindo resultados novos que permitirão uma compreensão mais profunda dos efeitos das mudanças climáticas sobre as plantas (Fonti *et al.* 2010)

Trabalhos como os de Fonti *et al.* (2007) e Campelo *et al.* (2010) são exemplos de como os vasos contêm informações climáticas anuais relevantes. Fonti *et al.* (2007) estudaram *Castanea sativa* e encontram influências negativas da temperatura de fevereiro a março e positivas em abril sobre as áreas dos vasos do lenho inicial. Já Campelo *et al.* (2010) foram capazes de encontrar sinais climáticos analisando a média de áreas de vasos e a área máxima de vasos. A primeira variável produziu correlações positivas com a precipitação de abril e maio e a segunda, positivas com a precipitação de maio e junho.

Portanto, fica claro como os anéis de crescimento e as áreas de vasos possuem íntima relação com as variáveis climáticas de precipitação e temperatura. Porém, como explicado anteriormente, as variações do clima são uma consequência da elevação das concentrações de CO₂ atmosférico, e quando se estuda a precipitação e a temperatura, estão sendo analisados apenas resultados consequentes dessa elevação. Para estudar diretamente os efeitos do CO₂ nas plantas, outra variável, além dos anéis e dos vasos, está produzindo resultados muito promissores: o $\delta^{13}\text{C}$ (proporção relativa entre carbono ^{12}C e ^{13}C).

Os isótopos estáveis de carbono possuem uma íntima relação com as plantas, em especial com as que possuem a fotossíntese do tipo C3. Essas plantas são capazes de discriminar os isótopos estáveis através de dois processos de fracionamento (McCarroll & Loader 2004). O primeiro processo ocorre no momento da difusão do gás através da abertura estomática, o que acaba privilegiando o ^{12}C , que é o isótopo mais leve. O outro processo de fracionamento ocorre durante a fotossíntese na qual o carbono é fixado pela enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase (RUBISCO), que possui uma preferência pelo isótopo mais leve (^{12}C), realizando o segundo processo de fracionamento (Marino & McElroy 1991).

O fracionamento dos isótopos estáveis pode ser expresso como:

$$\delta^{13}\text{C}_p = \delta^{13}\text{C}_a - a - (b-a)p_i/p_a$$

Na qual:

$\delta^{13}\text{C}_p$ = valor isotópico do produto fotossintético;

$\delta^{13}\text{C}_a$ = valor isotópico do CO₂ atmosférico;

a = fracionamento por difusão;

b = fracionamento pela ação da RUBISCO;

p_i = pressão parcial de CO₂ no espaço intracelular;

p_a = pressão parcial de CO₂ na atmosfera.

As razões entre os isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) podem também ser expressas como eficiência intrínseca no uso da água (W_i), que é a razão entre o carbono fixado e a quantidade de água perdida, já que ambos processos são regulados pela atividade estomática e pela RUBISCO (McCarroll & Loader 2004).

Muitos trabalhos têm mostrado que a eficiência intrínseca no uso da água tem aumentado nas últimas décadas em decorrência da elevação da concentração atmosférica de CO₂ (Feng 1999, Hielitz *et al.* 2005 e Silva *et al.* 2009). Esse aumento na eficiência intrínseca do uso da água pode refletir no aumento das taxas de incremento anual do lenho. Bert *et al.* (1997) estudaram os anéis de crescimento e $\delta^{13}\text{C}$ de *Abies alba*. A partir da discriminação dos isótopos estáveis de carbono, os autores calcularam o W_i e verificaram que este aumentou durante as últimas décadas, e que este aumento coincide com um maior incremento radial da espécie observado no mesmo período.

O objetivo geral do presente trabalho é analisar os efeitos das mudanças do clima em *Hymenaea courbaril* L. e *Hymenaea stigonocarpa* Mart ex. Hayne através das informações registradas nos anéis de crescimento, utilizando três níveis diferentes de informação, um em escala macroscópica (que é o pano de fundo deste trabalho), que consiste na largura do anel de crescimento, outro em escala microscópica, que são as áreas de vasos e ainda outro em escala atômica, que são as razões entre os isótopos estáveis de carbono.

Os objetivos específicos são:

- Determinar a anualidade dos anéis de crescimento de *H. stigonocarpa*, enquanto *H. courbaril* já possui anéis comprovadamente anuais (Westbrook *et al.* 2006);
- Verificar se os anéis de crescimento das duas espécies possuem sinais comuns e se estes sinais estão correlacionados com o clima;
- Criar cronologias de áreas de vasos e analisar os sinais climáticos presentes nestas;
- Comparar as variáveis climáticas que regulam o crescimento e a área de vaso com as previsões futuras em modelos regionais de mudanças do clima;
- Construir cronologias de $\delta^{13}\text{C}$ e avaliar a variação da eficiência intrínseca do uso da água para as duas espécies;
- Analisar as taxas de crescimento das duas espécies dentro de um cenário de conservação das espécies.

Este último objetivo específico é de grande importância, pois, apesar da grande relevância das mudanças do clima sobre as duas espécies, existe, no estado de origem do material coletado (Minas Gerais), uma pressão maior e imediata sobre as espécies, que consiste na derrubada de áreas naturais de matas e cerrados, a qual coloca a conservação das duas espécies em uma urgência, em curto prazo, maior que as próximas mudanças climáticas.

Bibliografia

- Battle-Bayer L., Barjes N.H. & Bindraban P.S., 2010, Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127, 47-58
- Bert D., Leavitt S.W., & Dupouey J.L., 1997, Variations of wood $\delta^{13}C$ and water-use efficiency of *Abies alba* during the last century. *Ecology*, 78, 1588-1596
- Briffa K.B., 2000, Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees, *Quaternary Science Reviews*, 19, 87-105
- Campelo F., Nabais C., Gutiérrez E., Freitas H. & García-González I., 2010, Vessel features of *Quercus ilex* L. growing under Mediterranean climate have a better climatic signal than tree-ring width. *Trees Structure and Function*, 24, 463-470
- Cerri C.C., Maia S.M.F., Galdos M.V., Cerri C.E.P., Feigl B.J. & Bernoux M., 2009, Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. *Scientia Agricola*, 66, 831-843
- Cook E.R., Glitzenstein J.S., Krusik P.J. & Harcombe P.A., 2001, Identifying functional groups of trees in west gulf coast forests (usa): a tree-ring approach, *Ecological applications*, 11(3), 883-903
- D'Arrigo, R., Wilson, R., Jacoby, G., 2006, On the long-term context for late twentieth century warming. *Journal of Geophysical Research*. 111, 1-12
- Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H., 2002, Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* 295, 2250–2253
- FAO, 2009, State of the World's Forests, Rome

- Fearnside P.M., 2001, Saving tropical forests as a global warming countermeasure: an issue that divides the environmental movement. *Ecological Economics*, 39, 167-184
- Feng X., 1999, Trends in intrinsic water-use efficiency of natural trees for the past 100–200 years: a response to atmospheric CO₂ concentration, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 1891-1903
- Fonti P., Solomonoff N. & García-González I., 2007, Earlywood vessels of *Castanea sativa* record temperature before their formation. *New Phytologist*, 173, 562-570
- Fonti P., Arx G., García-Gonzalez I., Eilmann B., Sass-Klaassen U., Gärtner H. & Eckstein D., 2010, Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist*, 185, 42-53
- Goldenberg J. & Lucon O., 2008, Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento, 3^a Edição, EDUSP, São Paulo, SP, 396 pg
- Huges M.K., 2002 Dendrochronology in climatology-the state of the art. *Dendrochronologia*, 20(1-2), 95-116
- Hietz P., Wanek W. & Dünisch O., 2005, Long-term trends in cellulose $\delta^{13}\text{C}$ and water-use efficiency of tropical *Cedrela* and *Swietenia* from Brazil. *Tree Physiology*, 25, 745-752
- IPCC, 2007, Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacoby G.C. & D'Arrigo R.D., 1997, Tree rings, carbon dioxide and climatic change, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 94, 8350-8353
- Lombardi A., 2008, Créditos de carbon e sustentabilidade: os caminhos do novo capitalism. Lazuli Editora / Companhia Editora Nacional, São Paulo, 191 pg

-
- Marino B.D. & McElroy M.B., 1991, Isotopic composition of atmospheric CO₂ inferred from carbon in C4 plant cellulose. *Nature*, 349, 127-131
- McCarroll D. & Loader N. J., 2004, Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23, 771-801
- Schongart J., Bettina O., Hennenberg K. J., Poremski S. & Worbes M., 2006, Climate-growth relationships of tropical tree species in West Africa and their potential for climate reconstruction. *Global Change Biology*, 12, 1139-1150.
- Schongart J., Junk W.J., Piedade M.T.F., Ayres J.M., Hüttermann A. & Worbes M., 2004, Teleconnection between tree growth in the Amazonian flood-plains and El Niño-Southern Oscillation effect. *Global Change Biology*, 10, 683-692
- Schweingruber F.H., 1996, Tree rings and environment dendroecology, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt, 609 pg.
- Silva L.R., Anand M., Oliveira J.M. & Pillar V.D., 2009, Past century changes in *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze water use efficiency of southern Brazil: implications for forest expansion. *Global Change Biology*, 15, 2387-2396
- Silva J.F., Fariñas M.R., Felfili J.M. & Klink C.A., 2006, Spatial heterogeneity, land use and conservation in the cerrado region of Brazil, *Journal of Biogeography*, 33, 536-548
- Villalba R., Boninsegna J.A., Veblen T.T., Schmelzer A., & Rubulis, S., 1997, Recent Trends in Tree-Ring Records from High Elevation Sites in the Andes of Northern Patagonia, *Clim. Change*, 36, 425-454
- Westbrook J.A., Guilderson T.P. & Colinvaux P.A., 2006, Annual growth rings in a sample of *Hymenea courbaril*. *IAWA bulletin n.s.*, 27(2), 193-197

Análise dos sinais climáticos registrados nos anéis de crescimento e áreas de vaso de duas espécies tropicais: *Hymenaea courbaril* e *Hymenaea stigonocarpa*, e os possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre as espécies

Giuliano Maselli Locosselli¹ & Gregório Ceccantini¹

¹ Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

Resumo

Os anéis de crescimento de árvores são capazes de registrar os eventos pelos quais os indivíduos passam durante toda a sua vida. Essa capacidade permitiu o desenvolvimento da dendrocronologia baseada no estudo das séries temporais da largura dos anéis de crescimento. Mais recentemente, o estudo das variações anatômicas dos anéis de crescimento, em especial as áreas da secção transversal dos vasos, está abrindo um novo leque de possibilidades, principalmente quando se tratam dos estudos dendroclimatológicos. O objetivo do presente estudo é analisar os sinais climáticos de duas espécies de jatobá: *H. courbaril* (de floresta) e *H. stigonocarpa* (de cerrado) através dos anéis de crescimento e áreas de vaso do lenho inicial. Como apenas *H. courbaril* possui anéis de crescimento comprovadamente anuais, foram construídas cronologias multi-espécies para auxiliar na determinação da anualidade dos anéis de *H. stigonocarpa*. O crescimento radial de *H. courbaril* possui uma influência da temperatura e precipitação do final da estação de crescimento, enquanto *H. stigonocarpa* sofre uma influência da temperatura e precipitação da estação seca logo antes da estação de crescimento, e no início desta. Já as cronologias de áreas de vaso mostraram um resultado diferente, em *H. courbaril* a precipitação do meio da estação e a temperatura do período de seca antes do início do crescimento mostram as maiores influências e, em *H. stigonocarpa*, a precipitação da estação mais seca e a temperatura do início da estação de crescimento foram os períodos mais importantes. As influências encontradas do clima sobre o crescimento das duas espécies e as previsões presentes na literatura (elaboradas a partir dos cenários propostos pelo IPCC) sugerem que de 2020-2100, as duas espécies podem sofrer um declínio no incremento radial anual, com um efeito mais forte sobre *H. courbaril*. Já em relação aos vasos, as médias mais elevadas de temperatura têm o potencial de diminuir as áreas dos vasos do lenho inicial das duas

espécies, porém em *H. courbaril*, os vasos podem sofrer menos ou se tornar maiores caso as previsões de aumento das precipitações na estação chuvosa se confirmem.

Palavras-chaves: Dendrocronologia tropical, áreas de vaso, *Hymenaea*, mudanças climáticas, mata, cerrado.

1. Introdução

Por muitas décadas, os estudos dendrocronológicos basearam-se na medição da largura do anel de crescimento, pois esta variável pode registrar muitos eventos da vida das plantas, como por exemplo a influência do clima sobre o crescimento destas. Isso somente é possível, pois os métodos dendrocronológicos permitem, a partir de uma estatística rigorosa, determinar o ano exato de formação de um anel de crescimento (Schweingruber 1996). Estudos mais recentes têm mostrado que outros parâmetros podem variar dentro do anel, como por exemplo as dimensões das células condutoras (Fonti & Garcia-Gonzalez 2004, Verheyden *et al.* 2005, Fonti *et al.* 2010).

A dependência ambiental das dimensões das células condutoras já é bem conhecida em estudos de anatomia ecológica do lenho, que mostram que estas dimensões, em especial o diâmetro da secção transversal da célula, estão correlacionadas com grandes gradientes climáticos, como a variação da latitude e altitude (Oever *et al.* 1981, Noshiro *et al.* 1995, Noshiro & Baas 2000), e em ambientes contrastantes (Graaf & Baas 1974, Roig 1986). Com o aumento das condições de maior estresse hídrico, as células condutoras tendem a possuir um calibre progressivamente menor, devido ao maior risco de cavitação, (Zimmermann 1983).

Esses dados indicam que existe um potencial climático nos estudos da variação anual das características anatômicas do anel de crescimento, em especial em relação às células condutoras, seguindo métodos semelhantes aos da dendrocronologia tradicional. Na realidade, a idéia de analisar o calibre dos vasos remonta a década de 1960, mas problemas técnicos só permitiram que essa área da dendrocronologia se desenvolvesse muito mais recentemente com os avanços tecnológicos necessários (Fonti *et al.* 2010).

O estudo das cronologias de áreas de vaso mostra que, em muitos casos, o sinal climático registrado pelos vasos é diferente dos obtidos com a medição da largura dos anéis de crescimento, fato que é muito desejável, já que permite estabelecer séries mais

amplas e com mais informações disponíveis para as análises de interesse (Fonti & García-Gonzales 2004).

Todos esses sinais climáticos obtidos com as análises dendrocronológicas mostram como o clima modula o crescimento e a anatomia das espécies arbóreas. Essa íntima relação entre a planta e o clima possui um papel importante na previsão do que ocorrerá com essas espécies dentro dos cenários futuros de mudanças climáticas.

Atualmente, há uma grande disponibilidade, na literatura, de modelos climáticos que construíram previsões de temperatura e precipitação com base nos cenários de emissões de CO₂ contidos nos relatórios do IPCC (2007). Modelos regionais como os construídos por: Vera *et al.* (2006), Marengo *et al.* (2009), Nuñez *et al.* (2009) e Cabré e Nuñez (2010), que prevêem as temperaturas e precipitações de regiões da América do Sul podem ser utilizados para prever o que ocorrerá com o crescimento e anatomia de espécies arbóreas locais de 2020 a 2100.

O objetivo do presente trabalho é analisar as influências da precipitação e da temperatura sobre as taxas de crescimento e áreas de vaso de duas espécies tropicais presentes em um mosaico vegetacional: *H. courbaril* L. (espécie presente em matas semi-descíduas e matas ciliares) e *H. stigonocarpa* Mart ex. Hayne (espécie presente no cerrado). Com os sinais climáticos bem definidos, esses serão confrontados com as previsões futuras, obtidas na literatura, feitas com base nos cenários de emissões dos gases do efeito estufa propostos pelo IPCC (2007) para saber como as espécies possivelmente responderão, no futuro, às mudanças climáticas.

Entretanto, das duas espécies estudadas, somente *H. courbaril* possui anéis de crescimento comprovadamente anuais (Westbrook *et al.* 2006). Para auxiliar na determinação da anualidade dos anéis de crescimento da outra espécie, foram construídas cronologias multi-espécies, com a finalidade de encontrar um possível sinal de crescimento comum entre elas.

2. Material e Métodos

2.1. Local de coleta

As amostras foram coletadas no município de Matozinhos/MG (Brasil), a S 19°27'28" de latitude e W 43°57'43" de longitude e 792 metros de altitude. O local caracteriza-se por ser uma região de contato entre matas semi-descíduas e cerrados.

A região possui uma temperatura média de 21.8°C e precipitação anual média de 1310mm.

Os dados climáticos foram obtidos de uma plataforma de coleta de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada no município de Sete Lagoas à 40 quilômetros do local de coleta. A série temporal de dados climáticos possui 82 anos (1926-2008) de dados mensais de precipitação e temperaturas média, mínima e máxima.

2.2. Material coletado e processamento

Foram coletadas amostras do tronco principal de duas espécies de jatobá com o uso de trado motorizado e motosserra. Ao todo, foram amostradas 12 árvores de *Hymenaea stigonocarpa*, sendo oito amostras de disco completo e quatro com amostras de baquetas, e 11 árvores de *Hymenaea courbaril*, sendo duas de disco completo e nove com amostras de baquetas. Para as amostras de trado, sempre foram obtidas duas ou mais baquetas por árvore na altura do peito.

Com os discos e as baquetas secas, todos passaram por polimento das superfícies. As baquetas foram polidas utilizando navalha descartável, que produzia uma superfície adequada para as medições de anéis de crescimento e para as medições de áreas de vaso. Os discos foram aplainados, utilizando uma plaina elétrica de mão, e posteriormente lixados utilizando lixas de diferentes granulações (de 60 até 2000). Esse procedimento produziu uma superfície adequada para a medição de anéis, mas imprópria para a medição dos vasos, já que esses ficavam ocluídos por pó de madeira. Com o intuito de melhorar a superfície para a medição dos vasos, foram aplicadas fitas adesivas sobre a madeira para a retirada parcial do pó de madeira presente no interior dos vasos e, posteriormente, foram aplicados corantes (azul-de-astra e safranina) para aumentar o

contraste das estruturas e evidenciar a parede dos vasos. No caso das baquetas, as amostras foram polidas com navalhas descartáveis de micrótomo (Leica).

2.3. Medições e análises: largura de anéis de crescimento

Com a superfície dos discos finamente polida, foram escolhidos quatro raios nos quais foram realizadas as datações. No caso das baquetas foi utilizado o número de raios disponíveis para cada árvore. Os raios foram escolhidos evitando regiões nas quais houvesse injúrias visíveis ou anomalias na madeira que claramente pudessem atrapalhar a datação cruzada.

Após a identificação e a marcação dos anéis, os raios foram fotografados utilizando uma câmera digital (Canon 350D) com uma lente macro (Canon 100mm) acoplada a um tubo de extensão de 36mm (Kenko).

Os anéis de crescimento foram medidos com o auxílio do programa de domínio público ImageJ 1.38X (Wayne Hasband, National Institute of Health USA), previamente calibrado com a fotografia de uma lâmina micrometrada (Zeiss).

As larguras dos anéis de crescimento foram processadas pelo programa COFECHA (Holmes 1983). O programa realizou as análises utilizando os seguintes parâmetros diferentes do padrão: tamanho do segmento = 30 anos e espaço das análises a cada 15 anos. E com o intuito de saber se cada trecho da cronologia estava bem representada pelo número de amostras coletadas, foi calculado o EPS (“Effort per Sample”) (Wigley *et al.* 1984) em seguimentos de 30 anos a cada 15 anos.

Com a cronologia bem estabelecida, o passo seguinte foi a construção da cronologia residual, a qual foi obtida com o uso programa ARSTAN (Cook & Kairiukstis 1990, Cook & Holmes 1996).

Foram construídas cronologias residuais de largura de anéis de crescimento para cada espécie e uma cronologia multi-espécie para verificar a possível existência de um sinal comum. Esse sinal comum foi testado em uma análise de correlação entre as três cronologias residuais.

Para conhecer os sinais climáticos que modulam o crescimento das duas espécies, foram construídas funções de resposta para a precipitação e temperaturas média, máxima e mínima da estação de crescimento corrente e a imediatamente anterior.

2.4. Medições e análises: área de vaso

Para a medição das áreas de vaso, escolheu-se o raio de cada indivíduo que possuísse o melhor valor de correlação com a série média criada pelo software COFECHA. Essa escolha permitiu analisar apenas o raio que tivesse algum sinal comum compartilhado por todas as outras árvores analisadas.

Nos raios escolhidos, foram medidas dez áreas de vaso em cada anel de crescimento, do mais recente até o ano de 1924, que corresponde ao período da série histórica de dados climáticos obtida. Desses dez vasos, cinco foram medidos próximos ao parênquima marginal terminal do ano anterior que denominou-se de lenho inicial, e os outros cinco foram medidos próximos ao parênquima marginal terminal do anel amostrado, denominado de lenho tardio.

As áreas de vaso foram medidas utilizando o software de domínio público ImageJ. Para aumentar a precisão do traçado feito em torno da parede dos vasos, foi utilizada uma mesa digitalizadora (MousePen 8X6 Genius). As áreas de vaso foram medidas utilizando as imagens que originalmente foram obtidas para a medição da largura dos anéis de crescimento.

Para cada raio analisado foram calculadas as médias das áreas de vaso por anel seguindo a divisão: média geral, média dos vasos no lenho inicial e média dos vasos no lenho tardio.

Com o intuito de conhecer as diferenças intra e inter-espécies nas áreas de vaso, foram realizados testes t-Student (Sokal & Rohlf 1981).

Já para a construção das cronologias, foram utilizadas apenas as áreas de vaso do lenho inicial devido aos melhores valores de intercorrelação e sensibilidade, sendo uma série para os indivíduos de *H. courbaril*, outra para *H. stigonocarpa* e uma última multi-espécie. Cada uma dessas cronologias foi analisada no programa COFECHA para conhecer a qualidade delas, porém sem levar em conta os valores críticos, já que os anéis de crescimento foram previamente datados obedecendo todos os pressupostos. As cronologias escolhidas foram tratadas no programa ARSTAN como explicado anteriormente.

Com o intuito de decidir se as cronologias multi-espécie de áreas de vaso possuíam um significado biológico, foram realizadas correlações entre as cronologias individuais e a multi-espécie para cada categoria de áreas de vaso.

A influência do clima sobre as áreas de vaso foram analisadas utilizando funções de resposta.

2.5. Modelos regionais de mudanças no clima

O conhecimento das interações apresentadas entre os indivíduos estudados e o ambiente, em especial as variáveis climáticas: temperatura e precipitação, permite que sejam feitas previsões utilizando os modelos regionais de clima propostos por Vera *et al.* (2006), Marengo *et al.* (2009), Nuñez *et al.* (2009) e Cabré e Nuñez (2010). Estes trabalhos propõem previsões de como será o clima de um período que varia de 2020 a 2100 na América do Sul. Para o presente trabalho serão utilizadas apenas as previsões para a região sudeste do Brasil, local em que se encontra o Estado de Minas Gerais onde foram realizadas as coletas de *Hymenaea* spp.

Estes modelos foram construídos baseados nos cenários de emissão de CO₂ presentes no “Special Report on Emission Scenarios” (SRES, IPCC 2000). O trabalho de Vera *et al.* (2006) utilizou o cenário B1 no qual as emissões se elevam até 2050 e depois tendem a diminuir. Já os outros autores utilizaram os cenários A2 e B2, sendo que em ambos as emissões aumentam até 2100, com um taxa maior em A2.

Para inferir o que poderá ocorrer com as espécies no futuro, as previsões dos modelos apresentados serão confrontadas com os resultados das funções de resposta de cronologias de anéis de crescimento e áreas de vaso.

3. Resultados

3.1. Clima

Com os dados obtidos na plataforma de coleta de dados foram construídos um climadiagrama (Figura 1) e um gráfico de precipitação mensal de cinco anos consecutivos (Figura 2).

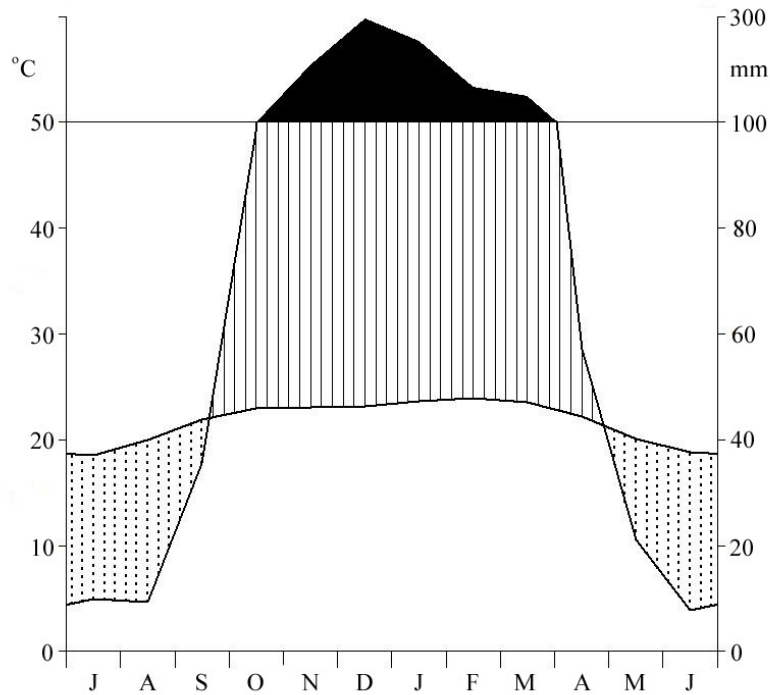


Figura 1: Climadiagrama construído com os dados da estação de coleta de dados do INMET em Sete Lagoas/MG.

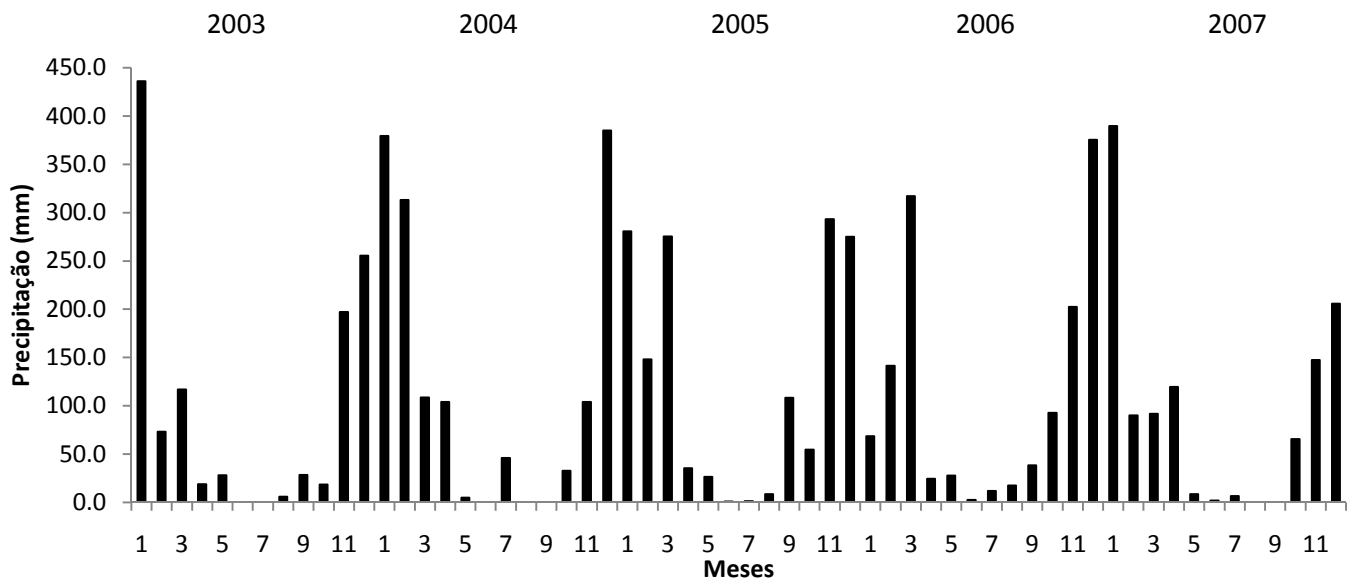


Figura 2: Precipitação mensal de cinco anos (2003-2007).

A análise dos dois gráficos permite verificar a presença de uma estação seca bem demarcada e pouca variação na temperatura ao longo do ano. Quando se analisa apenas o gráfico de precipitação ao longo dos anos, é possível perceber que a estação de

crescimento é mais curta do que o mostrado pelo climadiagrama, compreendendo o período de novembro a março.

3.2. Largura do anel de crescimento

Os anéis de crescimento das duas espécies são delimitados por uma faixa de parênquima marginal (Figura 3).

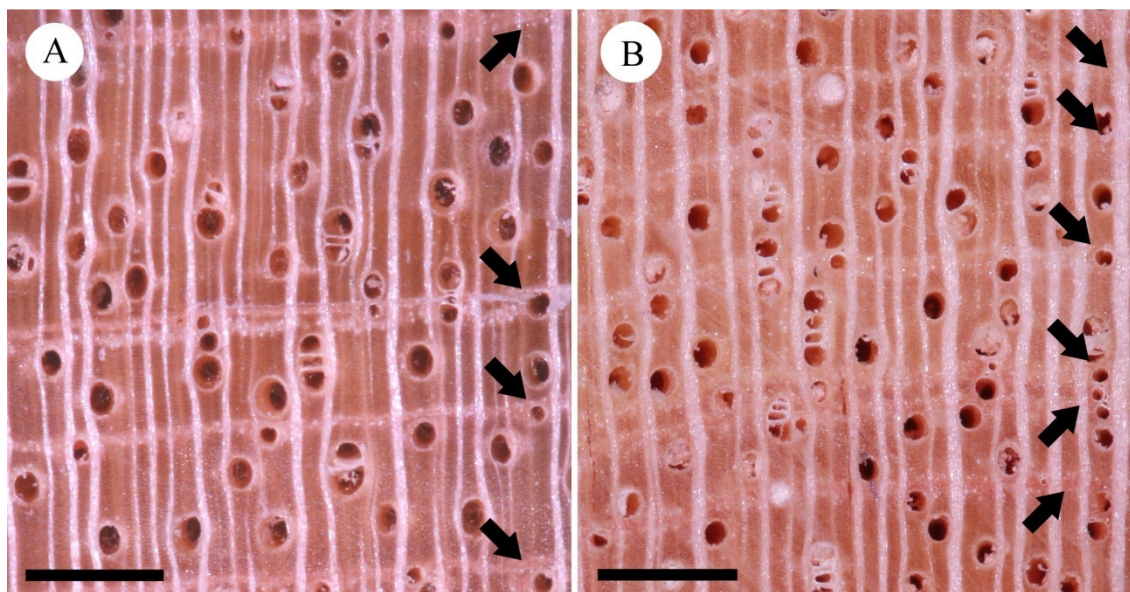


Figura 3: Exemplos de anéis de crescimento (setas) de A) *Hymenaea courbaril* e B) *Hymenaea stigonocarpa*. Escala 1mm.

A partir das medições destes anéis, foram construídas cronologias cujas análises de qualidade e os comprimentos estão contidos na tabela 1.

Tabela 1: Valores de intercorrelação, sensibilidade da cronologia e comprimento (anos) da série de *H. courbaril*, de *H. stigonocarpa* e a multi-espécie.

	Intercorrelação	Sensibilidade	Comprimento máximo (anos)	Comprimento médio (anos)
<i>H. courbaril</i>	0.34	0.50	124	75
<i>H. stigonocarpa</i>	0.39	0.60	144	80
Multi-espécie	0.38	0.57	144	79

Como as cronologias possuíam comprimentos máximos com mais de 100 anos, foi utilizado um valor crítico de intercorrelação (para análises com seguimentos de 50 anos a cada 25 anos) igual a 0.32. Portanto qualquer cronologia com valor superior a esse crítico pode ser utilizada para os estudos dendrocronológicos, que é o caso das três cronologias estudadas. Além disso, os valores de sensibilidade obtidos mostram que não existe complacência nos anéis de crescimento.

Como cada trecho da série tem que estar bem representado pelo número de amostras utilizadas (Figura 4), foi calculado o EPS, que deve possuir valor maior que 0.85 (Tabela 2).

Tabela 2: Valores de EPS para cada um dos intervalos de tempo nas três cronologias estudadas.

Intervalo	Valor do EPS								
	1860-1889	1875-1904	1890-1919	1905-1934	1920-1949	1935-1964	1950-1979	1965-1994	1980-2009
<i>H.courbaril</i>				0.50	0.70	0.84	0.86*	0.87*	0.89*
<i>H. stigonocarpa</i>	0.47	0.45	0.66	0.69	0.71	0.89*	0.93*	0.92*	0.94*
Multi-espécie	0.47	0.42	0.67	0.80	0.88*	0.92*	0.95*	0.95*	0.96*

*EPS significativo > 0.85

Portanto apesar de terem sido criadas cronologias com mais de 100 anos de idade, como elas não estão bem representadas pelo número de amostras, a cronologia de *H. stigonocarpa* pode ser somente utilizada do ano de 1935 a 2009, a cronologia de *H. courbaril* pode ser somente utilizada de 1950 a 2009 e a multi-espécie de 1920 a 2009.

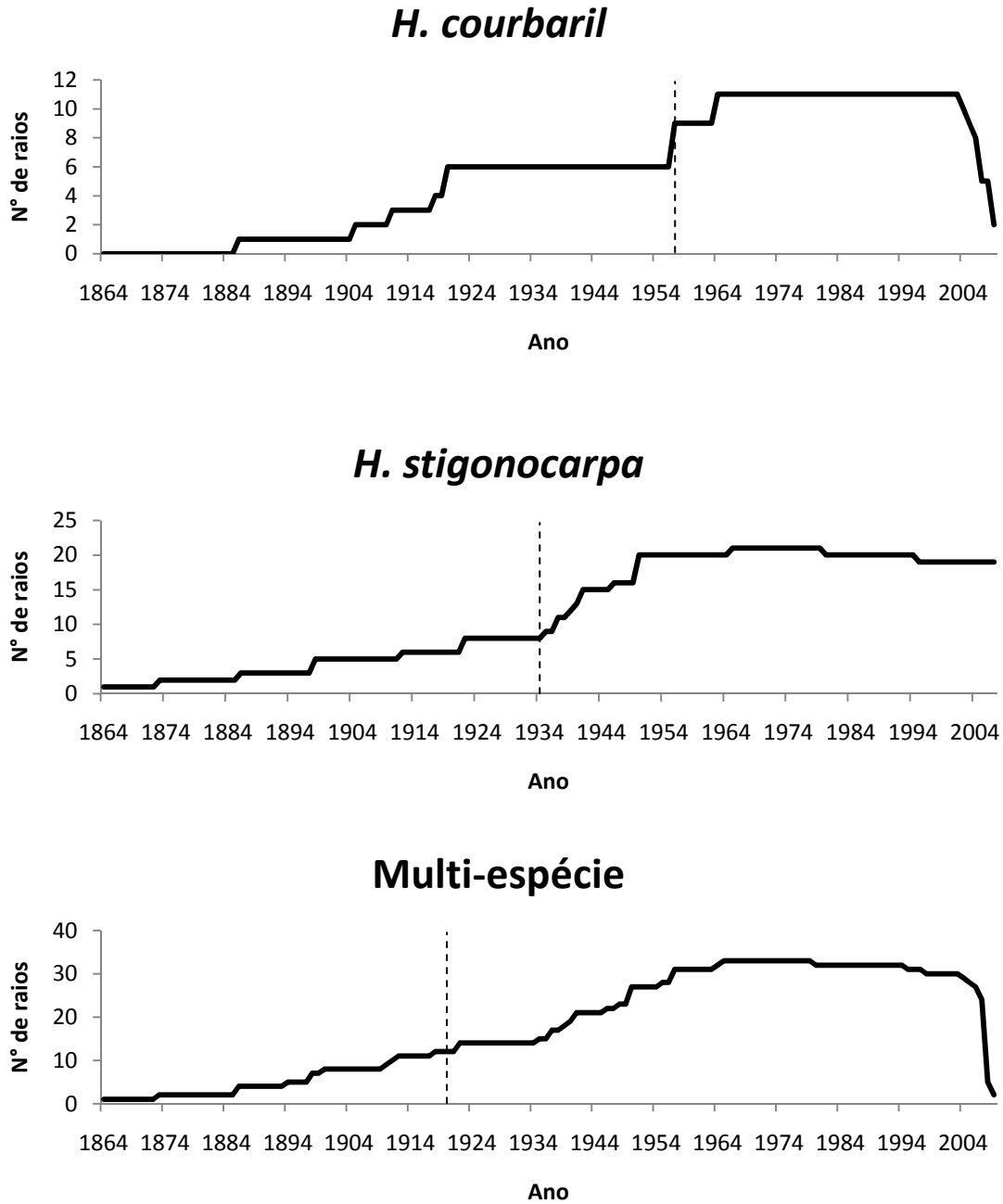


Figura 4: Número de raios analisados em função do ano para cada uma das cronologias (as linhas tracejadas indicam os limites impostos pelo EPS).

Com a verificação da intercorrelação, da sensibilidade e do EPS, as cronologias residuais foram construídas (Figuras 5 e 6). A tabela 3 mostra as correlações entre as cronologias residuais.

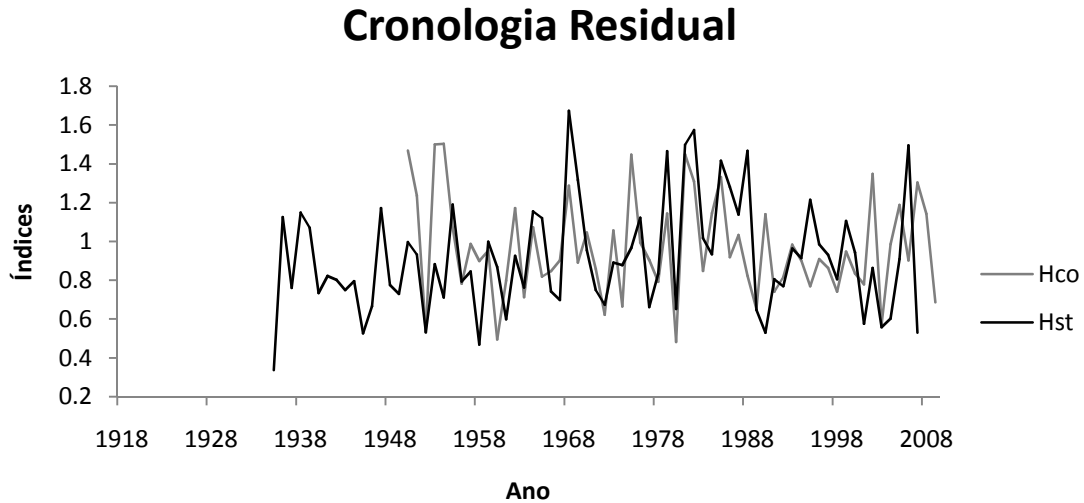


Figura 5: Cronologias residuais de largura de anel de crescimento de *H. courbaril* (Hco) e *H. stigonocarpa* (Hst).

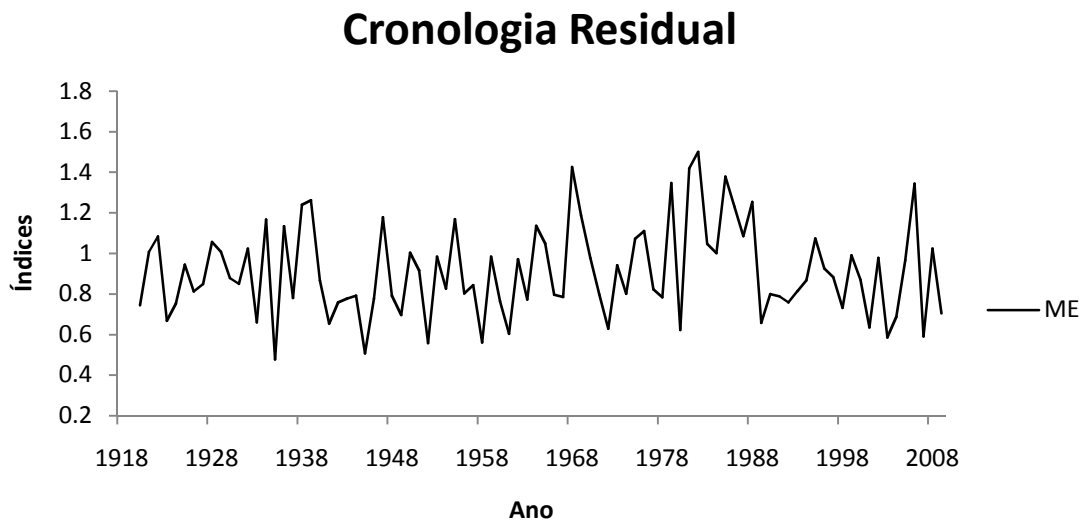


Figura 6: Cronologia residual multi-espécie de largura de anel de crescimento (ME).

Tabela 3: Tabela de correlação (r) entre as cronologias residuais de largura de anel de crescimento.

	Hco	Hst	ME
Hco	1.00	0.36*	0.53*
Hst	0.36*	1.00	0.96*
ME	0.53*	0.96*	1.00

* significativo para $\alpha=0.05$

Nos casos analisados, existe uma correlação significativa entre os valores dos resíduos das duas espécies, e também cada uma das espécies está significativamente correlacionada com a cronologia multi-espécie, sendo que a cronologia de *H. stigonocarpa* possui um valor de “r” quase 100% maior que o encontrado em *H. courbaril*.

Com as cronologias residuais bem definidas, foi possível construir as funções de resposta para cada uma das espécies, *H. courbaril* (Figura 7) e *H. stigonocarpa* (Figura 8).

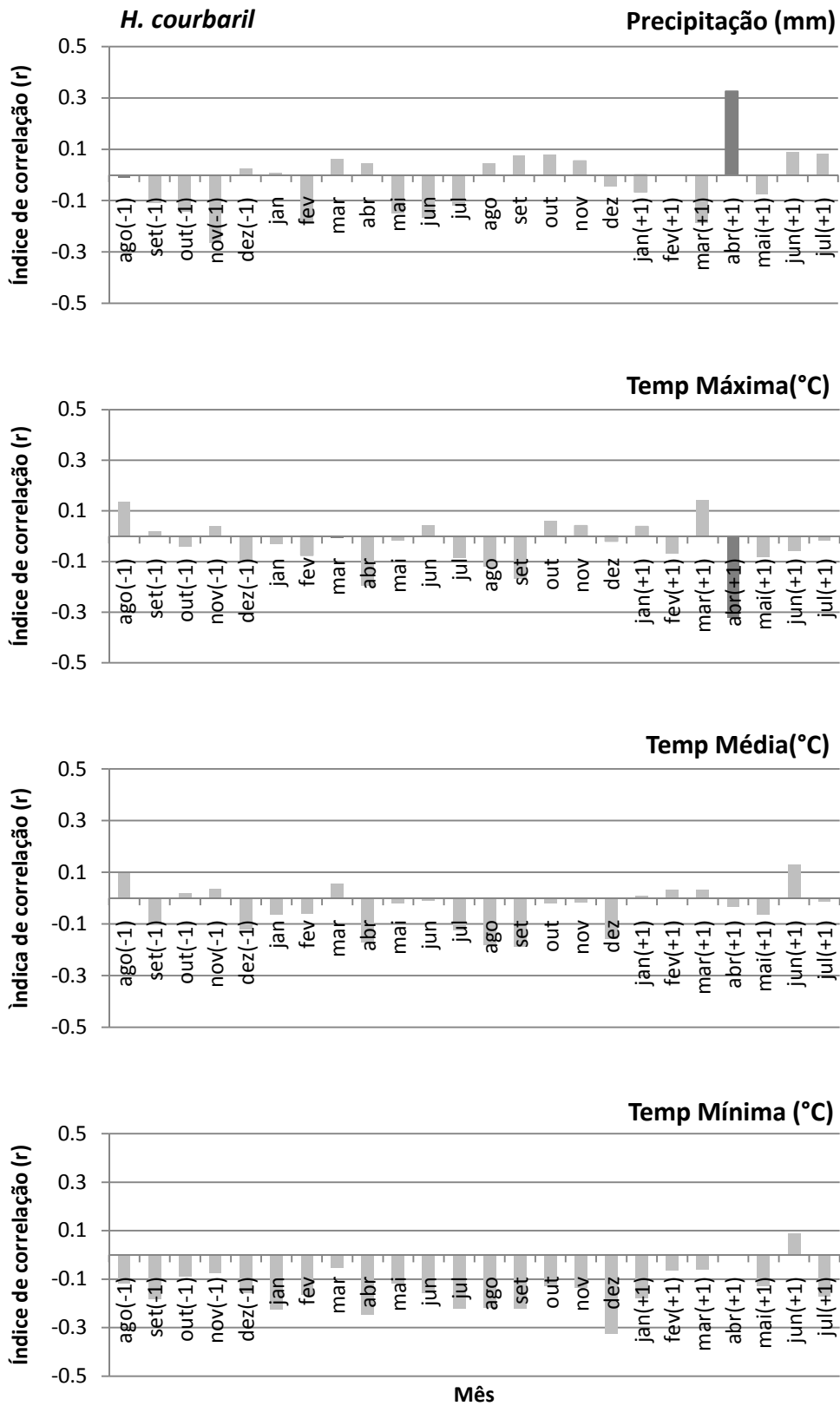


Figura 7: Gráficos de correlações mensais dos resíduos da largura do anel com dados climáticos para *H. courbaril*. Cinza escuro, correlação significativa para $\alpha=0.05$.

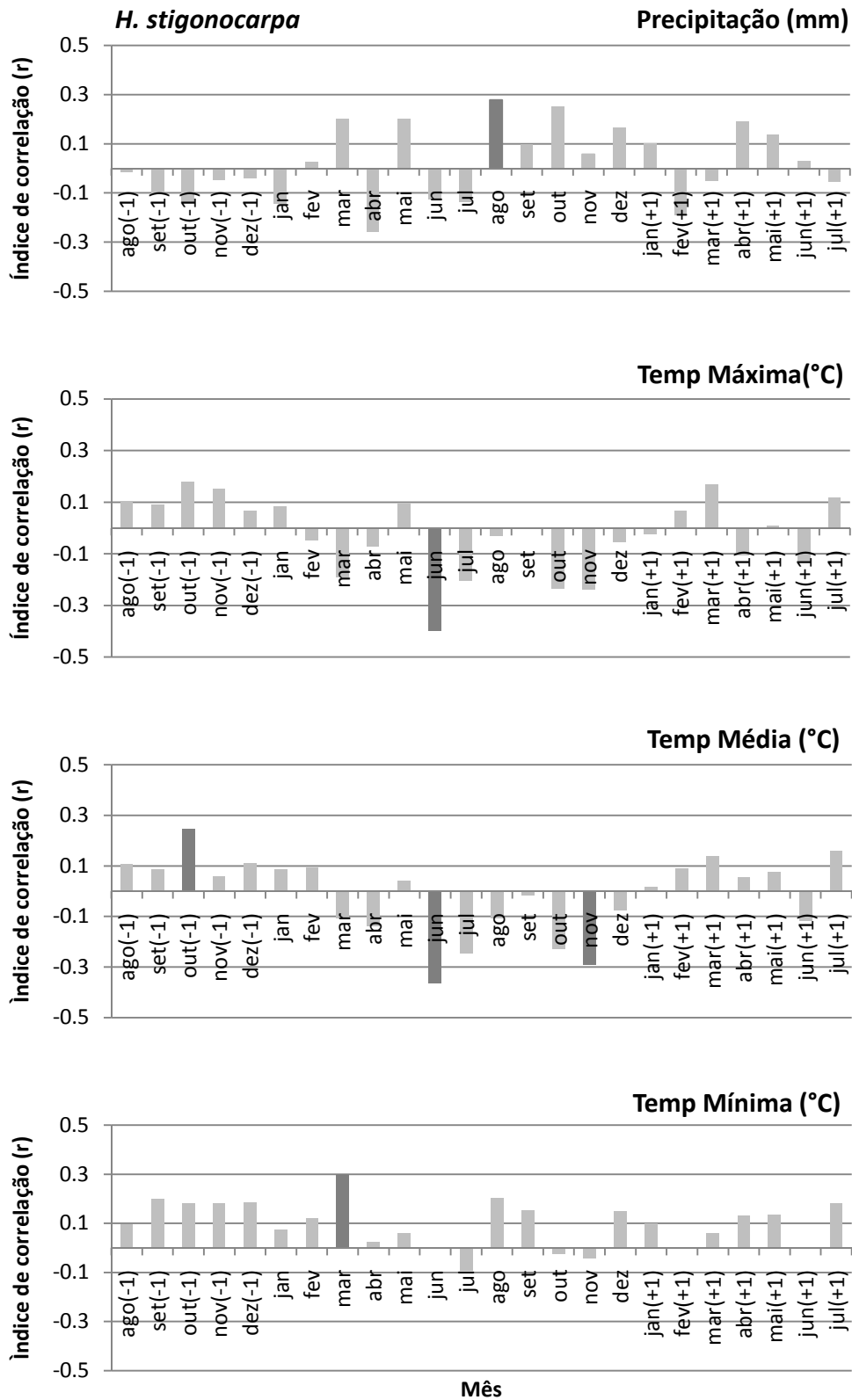


Figura 8: Gráficos de correlações mensais dos resíduos da largura do anel com dados climáticos para *H. stigonocarpa*. Cinza escuro, correlação significativa para $\alpha=0.05$.

As funções de resposta mostram que *H. courbaril* possui uma influência positiva da precipitação e negativa da temperatura no período que corresponde ao final da estação de crescimento corrente, enquanto *H. stigonocarpa* é influenciado positivamente pela precipitação e negativamente pelas temperaturas máxima e média num período imediatamente anterior ao início da estação de crescimento corrente, e no caso da temperatura média, no início da estação. A espécie de cerrado ainda sofre influência positiva da temperatura média e mínima, respectivamente, do início e final da estação de crescimento anterior.

3.3. Áreas de vaso

A tabela 4 mostra o resultado das análises de Teste-t utilizadas para diferenciar as espécies em relação à média geral das áreas de vaso (inicial e tardio), à média das áreas de vaso no lenho inicial e à média no lenho tardio. Os resultados dos testes mostraram que as espécies são diferentes para todas as variáveis estudadas e *H. courbaril* possui os maiores valores de área.

Tabela 4: Resultados das análises de Teste-t entre as espécie *H. courbaril* e *H. stigonocarpa* em relação à área de vaso geral, do lenho inicial, do lenho tardio e para a proporção tardio/inicial.

	<i>H.courbaril</i>		<i>H. stigonocarpa</i>		Teste t	
	Média	Des. Padrão	Média	Des. Padrão	t	p
Áreas geral (μm^2)	24475.0	9035.1	19260.0	6466.7	11.7	<0.0001*
Áreas inicial (μm^2)	28197.3	11516.9	21789.0	8157.0	11.4	<0.0001*
Áreas tardio (μm^2)	20857.3	8101.6	16800.2	5652.2	10.3	<0.0001*

* $\alpha=0.05$

Outro teste realizado foi o de Teste-t para diferenciar as áreas de vaso entre o lenho inicial e o lenho tardio em cada uma das espécies (Tabela 5). Nestes testes foram encontradas diferenças significativas entre as áreas de vaso do lenho inicial e tardio nas duas espécies, sendo que o lenho inicial possui vasos com áreas significativamente maiores.

Tabela 5: Teste-t para a áreas de vaso do lenho inicial e tardio para as espécies de jatobá: *H. courbaril* e *H. stigonocarpa*.

	<i>H. courbaril</i>		<i>H. stigonocarpa</i>	
	Média (μm^2)	Desvio Padrão	Média (μm^2)	Desvio Padrão
Lenho inicial	28197.4	11516.9	21789.0	8157.0
Lenho tardio	20857.3	8101.6	16800.2	5652.2
Teste t	t= 11.914 p<0.0001*		t=11.672 p<0.0001*	

* $\alpha=0.05$

Foram construídas cronologias das áreas de vaso do lenho inicial para cada uma das espécies e uma multi-espécie. Para saber a qualidade de cada uma delas, foram calculados os valores de intercorrelação e sensibilidade (Tabela 6).

Tabela 6: Valores de intercorrelação e sensibilidade das cronologias residuais de áreas de vaso do lenho inicial para cada uma das espécies e para a multi-espécie.

	Intercorrelação	Sensibilidade
<i>H. courbaril</i>	0.072	0.352
<i>H.stigonocarpa</i>	0.067	0.379
Multi-espécie	0.061	0.365

A partir dessas informações foram construídas as cronologias residuais das séries de áreas de vaso do lenho inicial (Figuras 9 e 10). Como realizado nas cronologias de largura de anel de crescimento, as os resíduos de cada série foram correlacionados entre si (Tabela 7).

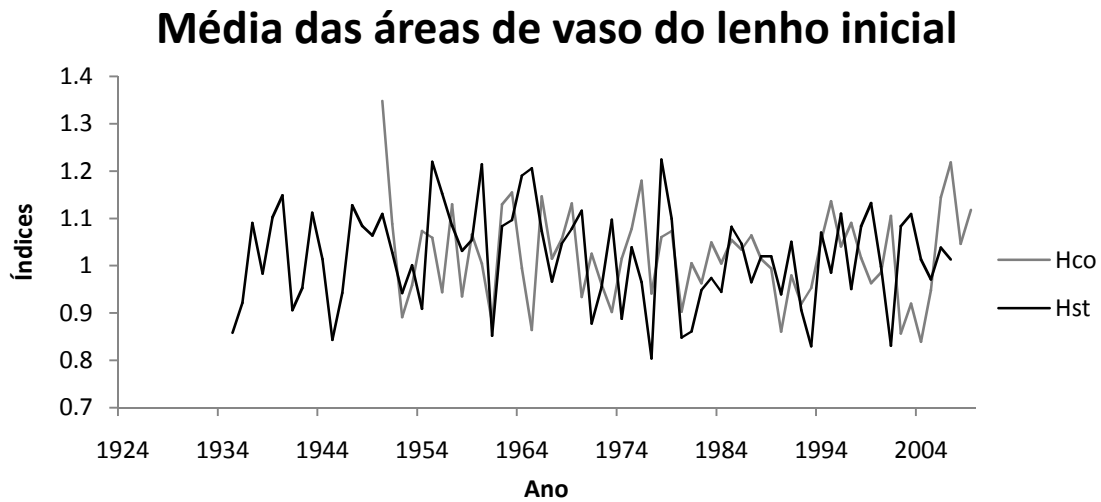


Figura 9: Resíduos das cronologias de média das áreas de vaso do lenho inicial para as espécies: *H. courbaril* (Hco) e *H. stigonocarpa* (Hst).

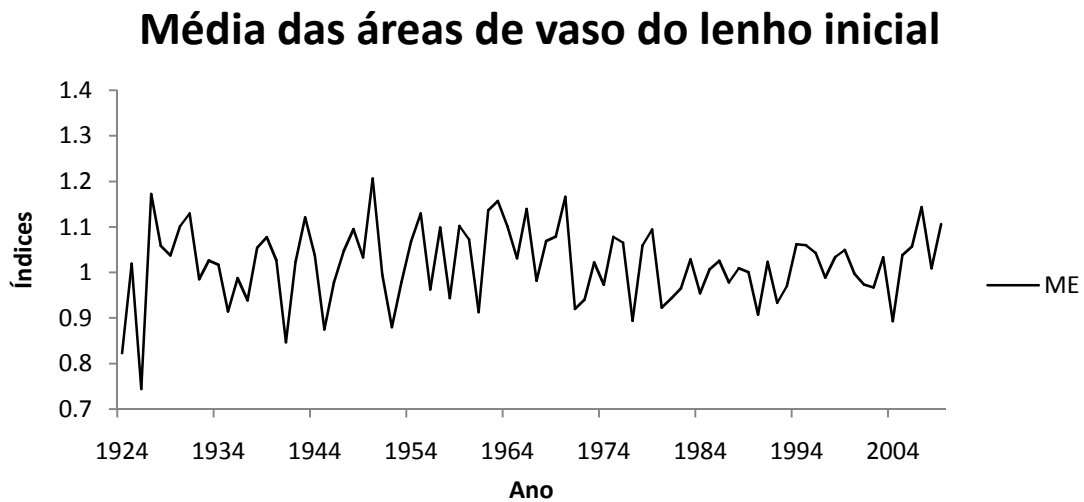


Figura 10: Resíduos das cronologias de média das áreas de vaso do lenho inicial para os dados multi-espécie (ME).

Tabela 7: Tabela de correlação (r) entre as cronologias residuais de áreas de vaso do lenho inicial.

	Hst	Hco	ME
Hst	1.00	0.15	0.63*
Hco	0.15	1.00	0.69*
ME	0.63*	0.69*	1.00

*significativo para $\alpha=0.05$

Os resultados das correlações mostram que os resíduos das cronologias das espécies não estão significativamente correlacionados entre si, e a correlação de cada

uma das espécies com a cronologia multi-espécie possui valores mais próximos do que os encontrados nas cronologias de largura de anéis de crescimento.

Com as cronologias residuais bem definidas, foi possível construir as funções de resposta para cada uma das espécies, *H. courbaril* e *H. stigonocarpa* (Figuras 11 e 12, respectivamente)

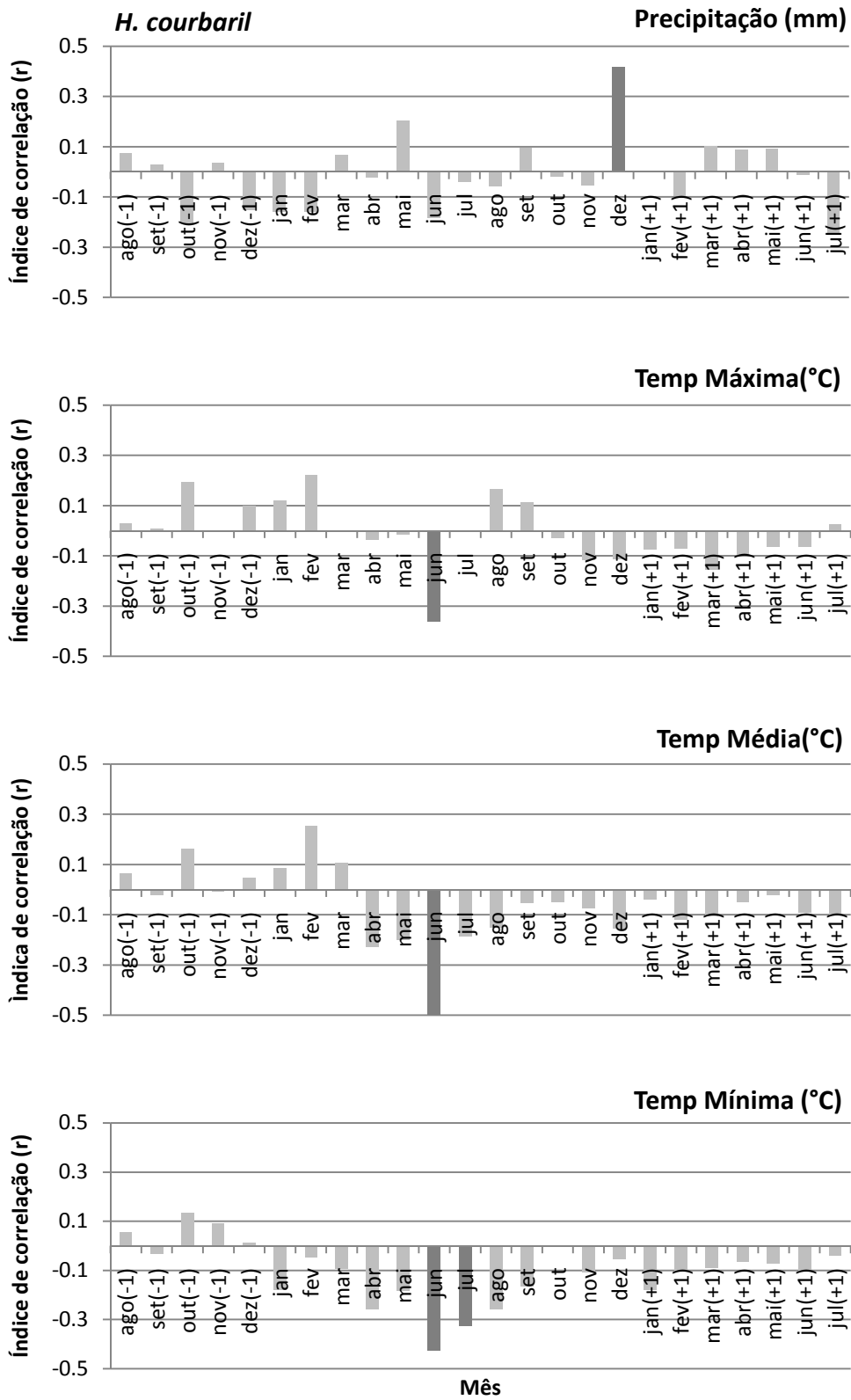


Figura 11: Gráficos de correlações mensais dos resíduos das áreas de vaso do lenho inicial com o clima para *H. courbaril*. Cinza escuro, correlação significativa para $\alpha=0.05$.

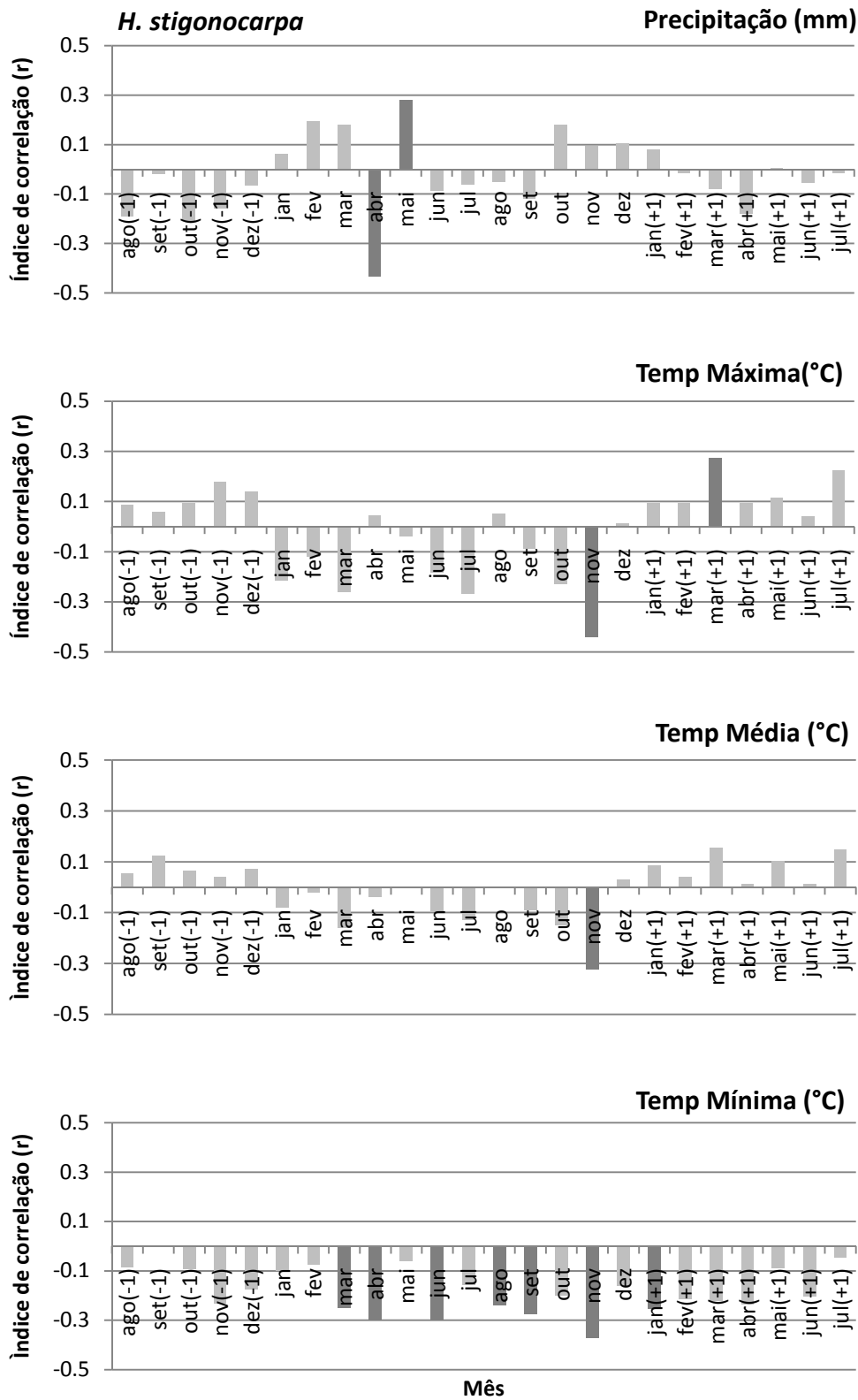


Figura 12: Gráficos de correlações mensais dos resíduos das áreas de vaso do lenho inicial com o clima para *H. stigonocarpa*. Cinza escuro, correlação significativa para $\alpha=0.05$.

4. Discussão

Conforme exposto anteriormente, *H. courbaril* possui anéis de crescimento comprovadamente anuais (Westbrook *et al.* 2006). Porém não basta que os anéis de crescimento sejam anuais para serem utilizados em estudos dendrocronológicos, eles precisam registrar algum sinal compartilhado por muitos indivíduos de uma população (Schweingruber 1996). A presença deste sinal e a intensidade dele foram verificadas neste trabalho nos indivíduos de *H. courbaril* por meio da intercorrelação significativa e da boa sensibilidade.

Ao contrário de *H. courbaril*, a anualidade dos anéis de crescimento de *H. stigonocarpa* não havia sido previamente comprovada. O resultado da cronologia multi-espécie demonstra estatisticamente que um determinado sinal anual de *H. courbaril* é compartilhado por *H. stigonocarpa*, o que é um indício de que os anéis de crescimento dessa espécie também são anuais. Este indício tornou-se um fato quando foram encontradas influências mensais bem estabelecidas da precipitação e das temperaturas sobre o crescimento da espécie.

Já o sinal encontrado nas cronologias de áreas de vaso de jatobá é mais fraco do que o encontrado na largura do anel de crescimento, o que resultou em valores menores de intercorrelação. Este fato muito provavelmente deve-se a uma maior variabilidade no tamanho dos vasos em relação ao tamanho dos anéis de crescimento (Fonti & García-González 2004 e Fonti *et al.* 2007).

García-González e Fonti (2008) realizaram um trabalho para determinar qual a melhor estratégia de coleta de dados para a elaboração de cronologias de vasos. Para isso os autores analisaram os vasos de duas espécies com anel poroso, *Quercus petrea* e *Castanea sativa*. Os autores verificaram que quão menor a área de amostragem, e conseqüentemente o número de vasos medidos, menor o sinal comum obtido entre as árvores. Também verificaram que utilizar dois raios por árvore, combinados, aumenta a intercorrelação entre as séries. Utilizando essas estratégias, os autores foram capazes de construir cronologias de vasos com intercorrelações próximas às encontradas em cronologias de anéis de crescimento.

No caso do presente estudo, os valores de intercorrelação das cronologias das áreas de vaso poderiam ter valores superiores aos encontrados, caso algumas das

sugestões de amostragem propostas por García-González e Fonti (2008) fossem adotadas. Porém o planejamento do trabalho com *Hymenaea sp.* ocorreu anteriormente ao acesso a estas informações. Apesar disso, os próprios autores ressaltam que não haveria grandes diferenças nos sinais registrados pelas cronologias mais elaboradas, e que estes provavelmente seriam apenas mais fortes.

Fonti e García-González (2004) comentam que o uso das cronologias de áreas de vaso somente é interessante se de fato elas possuírem um sinal climático diferente do encontrados utilizando a dendrocronologia tradicional, baseada nas larguras de anéis de crescimento, diferença esta encontrada nas duas espécies de *Hymenaea* estudadas.

Os resultados das cronologias tradicionais indicam que o crescimento *H. courbaril* responde mais ao comprimento da estação chuvosa, já que a quantidade de chuva no início e no meio da estação não o influenciam. Porém para *H. stigonocarpa*, as chuvas logo antes do início da estação de crescimento determinam o quanto a planta irá crescer, provavelmente, pois a espécie é muito mais sensível ao período de seca no qual as demandas evaporativas são maiores. Essa hipótese é corroborada pela influência negativa da temperatura no mesmo período, o que ocasiona um maior estresse hídrico na planta por conta da evapo-transpiração.

Rossato *et al.* (2009a) encontraram resultados semelhantes ao estudarem 12 gêneros que co-ocorriam tanto na região de mata quanto de cerrado, entre os quais estavam *H. stigonocarpa* (cerrado) e *H. martiana* (mata). De uma maneira geral, as espécies de mata cresciam por um período maior, chegando a apresentar crescimento mesmo durante o início da estação seca, enquanto que as espécies de cerrado cresciam por um período mais curto, cessando o crescimento antes do final da estação de crescimento. Os autores explicam que essa diferença de crescimento pode ser resultado de uma mudança de alocação de matéria no meio da estação de crescimento das espécies do cerrado, passando das partes aéreas para as subterrâneas. Isso provavelmente deve-se ao fato de as espécies de cerrado necessitarem de raízes mais profundas por conta da localização do lençol freático neste ambiente (Hoffmann e Franco 2003 e Hoffmann *et al.* 2004).

Estas características das plantas de mata e de cerrado também podem explicar as diferenças encontradas nos sinais climáticos registrados nas áreas de vaso do lenho inicial.

Para compreender os resultados das funções resposta das áreas de vaso, é importante ter em mente que os vasos são resultado do equilíbrio entre a eficiência e a segurança na condução hidráulica (Zimmermann 1983), portanto vasos de menor calibre privilegiam a segurança, enquanto os de maior calibre são mais eficientes.

As funções de resposta mostraram que as altas precipitações no meio da estação de crescimento permitem que *H. courbaril* possa investir mais em eficiência da condução, produzindo vasos maiores. Porém altas temperaturas no período de seca imediatamente anterior ao início da estação de crescimento devem aumentar o estresse hídrico, provavelmente por diminuição no nível de reserva de água do solo, levando a produção de vasos menores na estação de crescimento.

Esse esgotamento de água do solo não é comum no cerrado, já que as espécies arbóreas deste ambiente possuem raízes profundas em contato constante com o lençol freático (Hoffmann e Franco 2003 e Hoffmann *et al.* 2004). Os próprios resultados das funções de resposta de área de vaso do lenho inicial correlacionadas com as temperaturas corroboram as informações apresentadas, pois as maiores correlações (negativas) ocorrem no período do início da estação de crescimento, que já é um período em que chove bastante, e não na estação seca como ocorrem com *H. courbaril*.

Se o solo não é o fator limitante de estresse hídrico no cerrado, as condições de irradiação e temperatura locais são maiores neste ambiente (Meinzer *et al.* 1999), e fazem com que a demanda por evapotranspiração limite o tamanho dos vasos em *H. stigonocarpa*. Essa hipótese também pode explicar uma menor média geral de áreas de vaso no jatobá de cerrado.

Juntamente com as influências do clima da estação corrente sobre o crescimento e a dimensão dos vasos, houve influências da estação imediatamente anterior. Esse resultado é mais difícil de ser compreendido, mas existem três possíveis explicações:

A primeira corresponde ao estoque de água no solo. A água de um período de chuva pode ser mais do que o suficiente para que toda a vegetação se abasteça, sobrando um estoque no solo. Rawitscher *et al.* (1943) conseguiram determinar que no solo do cerrado de Emas (Piraçununga/SP) existe água utilizável pelas plantas suficiente para abastecer três anos de demanda. Então, um ano que chove muito pode abastecer o solo por muito tempo, tendo grande influência no crescimento futuro.

Outra explicação refere-se à própria arquitetura hidráulica dos anéis de crescimento. A porção condutora do caule não consiste apenas no último anel de crescimento. Umebayashi *et al.* (2008) mostrou que, em várias espécies de angiospermas temperadas, muitos anéis de crescimento conduzem a água. Não somente os diferentes anéis conduzem como existe comunicações entre os vasos de anéis distintos (Kitin *et al.* 2004), sendo inegável a influência de anéis formados anteriormente sobre os que estão se formando.

A terceira e última explicação é o fato de que a planta armazena reserva durante o crescimento e a quantidade desta pode, em teoria, ser modulada pelo clima, sendo que se ela for mobilizada em momentos futuros (Barbaroux e Breda 2002), possivelmente “carregará” consigo um sinal climático do ano em que foi formada.

Apesar de todas serem possíveis, o estoque de água no solo é muito plausível para o presente trabalho, principalmente para a espécie de cerrado. Os resultados das análises de áreas de vaso indicam que possivelmente também existe uma influência das características apresentadas da arquitetura hidráulica do lenho. Já sobre o armazenamento de reservas, apesar de ser provável, não há elementos no presente trabalho que sustentem sua existência.

Ao conhecer bem as relações das espécies estudadas com o ambiente, é possível inferir o que poderá ocorrer com elas no futuro com as previsões climáticas realizadas pelo seguintes autores: Vera *et al.* (2006), Marengo *et al.* (2009), Nuñez *et al.* (2009) e Cabré e Nuñez (2010).

Vera *et al.* 2006 mostram que, de 2070 a 2099, pode ocorrer um aumento da precipitação anual, porém com uma redução no período do inverno e a temperatura média também irá aumentar na região. Os resultados obtidos por Marengo *et al.* (2009) são semelhantes para o período de 2071 a 2100, mostrando um aumento da ocorrência de noites quentes e redução das frias. Em relação à precipitação, ocorrerá um aumento da frequência e intensidade de chuvas extremas, maior no cenário A2, e neste mesmo cenário o número de dias de seca irá aumentar.

Nunes *et al.* 2009 verificaram que existem poucas diferenças entre os cenários A2 e B2 no período de 2081 a 2090, quando poderá ocorrer um aumento da temperatura da superfície, com mudança em todas as estações do ano. No cenário A2 o pico de

aumento da temperatura ocorre em setembro e no B2 em no mês de julho. Em relação à precipitação, no cenário A2 ocorrerá condições mais secas nos meses de março, abril e maio. Nos dois cenários, houve uma redução dos dias de chuva, mas um aumento da intensidade durante o período de setembro a fevereiro. Cabré et al 2010 também encontraram um aumento na temperatura média, e no cenário A2, um aumento nas precipitações de dezembro, janeiro e fevereiro e uma diminuição em junho julho e agosto.

Com esse dados da literatura e com os resultados das funções de resposta de *Hymenaea* spp. pode-se esperar que em relação à temperatura, tanto o crescimento radial, quanto o calibre dos vasos das duas espécies serão reduzidos, por conta do estresse hídrico produzido pelo aumento da temperatura.

Um efeito negativo no crescimento das duas espécies também poderá ocorrer com a diminuição da precipitação tanto em abril, que tem grande influência em *H. courbaril*, quanto em agosto para *H. stigonocarpa*. Porém, é possível que *H. courbaril* seja mais prejudicado pois, aparentemente, o crescimento está mais relacionado ao comprimento da estação de chuva que tenderá a ser menor. *H. stigonocarpa* tem a vantagem de estar em um ambiente em que a disponibilidade de água no solo não é necessariamente limitante, sofrendo, possivelmente, um efeito menor.

A precipitação terá um efeito positivo nas áreas de vaso do lenho inicial de *H. courbaril*, devido ao aumento previsto da precipitação de dezembro, e no caso de *H. stigonocarpa*, é mais complicado realizar qualquer previsão.

Estes efeitos do clima são especulativos e demandam a construção futura de modelos de crescimento e área de vaso para que as previsões sejam mais refinadas.

5. Conclusão

Com as análises realizadas neste trabalho foi possível comprovar a anualidade dos anéis de crescimento de *H. stigonocarpa*. Além da anualidade, cada uma das espécies (*H. courbaril* e *H. stigonocarpa*) mostrou grande potencial para a realização de estudos dendroclimatológicos.

As análises que utilizaram os vasos também produziram bons resultados, contendo sinais climáticos diferentes dos obtidos com os anéis de crescimento, o que

sustenta o seu uso em paralelo com as cronologias tradicionais baseadas na largura dos anéis. As diferenças entre os sinais obtidos em cada uma das abordagens sugerem que os anéis de crescimento e os vasos sofrem, ao menos em parte, influências ambientais diferentes.

Essas respostas aos parâmetros climáticos obtidas com as duas abordagens mostram que as espécies possuem particularidades bem definidas de desenvolvimento por uma demanda ambiental local diferente, mesmo sob influência de um mesmo macro-clima.

Utilizando estas respostas climáticas e os dados de previsão das mudanças do clima regional presentes na literatura permitem especular que ambas as espécies poderão ser prejudicadas com as mudanças, e que *H. courbaril* sentirá mais os seus efeitos.

6. Bibliografia

- Barbaroux C. & Bréda N., 2002, Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem Wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology*, 22, 1201-1210
- Cabré M.F., Solman S.A. & Nuñez M.N., 2010, Creating regional climate change scenarios over southern South America for the 2020's and 2050's using the pattern scaling technique: validity and limitations. *Climate Change*, 98, 449-469
- Cook, E. & Kairiukstis L., 1990, Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences. Springer.
- Cook, E.R. & Holmes R.L., 1996, Guide for computer program ARSTAN. Pages 75-87 in H. D. Grissino-Mayer, R. L. Holmes, and H. C. Fritts, editors. The international tree-ring data bank program library version 2.0 user's manual. University of Arizona, Tucson, Arizona, U.S.A.
- Fonti P. & García-González I., 2004, Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. *New Phytologist*, 163, 77-86
- Fonti P., Solomonoff N. & García-González I., 2007, Earlywood vessels of *Castanea sativa* record temperature before their formation. *New Phytologist*, 173, 562-570

- Fonti P., Arx G., García-Gonzalez I., Eilmann B., Sass-Klaassen U., Gärtner H. & Eckstein D., 2010, Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist*, 185, 42-53
- García-González I. & Fonti P., 2008, Ensuring a representative sample of earlywood vessels for dendroecological studies: an example from two ring-porous species. *Trees*, 22, 237-244
- Graaf N.A. & Baas P., 1974, Wood anatomical variation in relation to latitude and altitude, *BLUMEA*, 22, 101-121
- Hoffmann W.A. & Franco A.C., 2003, Comparative growth analysis of tropical forest and savanna woody plants using phylogenetically independent contrasts, *Journal of Ecology*, 91, 475-484
- Hoffmann W.A., Orthen B. & Franco A.C., 2004, Constraints to seedling success of savanna and forest trees across the savanna-forest boundary. *Oecologia*, 140, 252-260
- Holmes R.L., 1983, Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*, 43, 69-78
- IPCC, 2000, Special Reports Emission Scenarios – Summary for Policy Makers, Nakicenovic N., Davidson O., Davis G., Grübler A. Kram T., Rovere E.L.L., Metz B., Morita T., Pepper W., Pfücher H., Sankovski A., Shukla P., Robert S., Watson R & Dadi Z.
- Marengo J.A., Jones R., Alvez L.M. & Valverde M.C., 2009, Future of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system, *International Journal of Climatology*, 30, 1-15
- Meinzer F.C., Goldstein G., Franco A.C., Bustamante M., Iglar E., Jackson P., Caldas L. & Rundel W., 1999, Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species, *Functional Ecology*, 13, 273-282
- Noshiro S. & BAAS P., 2000, Latitudinal trends in wood anatomy within species and genera: case study in *Cornus* S. L. (Cornaceae). *American Journal of Botany*, 87, 1495–1506

- Noshiro S., Suzuki M & Ohba H., 1995, Ecological wood anatomy of Nepalese *Rhododendron* (Ericaceae). 1. Interspecific variation. *Journal of Plant Research*, 108, 1–9
- Núñez M.N., Soman S.A. & Cabré M.F., 2009, Regional climate change experiments over southern South America. II: Climate change scenarios in the late twenty-first century. *Climate Dynamics*, 32, 1081-1095
- Oever L., Bass P. & Zandee M., 1981, Comparative wood anatomy of *Symplocos* and latitude and altitude of provenance, *IAWA Bulletin*, 2(1), 3-24
- Rawitscher F., Ferri M.G. & Rachid M., 1943, Profundidade dos solos e vegetação em campos cerrados do Brasil Meridional. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, T 15, n°4
- Roig, F.A., 1986, The wood of *Adesmia horrida* and its modifications by climatic conditions. *Iawa Bulletin*, 7(2): 129-135.
- Rossato D.R., Hoffmann W.A. & Franco A.C., 2009, Differences in growth patterns between co-occurring Forest and savanna trees affect the forest-savanna boundary. *Functional Ecology*, 23, 689-698
- Schweingruber F.H., 1996, Tree rings and environment dendroecology, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt, 609 pg.
- Sokal, R.R. & F.J. Rohlf. 1981. Biometry - The principles and practice of statistics in biological research. W.H. Freeman, New York.
- Tardiff J.C. & Conciatori F., 2006, Influence of climate on tree rings and vessel features in red oak and white oak growing near northern distribution limit, southwestern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Forestry Research*, 36, 2317-2330
- Umebayashi T., Utsumi Y., Koga S., Inoue S., Fujikawa S., Arakawa K., Matsumura J. & Oda K., 2008, Conducting pathways in north temperate deciduous broadleaved trees. *IAWA Journal*, 29 (3), 247-264

- Vera C., Silvestri G., Liebmann B. & González P., 2006, Climate change scenarios for precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research Letters*, 33, 1-4
- Verheyden A., Ridder F.D., Chmitz N., Beeckman H. & Koedam N., 2005, High-resolution time series of vessel density in Kenyan mangrove trees reveal a link with climate. *New Phytologist*, 167, 425-435
- Westbrook J.A., Guilderson T.P. & Colinvaux, 2006, Annual growth rings in a sample of *Hymenaea courbaril*. *IAWA Journal*, 27(2), 193-197
- Wigley T.M.L., Briffa K.R. & Jones P.D., 1984, On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 201-213
- Zimmermann, M.H. 1983 Xylem structure and the ascent of sap. Springer-Verlag, New York

Isótopos estáveis de carbono e eficiência intrínseca no uso da água de duas espécies tropicais do gênero *Hymenaea* (LEGUMINOSAE), e suas implicações ecológicasGiuliano Maselli Locosselli¹ & Gregório Ceccantini¹¹ Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil**Resumo**

A elevação das concentrações atmosféricas de CO₂ pode estar influenciando o metabolismo e conseqüentemente o crescimento das plantas. Apesar disso, existem poucas evidências observáveis nos anéis de crescimento decorrentes do enriquecimento atmosféricos de CO₂. A análise dos isótopos estáveis de carbono é uma abordagem que está produzindo resultados importantes na compreensão de como o CO₂ atmosférico está influenciando as plantas. Este trabalho tem como objetivo analisar as possíveis influências da elevação da concentração CO₂, nas últimas cinco décadas, em duas espécies de jatobá, uma de cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) e uma de mata (*Hymenaea courbaril*) presentes em um mosaico. Para isso foram obtidas amostras de α -celulose dos anéis de crescimento, previamente datados por métodos dendrocronológicos, de dois indivíduos de cada espécie, que foram submetidas à análise de $\delta^{13}\text{C}$. Com esses dados foram realizadas correlações com o clima, e calculados os valores de eficiência intrínseca do uso da água (W_i). As duas espécies mostraram tendências de diminuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ ao longo dos anos, e *H. stigonocarpa* obteve os menores valores absolutos de $\delta^{13}\text{C}$. Essa espécie também obteve os menores valores de W_i , apesar de eles aumentarem gradualmente ao longo dos anos, tendência não encontrada em *H. courbaril*. Os resultados indicam que as espécies estão sob demandas ambientais e influências filogenéticas diferentes, e que, portanto, possuem soluções fisiológicas distintas. Ainda, o jatobá de cerrado parece ser uma espécie mais indicada para estudos dos efeitos do CO₂, principalmente em análises dendrocronológicas.

Palavras-chaves: isótopos de carbono, *Hymenaea* spp., mata semi-descídua, cerrado, eficiência intrínseca no uso da água.

1. Introdução

A composição dos gases atmosféricos está mudando nos últimos séculos conforme mostram os registros das bolhas de ar presas no gelo da Antártida (Neftel *et al.* 1985) e os dados de plataformas de coleta de dados como a presente em Mauna Loa no Havaí (Keeling *et al.* 1995). Esses registros mostram um claro enriquecimento do CO₂ atmosférico. Essa elevação se tornou evidente a partir da revolução industrial, com um aumento expressivo nas taxas de emissões após a década de 1950. A elevação da concentração atmosférica tem implicações potenciais sobre os seres vivos, em especial as plantas que estão intimamente relacionadas ao CO₂ através dos processos fotossintéticos.

Os efeitos do aumento do CO₂ atmosférico sobre as plantas são registrados em muitos experimentos controlados, como os de câmaras de topo aberto e os conduzidos em sistemas FACE (“Free Air CO₂ Enrichment”). Nos experimentos realizados em câmaras de topo aberto, em geral conduzidos com plântulas, foram encontradas respostas comuns nas plantas, que mostram um aumento nas taxas de fotossíntese das espécies e ausência de mudanças significativas na respiração. Nos espécimens que estavam em fase de crescimento exponencial, houve um aumento considerável do índice de área foliar. A razão raiz/parte aérea tendeu a aumentar com o aumento da produção de raízes delgadas e a concentração de nitrogênio nas folhas tendeu a diminuir (Norby *et al.* 1999).

Além das plântulas, também existem evidências claras de que as plantas maduras podem responder à elevação de CO₂ em ambiente natural, como visto em experimentos realizados com o sistema FACE. Ainsworth & Long (2005) realizaram um trabalho de meta-análise e encontraram um aumento médio de 31% na taxa fotossintética de folhas foto-saturadas, de 28% na assimilação diurna de carbono e uma diminuição de 20% na condutância estomática, sendo esta última mais expressiva nos estudos que expuseram as plantas também a condições de estresse de nitrogênio e água. A diminuição na condutância estomática (g_s) em alguns casos é acompanhada de uma redução da densidade de estômatos (Ainsworth & Rogers 2007).

Como grande parte dos efeitos anteriormente descritos está envolvido com o metabolismo do carbono, existe a possibilidade que estas influências do CO₂ sejam registradas nos anéis de crescimento, que são formados principalmente por carbono

estrutural. Entretanto, apesar daqueles resultados favoráveis, não existem evidências dendrocronológicas concretas de um efeito da elevação do CO₂ sobre o crescimento das plantas (Jacoby & D'Arrigo 1997, Huang *et al.* 2008).

Schweingruber (1996) sugere que existem algumas razões para a ausência destas evidências: 1) a dificuldade de separar os efeitos de fertilização ocasionados por CO₂ e NO_x; 2) períodos de supressão e liberação de crescimento devido à competição por recursos pode dificultar a interpretação; 3) ainda não se sabe qual é o tipo de ambiente no qual as plantas respondem melhor ao CO₂; 4) uso de equações de suavização de tendências pode mascarar sinais de baixa frequência, como o possível efeito do CO₂; 5) dificuldade em desacoplar os efeitos do clima dos causados pelo aumento de CO₂.

Uma abordagem que pode ajudar a compreender os efeitos da elevação das concentrações atmosféricas de CO₂ sobre as plantas consiste na análise isotópica dos anéis de crescimento, em especial os isótopos estáveis de carbono. Esses são amplamente utilizados em estudos dendrocronológicos através da análise da relação que existe entre: ¹³C e ¹²C.

Estes isótopos estáveis possuem uma íntima relação com as plantas, em especial com as que possuem a fotossíntese do tipo C3. Essas plantas são capazes de discriminar os isótopos de carbono através de dois processos de fracionamento (McCarroll & Loader 2004). O primeiro processo ocorre no momento da difusão do gás através da abertura estomática, o que acaba privilegiando o ¹²C, que é o isótopo mais leve. O outro processo de fracionamento ocorre durante a fotossíntese no qual o carbono é fixado pela enzima RUBISCO, que possui uma preferência pelo isótopo mais leve (¹²C), realizando o segundo processo de fracionamento (Marino & McElroy 1991).

Esses processos de fracionamento resultam em uma diminuição do valor do δ¹³C dos produtos fotossintéticos (em plantas C3 entre -20‰ e -30‰) em relação ao valor médio atmosférico (-8‰) (MacCarrow e Loader 2004).

Ao analisar os registros históricos de δ¹³C atmosférico é possível perceber que o seu valor não é estável ao longo do tempo, mas possui uma tendência de diminuição no último século, com uma intensificação nos últimos 50 anos (Friedli *et al.* 1986).

Esse fenômeno se deve à liberação de carbono na atmosfera, proveniente da queima de combustíveis fósseis formados a partir do soterramento das florestas de

pteridófitas do Carbonífero. Como essas plantas possuíam fotossíntese do tipo C3 que privilegia o carbono mais leve, o carbono armazenado nos tecidos era enriquecida de isótopo ^{12}C , conforme motivos elucidados anteriormente. Como resultado, os combustíveis fósseis são compostos de uma proporção significativamente maior de ^{12}C , e ao liberar esse carbono, por intermédio da queima, a atmosfera é enriquecida com o isótopo mais leve, resultando em uma diminuição do valor do $\delta^{13}\text{C}$ (Keeling *et al.* 1995).

Além do sinal de aumento das concentrações de CO_2 atmosférico, as séries de $\delta^{13}\text{C}$ registram influências climáticas de temperatura e precipitação, que podem ser diferentes das encontradas nos anéis de crescimento (Andreu *et al.* 2008, Ferrio *et al.* 2003, Guo & Xie 2006, Kirilyanov *et al.* 2008 e Levanic *et al.* 2008).

Também é possível calcular, a partir dos dados de $\delta^{13}\text{C}$, a eficiência intrínseca no uso da água pela planta. Muitos trabalhos mostram que a eficiência no uso da água está aumentando principalmente após a década de 50, acompanhando as taxas de elevação da concentração atmosférica de CO_2 (Bert *et al.* 1997, Feng 1999, Hielitz *et al.* 2005 e Silva *et al.* 2009).

O presente trabalho tem como objetivo analisar a assinatura isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ presente nos anéis de crescimento de duas espécies de jatobá presentes em um mosaico vegetacional, sendo *Hymenaea courbaril* L. uma espécie de mata semi-decídua e matas ciliares, e *Hymenaea stigonocarpa* Mart ex. Hayne uma espécie típica de cerrado, além de verificar os determinantes climáticos do $\delta^{13}\text{C}$ e as diferenças na eficiência intrínseca no uso da água.

2. Material e Métodos

2.1. Coleta

Foram coletadas, do tronco principal, 12 amostras de *Hymenaea stigonocarpa* e 11 amostras de *Hymenaea courbaril*, sendo parte delas compostas por discos e parte por baquetas obtidas com o uso de trado motorizado. O local de coleta está situado no município de Matozinhos/MG no Brasil (S 19°27'28" , W 43°57'43") a uma altitude de 792m. A região é de grande interesse, pois ocorre um contato entre duas formações

vegetais, o cerrado e a mata semi-descídua, o que permite realizar análises entre as espécies e entre as demandas de cada ambiente, já que o macro-clima é constante.

A região possui uma temperatura média de 21.8 °C e uma precipitação anual de 1310mm, dados obtidos na plataforma de coleta do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

2.2. Amostras para isótopos

Foram construídas duas cronologias de anéis de crescimento, utilizando métodos tradicionais de dendrocronologia (Stokes & Smiles 1996), uma para cada espécie, compostas de 10 indivíduos cada (Locosselli & Ceccantini, em preparação). Os valores de intercorrelação e sensibilidade das cronologias obtidas foram respectivamente: 0.34 e 0.50 para *H. courbaril* e 0.39 e 0.60 para *H. stigonocarpa*. A partir da datação e construção das cronologias de anéis de crescimento a amostragem de isótopos foi realizada.

Para a construção das cronologias isotópicas foram escolhidos discos de dois indivíduos de cada espécie, seguindo os seguintes critérios: 1) o indivíduo precisava ter anéis suficientemente largos (acima de 0,5mm) para que a obtenção da amostra de madeira fosse possível; 2) entre esses, escolheram-se as árvores que possuíam o raio com a melhor correlação com a série média de largura do anel de crescimento criada pelo software COFECHA (Holmes 1983). Esse último critério permite que, em teoria, esteja sendo analisada uma porção da árvore que sofreu influências semelhantes à média de todas as outras árvores.

A coleta seguiu a seguinte estratégia: o primeiro anel coletado foi o correspondente ao ano de 2005 e prosseguiu-se a coleta de um ano sim e outro não até o ano de 1923 (quando possível), que corresponde ao período que se dispõe de dados climáticos (sendo esta, uma coleta mais minuciosa que permite ver as variações anuais do $\delta^{13}\text{C}$, que podem ter correlação com os parâmetros climáticos). A partir desse período foram coletados blocos de cinco anos até o conjunto mais antigo de anéis de crescimento (que é uma coleta mais grosseira que privilegia possíveis variações dentro de décadas, que podem corresponder ao $\delta^{13}\text{C}$ atmosférico) (Tabela 01).

Para a obtenção da amostra da madeira do anel de crescimento, foram utilizadas micro fresas e brocas para trabalhos de joalheria conectadas a uma caneta com motor elétrico. Com o uso dessas ferramentas cavaram-se pequenas fendas dentro do anel de

interesse o que produzia um pó fino de madeira, que era ideal para ser utilizado na extração de α -celulose e posterior análise isotópica.

Tabela 01: Indivíduos utilizadas para análise de $\delta^{13}\text{C}$, idade de cada um, número de amostras coletadas a cada dois anos e número de amostras coletadas em blocos de 5 anos.

indivíduo	espécie	idade	n° de amostras anuais ¹	n° de amostras, blocos de 5 anos ²
SPFw2777	<i>H. stignonocarpa</i>	144	33	13
GC3189	<i>H. stignonocarpa</i>	58	26	-
GC3163	<i>H. courbaril</i>	50	25	-
SPFw2771	<i>H. courbaril</i>	50	24	-

¹coletado um ano sim outro não. ²blocos consecutivos de 5 anos.

O método utilizado para a extração de celulose foi o proposto por Brendel *et al.* (2000) modificado por Gaudinski *et al.* (2005). As únicas alterações realizadas no presente trabalho foram o uso de ácido nítrico 65%, e na fervura, que foi realizada na autoclave para produzir uma temperatura constante e homogênea.

As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear para Agricultura da USP-Esalq, por espectrometria de Massas de Razão Isotópica em Fluxo Contínuo (Barrie & Prosser 1996).

2.3. Análise dos dados

Os dados foram plotados em gráficos de $\delta^{13}\text{C}$ por ano e as tendências de baixa frequência (ao longo das décadas) foram analisadas visualmente e por meio de regressões lineares.

Em seguida, nas análises das tendências de alta frequência (variações anuais), para conhecer quais variáveis climáticas influenciam o $\delta^{13}\text{C}$ da celulose, foram utilizados apenas os dados correspondentes a amostragem realizada bienalmente. Como existia uma tendência de diminuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ ao longo dos anos nas quatro séries, foi necessário retirá-la para uma análise mais eficaz das influências climáticas. Isso foi obtido com a construção de modelos lineares para cada indivíduo, e desses modelos foram obtidos os resíduos que correspondem à porção dos dados a que a reta ajustada não explica (Charnet *et al.* 2008), e que, portanto, deve ser explicado por outras variáveis, como as climáticas por exemplo.

A correspondência entre as séries residuais dos indivíduos por espécie foi analisada por meio do cálculo do GLK (Schweingruber 1988). Esse índice é calculado da seguinte maneira: quando os valores das duas cronologias crescem ou decrescem simultaneamente em um ponto, atribui-se o valor 1, quando uma cresce ou decresce e a outra se mantém estável, atribui-se o valor 0, e quando uma cresce e a outra decresce, atribui-se o valor -1. O GLK consiste na média aritmética dos valores atribuídos, e quando o índice é igual a 1, a correspondência é total, e quando ele é igual a -1, inexistente correspondência.

Para conhecer quais parâmetros climáticos influenciam os isótopos estáveis de carbono dessas espécies, foram calculadas as médias dos resíduos por ano, e estas médias foram filtradas em uma análise de “out-liers”, para que esses pontos não influenciassem as análises subsequentes, e posteriormente foram construídas funções de resposta com os dados mensais de precipitação, temperatura máxima, temperatura média e temperatura mínima da estação de crescimento corrente e anterior. Os dados climáticos foram obtidos da estação de coleta de dados do INMET no município de Sete Lagoas/MG, distante à 40km do local de coleta.

Outra análise que pôde ser realizada com os dados de $\delta^{13}\text{C}$ foi o cálculo da eficiência intrínseca do uso da água (W_i), que é uma medida de absorção de carbono por perda de água. Esse cálculo foi realizado em cada um dos indivíduos independentemente. Para isso, além dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ obtidos na planta ($\delta^{13}\text{C}_p$) foi necessário obter os valores de $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C}_a$) e concentração de CO_2 (c_a) atmosféricos. McCarrow e Loader (2004) fornecem uma série histórica de dados de $\delta^{13}\text{C}$ e concentrações atmosféricas de CO_2 desde 1850 num artigo de revisão de isótopos em anéis de crescimento.

Com esses dados, foi possível calcular a eficiência intrínseca no uso da água utilizando as seguintes fórmulas:

-Cálculo da discriminação dos isótopos de carbono pela planta ($\Delta 13$) (Farquhar *et al.* 1989):

$$\Delta 13 = \frac{\delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C}_p}{1 + \frac{\delta^{13}\text{C}_p}{1000}}$$

-Cálculo da concentração de CO₂ no mesófilo da folha (c_i) (Feng 1998):

$$c_i = c_a \frac{\Delta 13 - a}{b - a}$$

na qual “a” é a discriminação por difusão no estômato e tem valor aproximado de -4.4‰, e “b” é a discriminação realizada pela enzima Rubisco com valor aproximado de -27‰.

-Cálculo da eficiência intrínseca do uso da água (W_i) (Feng 1999):

$$W_i = \frac{c_a - c_i}{1.6}$$

Com os valores calculados foi possível analisar as tendências de W_i, Δ13 e c_i ao longo das últimas cinco décadas, período no qual houve um aumento expressivo nas concentrações atmosféricas de CO₂.

Com o intuito de comparar as duas espécies em relação às variáveis: W_i, Δ13, c_i e δ¹³C, foram realizados testes não paramétricos de Wilcoxon (Sokal & Rohlf 1981).

3. Resultados

Os resultados obtidos no levantamento do δ¹³C das amostras das duas espécies de jatobá são apresentados nas figuras 38 e 39. Destas, a amostra de *H. stigonocarpa* número SPFW2777 é a que possui a série mais longa. Nesse indivíduo é possível perceber que os valores de δ¹³C diminuem numa taxa moderada desde a década de 1870 até a de 1950, e após esta década, os valores diminuem numa taxa maior. Essa última tendência é compartilhada por todas as amostras.

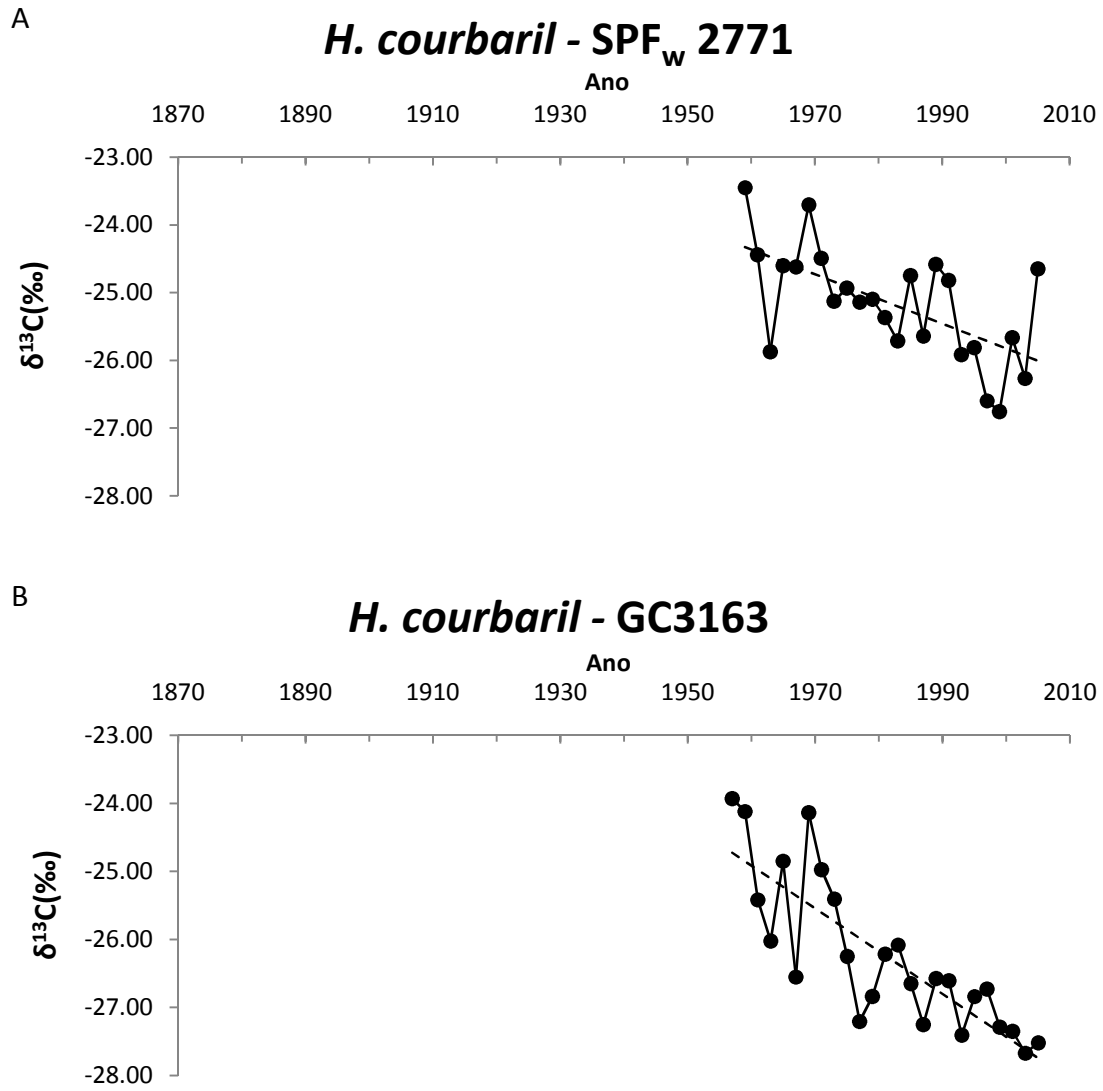


Figura 1: Dados de $\delta^{13}\text{C}$ por ano de dois indivíduos de *H. courbaril*. A linha tracejada indica a tendência linear dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ pelo tempo, A) $r^2=0.39$, $p=0.001$, B) $r^2=0.69$, $p<0.0001$.

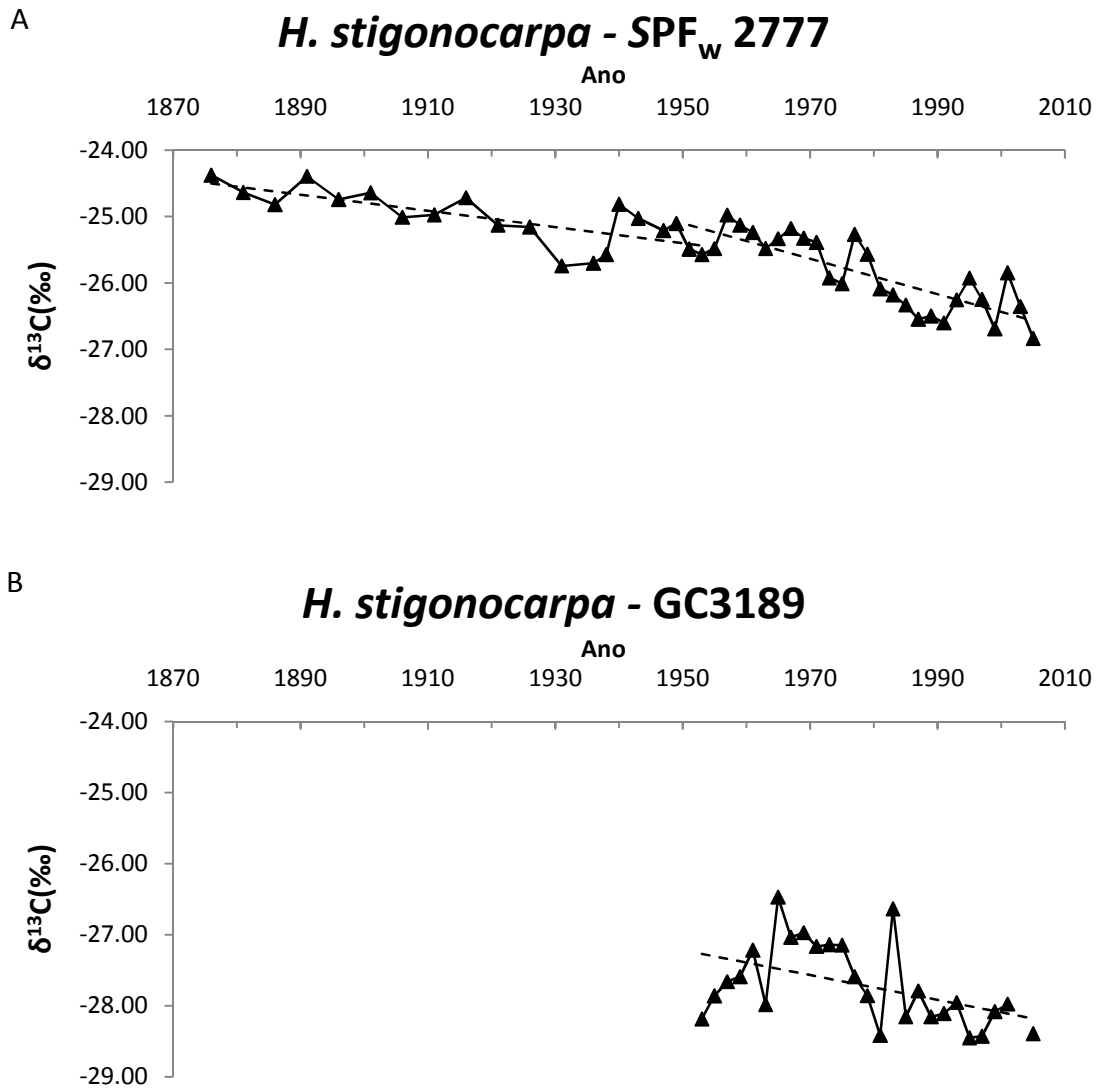


Figura 2: Dados de $\delta^{13}\text{C}$ por ano de dois indivíduos de *H. stigonocarpa*. A linha tracejada indica a tendência linear dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ pelo tempo, A) de 1870 a 1951, $r^2=0.51$, $p=0.0009$ e de 1951 a 2005, $r^2=0.69$, $p<0.0001$, B) $r^2=0.22$, $p=0.01$.

A partir das regressões lineares construídas desde a década de 1950 até 2005 (Figuras 38 e 39), foram obtidos os valores dos resíduos (Figura 40 e 41) que correspondem à variação dos dados sem a tendência de diminuição dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ no período.

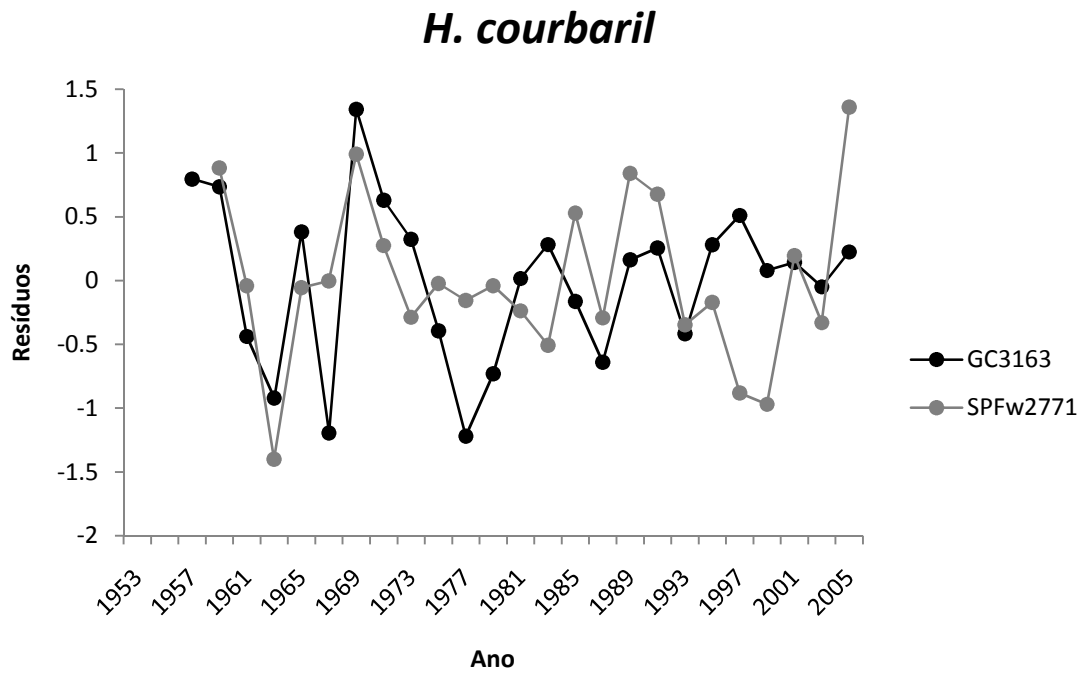


Figura 3: Resíduos da regressão linear de $\delta^{13}\text{C}$ por ano para dois indivíduos de *H. stigonocarpa*.

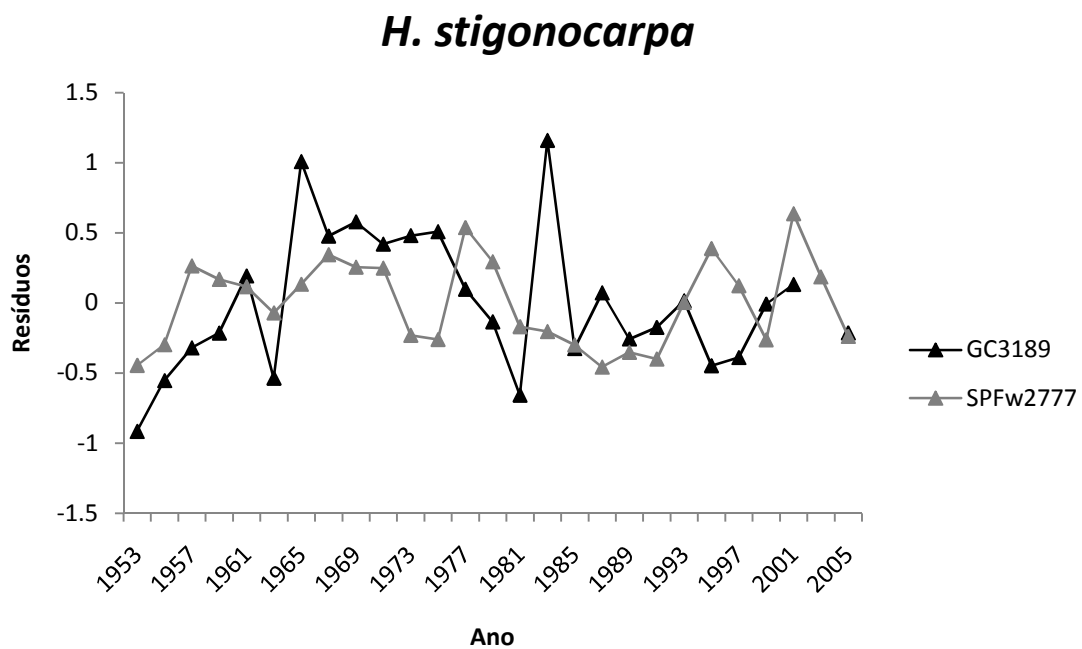


Figura 4: Resíduos da regressão linear de $\delta^{13}\text{C}$ por ano para dois indivíduos de *H. stigonocarpa*.

A correspondência por espécie entre as séries residuais individuais foram calculadas a partir do índice GLK. O índice calculado para *H. courbaril* possui valor

igual a 0.42, enquanto o calculado para *H. stigonocarpa* possui valor igual a -0.13. Para conhecer as influências dos parâmetros climáticos: precipitação mensal, temperaturas média, máxima e mínima mensais sobre a variação dos resíduos de $\delta^{13}\text{C}$ apresentadas foram construídas funções de resposta baseadas em correlações lineares (Figuras 5 e 6). As barras em cor cinza escuro mostram as correlações estatisticamente significativas.

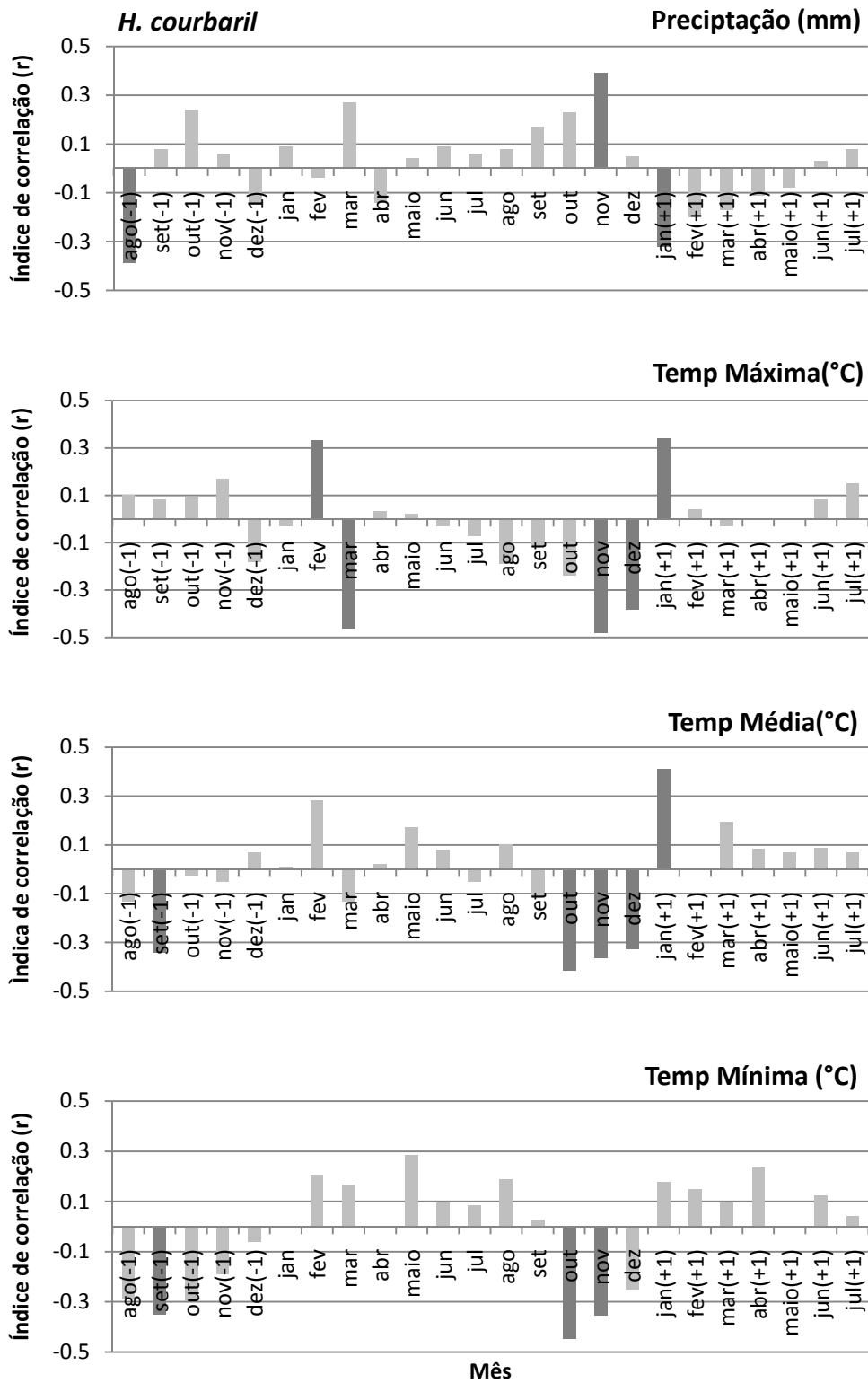


Figura 5: Gráficos de correlações mensais dos resíduos com dados climáticos para *H. courbaril*. Cinza escuro, correlação significativa para $\alpha=0.05$.

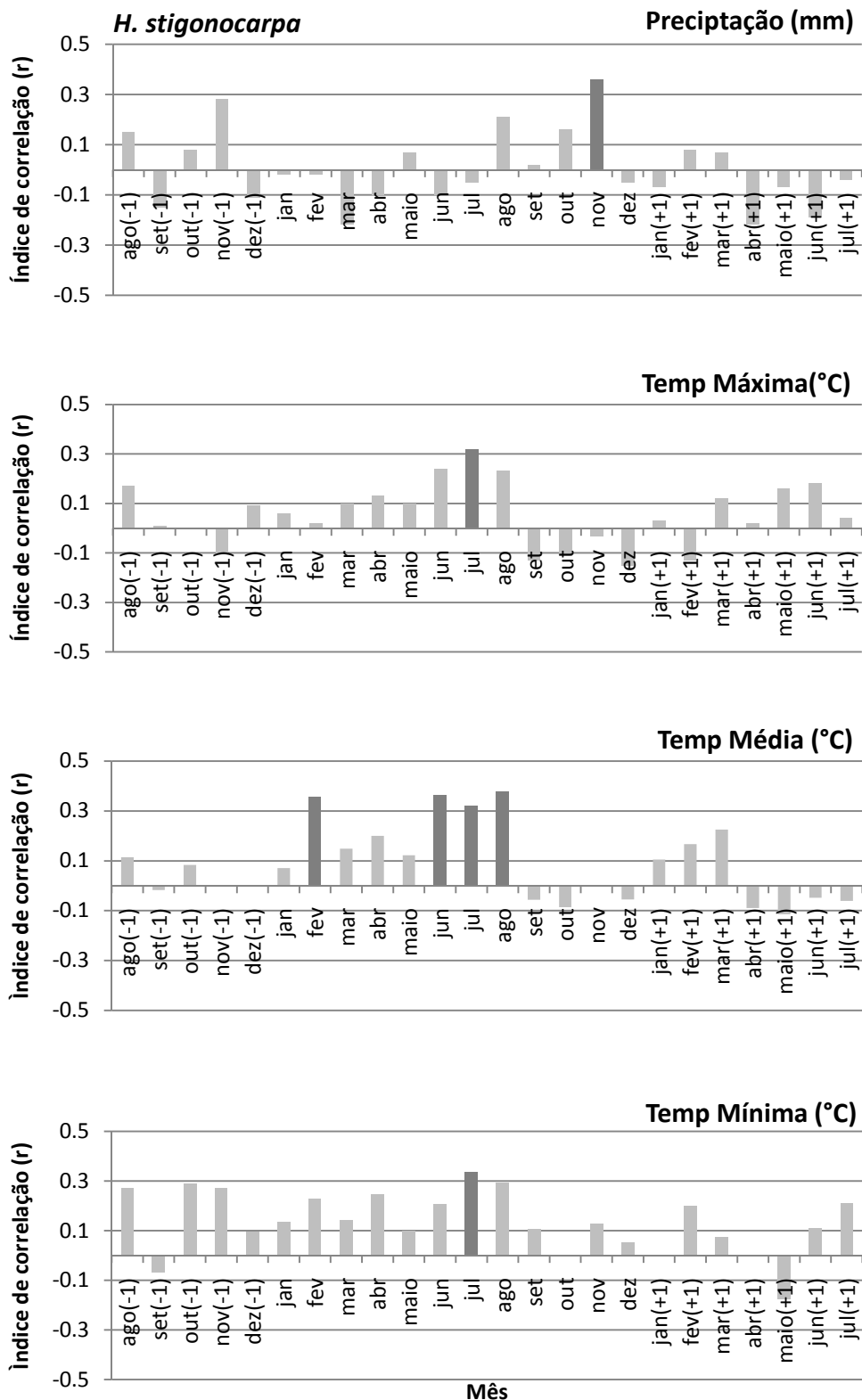


Figura 6: Gráficos de correlações mensais dos resíduos com dados climáticos para *H. stigonocarpa*. Cinza escuro, correlação significativa para $\alpha=0.05$.

Os isótopos estáveis de carbono presentes no lenho de *H. courbaril* (Figura 5) são influenciados pela precipitação e temperaturas do início e meio da estação de

crescimento corrente. A precipitação de novembro influencia positivamente o $\delta^{13}\text{C}$, enquanto a precipitação de janeiro influencia negativamente. O padrão de influência das temperaturas é o inverso da precipitação, com influências negativas em novembro e positivas em janeiro. Além da dependência climática da estação de crescimento corrente, existe uma influência da estação de crescimento imediatamente anterior.

Para os indivíduos de *H. stigonocarpa* (Figura 6), a influência da precipitação ocorre no início da estação de crescimento corrente (mês de novembro), sendo que a precipitação deste período modula positivamente o $\delta^{13}\text{C}$. As temperaturas também possuem uma influência positiva sobre os valores isotópicos, porém esta influência está concentrada no período de seca, correspondente aos meses de junho, julho e agosto. Em *H. stigonocarpa*, também foi encontrada uma correlação com a temperatura média da estação de crescimento imediatamente anterior, porém concentrada em apenas no mês de fevereiro.

Além das análises climáticas, também foi calculada, com os dados de $\delta^{13}\text{C}$, a discriminação do carbono (Δ^{13}), a concentração de carbono no mesofilo (c_i) e a eficiência intrínseca no uso da água (W_i). A primeira análise realizada foi a verificação da variação desses parâmetros ao longo do tempo para cada um dos indivíduos (Figuras 7 e 8).

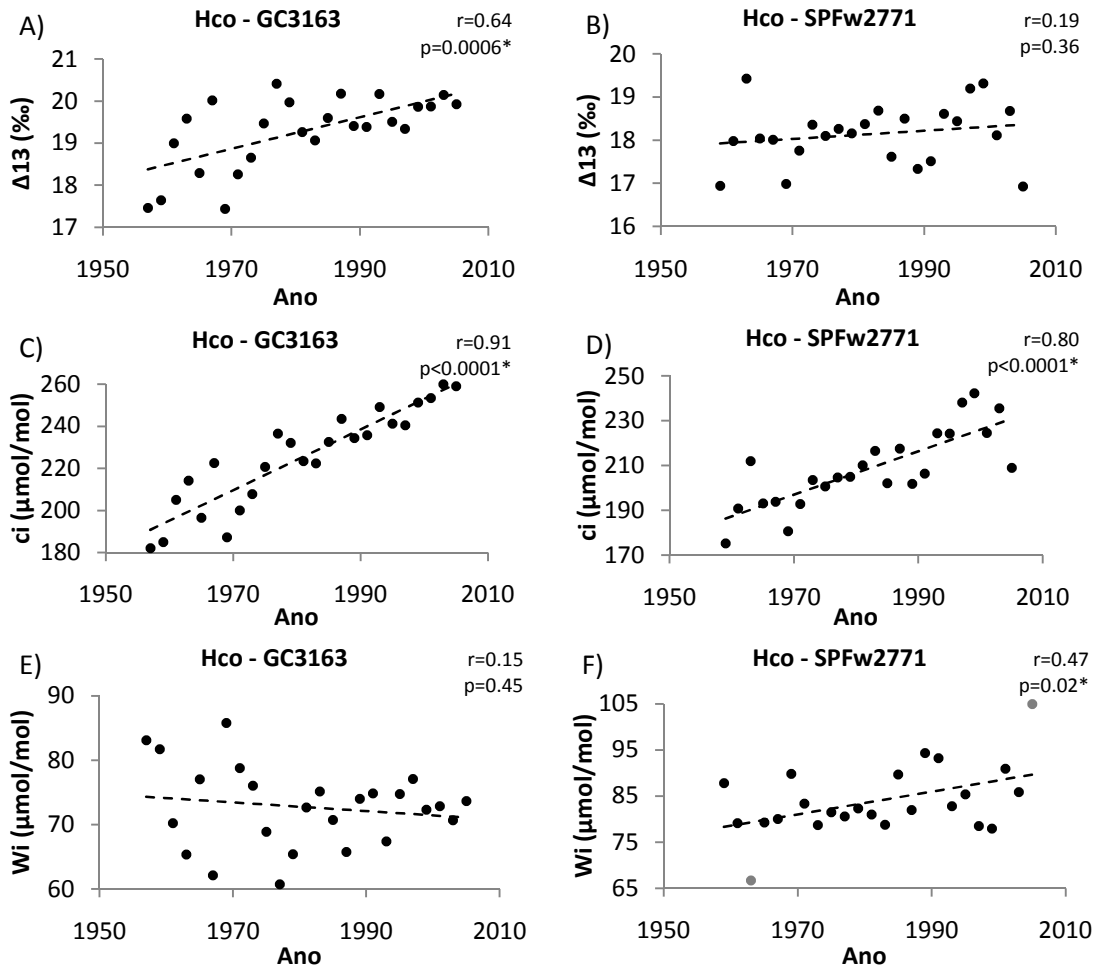


Figura 7: Valores calculados de discriminação de carbono ($\Delta 13$), concentração de CO_2 no mesofilo (c_i) e eficiência intrínseca no uso da água (W_i) em função do ano, para os dois indivíduos de *H. courbaril*, com respectivos valores de índice de correlação (r) e p. (*significativo para $\alpha=0.05$). No gráfico F), os pontos em cinza são os pontos extremos.

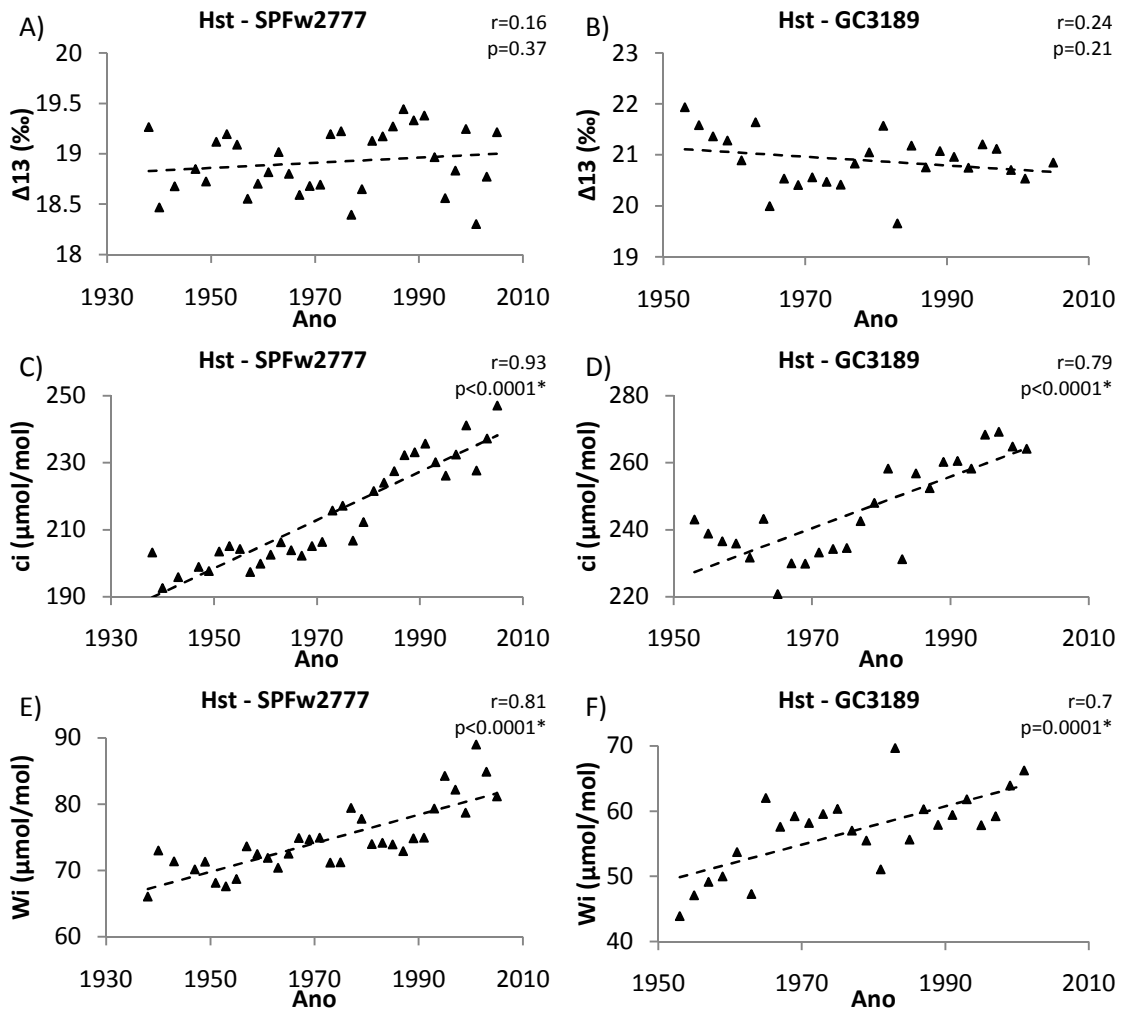


Figura 8: Valores calculados de discriminação de carbono (Δ^{13}), concentração de CO_2 no mesofilo (c_i) e eficiência intrínseca no uso da água (W_i) em função do ano, para os dois indivíduos de *H. stigonocarpa*, com respectivos valores de índice de correlação (r) e p . (*significativo para $\alpha=0.05$).

Dos quatro indivíduos analisados para o cálculo de discriminação de carbono (Δ^{13}), concentração de CO_2 no mesofilo (c_i) e eficiência intrínseca no uso da água (W_i), três não mostraram tendências significativas em função do tempo para a discriminação de carbono, mas obtiveram um aumento significativo ao longo do tempo em relação a concentração de dióxido de carbono no mesofilo e também na eficiência intrínseca. Desses indivíduos, o SPFw2771 possui dois pontos extremos (destacados em cinza), no gráfico de W_i por ano, que podem estar influenciando toda a tendência de variação dos dados ao longo dos anos. Quando estes pontos são retirados, a correlação linear não é mais significativa ($r=0.22$ e $p=0.309$), não persistindo assim a tendência positiva de W_i com o passar do tempo.

O indivíduo GC3163 de *H. courbaril* não mostrou tendências em função do tempo para essas duas últimas variáveis, porém foi observado um aumento da discriminação de carbono ao longo dos anos.

Além das tendências temporais das variáveis, foi realizada uma análise por espécie para saber como elas se diferenciam em relação aos parâmetros estudados (Tabela 2)

Tabela 2: Resultado dos testes de Wilcoxon para os valores de $\delta^{13}\text{C}$, de discriminação de carbono ($\Delta 13$), concentração de CO_2 no mesofilo (c_i) e eficiência intrínseca no uso da água (W_i) para as duas espécies com os respectivos valores de média e desvio padrão. (* estatisticamente significativo, $\alpha=0.05$)

	<i>H. courbaril</i>		<i>H. stigonocarpa</i>		Wilcoxon		
	Média	Des. Padrão	Média	Des. Padrão	χ^2	GL	p
$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	-25.71	1.11	-26.61	1.13	12.85	1	0.0003*
$\Delta 13(\text{‰})$	18.72	0.97	19.79	1.07	19.55	1	<0.0001*
$c_i(\mu\text{mol/mol})$	217.18	22	228.2	21.39	5.29	1	0.021*
$W_i(\mu\text{mol/mol})$	78.22	8.86	67.04	10.51	26.03	1	<0.0001*

Foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre as duas espécies para as quatro variáveis estudadas. Os indivíduos de *H. courbaril* possuem valores maiores de $\delta^{13}\text{C}$ e W_i , enquanto os indivíduos de *H. stigonocarpa* possuem valores maiores de $\Delta 13$ e c_i .

4. Discussão

Os isótopos de carbono encontrados nos tecidos vegetais, entre eles no lenho que foi o alvo do presente estudo, possuem uma assinatura que depende basicamente das características do CO_2 da fonte, que no caso corresponde à atmosfera, e aos dois processos de fracionamento que ocorrem durante o processo de fixação do carbono (Farquhar *et al.* 1982). Em alguns casos, os gases em contato com a superfície das folhas podem possuir uma composição distinta da encontrada na atmosfera, por conta das influências micro-ambientais. Francey (1981) não encontrou a tendência de diminuição dos valores, comumente encontrado na literatura, em um sistema florestal mais fechado. No presente trabalho existia a possibilidade de encontrar resultado semelhante ao de Francey (1981) nos indivíduos de *H. courbaril*, já que estes estavam em um sistema florestal mais fechado. Porém este resultado não foi encontrado, sendo

que as duas espécies mostraram possuir tendências no registro de $\delta^{13}\text{C}$ semelhantes às encontradas no $\delta^{13}\text{C}$ atmosférico. Provavelmente este resultado tenha sido encontrado, pois, *H. courbaril* é uma espécie emergente e que, portanto está acima do dossel da mata e em contato direto com a atmosfera.

Apesar das espécies possuírem um sinal de $\delta^{13}\text{C}$ semelhante ao atmosférico, todos os outros dados sugerem que as espécies possuem diferenças no metabolismo que provavelmente se devem a demandas ambientais e a características filogenéticas distintas.

A literatura mostra diferenças claras entre os ambientes de mata e de cerrado, inclusive entre as espécies arbóreas que os compõe. Em relação à mata, o cerrado se caracteriza por possuir uma maior irradiância e temperatura, que resultam em maior demanda evaporativa (Meinzer *et al.* 1999) ao passo que a mata possui uma densidade maior de indivíduos de espécies com copas mais densas, que podem demandar mais água do solo.

A profundidade do lençol freático também é diferente nos dois ambientes, sendo que no cerrado ele pode chegar a 18 metros de profundidade (Rawitscher *et al.* 1943), enquanto que na mata é mais superficial. Essa diferença de profundidade do lençol freático não quer dizer que a disponibilidade hídrica no cerrado é menor, ao contrário, existem fortes evidências que o cerrado é bem abastecido de água. A água de um período de chuva pode ser mais do que o suficiente para que toda a vegetação se abasteça, sobrando um estoque no solo. Rawitscher *et al.* (1943) conseguiram determinar que no solo do cerrado de Emas (Piraçununga/SP) existe água utilizável pelas plantas suficientes para abastecer três anos de demanda.

Além dos ambientes, as espécies estudadas também são muito diferentes. O jatobá de cerrado possui raízes mais profundas que estão em contato constante com o lençol freático (Hoffmann & Franco 2003 e Hoffmann *et al.* 2004), vasos de menor calibre (Locosselli & Ceccantini, em preparação) e menos estômatos, de dimensões maiores, que consequentemente possuem uma resposta mais lenta ao ambiente (Rossato *et al.* 2009b). E o jatobá de mata possui raízes mais superficiais (Hoffmann & Franco 2003 e Hoffmann *et al.* 2004), vasos de maior calibre (Locosselli & Ceccantini, em preparação) e folhas com estômatos menores e mais numerosos, com uma resposta mais rápida às variações ambientais (Rossato *et al.* 2009b).

Esses dados da literatura e os do presente trabalho corroboram os resultados das análises de isótopos de carbono e do cálculo da eficiência intrínseca do uso da água, a começar pelo fracionamento de carbono.

H. stigonocarpa possui os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ e conseqüentemente maiores valores de discriminação de carbono. Plantas, que em geral estão em locais onde não há restrição hídrica e/ou a abundância de luz é menor, possuem estômatos que ficam abertos por mais tempo, e portanto têm valores menores de $\delta^{13}\text{C}$ e maiores de $\Delta 13$ (Martinelli *et al.* 2009). Os estômatos maiores, e conseqüentemente de controle mais lento, do jatobá de cerrado devem explicar, ao menos em parte, estes resultados, assim como a abundância de água no solo no cerrado.

A anatomia dos estômatos das espécies de jatobá descrita por Rossato *et al.* (2009b) também vai ao encontro do resultado de concentração de CO_2 no mesofilo (c). Para ter uma concentração maior desse gás dentro da folha, *H. stigonocarpa* precisa permitir uma ventilação maior para o abastecimento de dióxido de carbono no mesofilo. Também como conseqüência do menor controle estomático e das altas taxas de transpiração, o jatobá de cerrado possui uma eficiência intrínseca no uso da água menor que o jatobá de mata, que possui um controle estomático mais refinado, por ter um estômato menor.

Uma maior eficiência intrínseca no uso da água também foi encontrada em indivíduos de *Araucaria angustifolia* na região de mata quando comparado a indivíduos da região de campo (Silva *et al.* 2009). Os autores discutem que pode existir uma competição maior por água na floresta, hipótese que pode explicar também os resultados encontrados com os jatobás.

Outra diferença encontrada foi o fato de a eficiência intrínseca no uso da água de *H. stigonocarpa* mostrar um padrão de elevação ao longo dos últimos 50 anos que corresponde ao aumento das concentrações de CO_2 neste período. Resultados semelhantes foram encontrados em outros trabalhos como Hieftz *et al.* (2005), analisando *Cedrela odorata* e *Sweitenia macrophylla*; e Silva *et al.* (2009), com *Araucaria angustifolia*; nos quais foi encontrado um aumento na eficiência intrínseca do uso da água em todas as espécies. O aumento da eficiência no uso da água como conseqüência das concentrações elevadas de CO_2 é amplamente citado na literatura (Drake & Meler 1997, Herrick *et al.* 2004, Poole *et al.* 2000, Medlyn *et al.* 2001 e

Ainsworth & Rogers 2007). Essa eficiência maior pode ser resultado do maior controle estomático adquirido ao longo do tempo, e também da maior alocação de biomassa para as raízes, principalmente com o aumento da produção das raízes delgadas (Wullschleger *et al* 2002 e Morgan *et al.* 2004).

Porém em *H. courbaril* não foi encontrada uma tendência significativa na variação de eficiência intrínseca no uso da água (W_i) ao longo dos anos. Provavelmente esta diferença se deva ao fato de *H. courbaril* já possuir valores elevados de W_i , sendo que até o momento, é pouco influenciado pelo aumento de CO_2 , enquanto que *H. stigonocarpa* possuía valores menores de W_i que poderiam aumentar por influência deste gás. Além disso, a própria relação desta espécie com o ambiente pode ser mais favorável à variação do W_i como consequência do aumento de CO_2 , pois a espécie possui um controle estomático menor, com potencial de aumentar mais a eficiência, e também por necessitar de raízes mais profundas.

Esses resultados revelam uma maior sensibilidade do jatobá de cerrado aos efeitos de elevação de CO_2 na atmosfera, e isso se deve em parte pela demanda ambiental do cerrado e em parte pelas características anatômicas e fisiológicas intrínsecas à *H. stigonocarpa*. Esta verificação é muito importante, pois pode auxiliar na resolução de uma das cinco dificuldades em encontrar efeitos do CO_2 nos anéis de crescimento enumeradas por Schweingruber (1996), a qual menciona o não conhecimento do melhor ambiente para analisar os efeitos deste gás.

Apesar de não ter sido testada a influência climática sobre a eficiência intrínseca do uso da água neste trabalho, o W_i do jatobá de mata deve depender muito mais das pressões climáticas, enquanto a eficiência do uso da água de *H. stigonocarpa* depende comprovadamente mais do CO_2 . Tanto que a variabilidade de W_i ao longo dos anos de *H. courbaril* é maior, o que levou a esta espécie ter um coeficiente de correlação (r) notadamente menor e não significativo.

Como em outros trabalhos (Ferrio 2003, Guo & Xie 2006, Andreu *et al.* 2008, Kirdeyanov *et al.* 2008, Levanic *et al.* 2008 e Tardiff *et al.* 2008), o $\delta^{13}C$ mostrou sinais claros de dependência climática, o que demonstra um potencial para o uso desse parâmetro em estudos de dendroclimatologia.

Ao analisar os resultados das funções de resposta é possível perceber que em relação à precipitação, *H. stigonocarpa* possui correlação com o início da estação de crescimento (novembro), enquanto *H. courbaril* possui correlações com as precipitações desde o início (novembro) até o meio da estação de crescimento (janeiro). Esse resultado vai ao encontro dos obtidos por Rossato *et al.* (2009a), no qual verificaram que a porção aérea das espécies de mata crescem por um período maior que as espécies de cerrado. Essa diferença não representa uma parada no crescimento de *H. stigonocarpa* antes do final da estação chuvosa, mas pode ser consequência de uma mudança na alocação do carbono que inicialmente se fixa nas partes aéreas (como o tronco, local de onde se extraíram as amostra de celulose para o presente estudo), e depois passa a se fixar nas raízes, por motivos já explicitados. Essa hipótese ainda precisa ser estudada por meio de análises de alocação de carbono ao longo do tempo.

Em relação às temperaturas, *H. courbaril* mostra influência dos mesmos meses na precipitação, porém num padrão inverso, enquanto que em *H. stigonocarpa*, as temperaturas influenciam significativamente a assinatura isotópica logo antes do início da estação de crescimento. Isso provavelmente se deve ao aumento da demanda evaporativa ocasionado pelas temperaturas elevadas em uma estação seca.

O registro do clima no $\delta^{13}\text{C}$ do anel de crescimento também mostra evidências fortes que as plantas armazenam carbono, o qual pode ser utilizado em estações de crescimento posteriores. Isso porque existe influência do clima no sinal isotópico da estação de crescimento imediatamente anterior. Evidências da mobilização de reservas acumuladas em uma estação de crescimento anterior, já foram citadas por Barbaroux & Breda (2002).

5. Conclusão

Mesmo estando sob a influência de um mesmo macro-clima, as demandas ambientais e características intrínsecas de cada espécie de jatobá levam-nas a possuírem particularidades na manipulação do carbono atmosférico.

As diferenças na manipulação do carbono entre as espécies ficaram evidentes nos dados de isótopos estáveis, tanto nos valores absolutos quanto na assinatura climática do $\delta^{13}\text{C}$. A eficiência intrínseca do uso da água calculada mostrou que ao longo dos últimos 50 anos as duas espécies estão respondendo de forma diferente às elevações das

concentrações atmosféricas de CO₂, sendo que a espécie de mata possui valores absolutos de W_i superiores aos encontrados nos indivíduos da espécie de cerrado, que por sua vez, possui uma tendência de aumento do W_i , ao longo das últimas cinco décadas, não encontrada nos indivíduos da espécie de mata. Estas particularidades fazem de *H. stigonocarpa* uma espécie potencial para encontrar efeitos de elevação do CO₂ atmosférico nas taxas de crescimento radial.

6. Bibliografia

- Ainsworth E.A. & Long S.P., 2005, What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂, *New Phytologist*, 165, 351-372
- Ainsworth E.A. & Rogers A., 2007 The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions, *Plant, Cell and Environment*, 30, 258–270
- Andreu L., Planells O., Gutiérrez E., Helle G. & Schleser G.H. 2008 Climatic significance of tree-ring width and $\delta^{13}C$ in a Spanish pine forest network, *Tellus*, 60B, 771-781
- Barbaroux C. & Bréda N., 2002, Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem Wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology*, 22, 1201-1210
- Barrie A. & Prosser S., 1996, Automated Analysis of Light-Element Stable Isotopes by Isotope Ratio Mass Spectrometer, in: Mass Spectrometry of Soils, Boutton T.W. & Yamasa S., Marcel Dekker, NY, 1-46
- Bert D., Leavitt S.W., & Dupouey J.L., 1997, Variations of wood $\delta^{13}C$ and water-use efficiency of *Abies alba* during the last century. *Ecology*, 78, 1588-1596
- Brendel O., Iannetta P.P.M. & Stewart D., 2000, A rapid and simple method to isolate pure alpha-cellulose. *Phytochemical Analysis*, 11, 7-10
- Charnet R., Freire C.A.L., Charnet E.M.R. & Bonvino H., 2008, Análise de modelos de regressão linear – com aplicações. Editora Unicamp, Segunda edição, 356pg
- Drake B.G. & Meler M.A.G. ,1997, MORE EFFICIENT PLANTS: A Consequence of Rising Atmospheric CO₂? *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 48, 609–639

- Farquhar G.D., O'Leary M.H. & Berry J.A., 1982, On the relationship between carbon isotope discrimination and intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 9, 121-137
- Feng X., 1999, Trends in intrinsic water-use efficiency of natural trees for the past 100–200 years: a response to atmospheric CO₂ concentration, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 1891-1903
- Ferri M.G., 1955, Contribuição ao conhecimento da ecologia do cerrado e da caatinga. *Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo*, 195, Botânica 12, 1-170
- Ferrio J.P., Florit A., Vega A., Serrano L. & Voltas J., 2003, $\Delta^{13}\text{C}$ and tree-ring width reflect different drought responses in *Quercus ilex* and *Pinus halepensis*. *Oecologia*, 137, 512-518
- Francey R.J., 1981, Tasmanian tree rings belie suggested anthropogenic $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ trends, *Nature*, 290, 232-235
- Friedli H., Lötscher H., Oeschger H., Siegentler U. & Stauffer B., 1986, Ice core record of the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO₂ in the past two centuries. *Nature*, 324, 237-238
- Gaudinski J.B., Dawson T.E., Quideau S., Schuur E. A. G., Roden .S., Trumbore S.E., Sandquist D.R., Oh, S.W. & Wasylishen R.E., 2005, Comparative analysis of cellulose preparation techniques for use with ^{13}C , ^{14}C , and ^{18}O isotopic measurements. *Analytical chemistry*, 77 (22), 7212-7224
- Guo G. & Xie G., 2006, The relationship between plant stable isotope composition precipitation and satellite data, Tibet Plateau, China. *Quaternary International*, 144, 68-71
- Herrick J.D., Maherali H. & Thomas R.B., 2004, Reduced stomatal conductance in sweetgum (*Liquidambar styraciflua*) sustained over long-term CO₂ enrichment, *New Phytologist*, 162, 387-396
- Hietz P., Wanek W. & Dünisch O., 2005, Long-term trends in cellulose $\delta^{13}\text{C}$ and water-use efficiency of tropical *Cedrela* and *Swietenia* from Brazil. *Tree Physiology*, 25, 745-752
- Hoffmann W.A. & Franco A.C., 2003, Comparative growth analysis of tropical forest and savanna woody plants using phylogenetically independent contrasts, *Journal of Ecology*, 91, 475-484

- Hoffmann W.A., Orthen B. & Franco A.C., 2004, Constraints to seedling success of savanna and forest trees across the savanna-forest boundary. *Oecologia*, 140, 252-260
- Holmes R.L., 1983, Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*, 43, 69-78
- Huang J., Bergeron Y., Denneler B., Berninger F. & Tardif J., 2008, Response of Forest Trees to Increased Atmospheric CO₂, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 26:5, 265 -283
- Jacoby G.C. & D'Arrigo R.D., 1997, Tree rings, carbon dioxide and climatic change, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 94, 8350-8353
- Keeling C.D., Whorf T.P., Wahlen M. & van der Plicht J., 1995, Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666-670
- Kirdyanov A.V., Treydte K.S., Nikolaev A., Helle G. & Schleser G.H., Climate signals in tree-ring width, density and $\delta^{13}\text{C}$ from larches in Eastern Siberia (Russia). *Chemical Geology*, 252, 31-41
- Levanic T., Gricar J., Gagen M., Jalkanen R., Loader N.J., McCarroll, Oven P. & Robertson I., 2008, The climate sensitivity of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in the southeastern European Alps. *Tress-Structure and Function*, 23(1), 169-180
- Locosselli G.M. & Ceccantini G., em preparação, Análise dos sinais climáticos registrados nos anéis de crescimento e áreas de vaso de duas espécies tropicais: *Hymenaea courbaril* e *Hymenaea stigonocarpa*, e os possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre as espécies.
- Marino B.D. & McElroy M.B., 1991, Isotopic composition of atmospheric CO₂ inferred from carbon in C₄ plant cellulose. *Nature*, 349, 127-131
- Martinelli L.A., Ometto J.P.H.B., Ferraz E.S., Victoria R.L., Camargo P.B. & Moreira M.Z., 2009, Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis. Oficina de textos, São Paulo/SP, 144 pg
- McCarroll D. & Loader N. J., 2004, Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23, 771-801
- Medlyn B.E., Barton C.V.M., Broadmeadow M.S.J., Ceulemans R., De Angelis P., Forstreuter M., Freeman M., Jackson S.B., Kellomaki S., Laitat E., Rey A., Robertz P., Sigurdsson B.D., Strassmeyer J., Wang K., Curtis P.S. & Jarvis

- P.G., 2001, Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated to CO₂ concentration: a synthesis. *New Phytologist*, 149, 247-264
- Meinzer F.C., Goldstein G., Franco A.C., Bustamante M., Iglar E., Jackson P., Caldas L. & Rundel W., 1999, Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species, *Functional Ecology*, 13, 273-282
- Morgan J.A., Pataki D.E., Körner C., Clark H., Del Grosso S.J., Grünzweig J.M., Knapp A.K., Mosier A.R., Newton P.C.D., Niklaus P.A., Nippert J.B., Nowak R.S., Parton W.J., Polley H., & Shaw M. R., 2004, Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric Co₂, *Oecologia*, 140, 11-25
- Neftel A., Moor E., Oeschger H. & Stauffer B., 1985, Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries. *Nature*, 315, 45-47
- Norby R.J., Wullschlegel S.D., Gunderson C.A., Johnson D.W. & Ceulemans R., 1999, Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future forest, *Plant Cell Environ*, 22, 683-714
- Poole I., Lawson T., Weyers J.D.B. & Raven J.A. (2000) Effect of elevated CO₂ on the stomatal distribution and leaf physiology of *Alnus glutinosa*. *New Phytologist* 145, 511-521
- Rawitscher F., Ferri M.G. & Rachid M., 1943, Profundidade dos solos e vegetação em campos cerrados do Brasil Meridional. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, T 15, n°4
- Rossato D.R., Hoffmann W.A. & Franco A.C., 2009a, Differences in growth patterns between co-occurring Forest and savanna trees affect the forest-savanna boundary. *Functional Ecology*, 23, 689-698
- Rossato D.R., Hoffmann W.A. & Franco A.C., 2009b, Características estomáticas de pares congêneros de cerrado e mata de galeria crescendo numa região transicional no Brasil Central. *Acta Botanica Brasilica*, 23(2), 499-508
- Schweingruber F.H., 1996, Tree rings and environment dendroecology, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt, 609 pg.
- Schweingruber F.H., 1988, Tree rings. Basics and applications of dendrochronology. Kluwer, Academic press, Dordrecht, Boston, London.
- Silva L.R., Anand M., Oliveira J.M. & Pillar V.D., 2009, Past century changes in *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze water use efficiency of southern Brazil: implications for forest expansion. *Global Change Biology*, 15, 2387-2396

- Sokal, R.R. & F.J. Rohlf., 1981, Biometry - The principles and practice of statistics in biological research. W.H. Freeman, New York.
- Stokes A.M. & Smiley T.L., 1996, An introduction to tree-ring dating, The University of Arizona Press, Tucson.
- Wullschleger S.D., Tschaplinski T.J. & Norby R.J., 2002, Plant water relations at elevated CO₂– implications for water-limited environments , *Plant, Cell and Environment*, 25, 319-381

Análise das taxas de crescimento radial utilizando métodos dendrocronológicos aplicada à conservação das espécies de jatobá de mata (*Hymenaea courbaril* L.) e de cerrado (*Hymenaea stigonocarpa* Mart ex. Hayne)Giuliano Maselli Locosselli¹ & Gregório Ceccantini¹¹ Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.**Resumo**

O processo de licenciamento ambiental é um importante mecanismo de prevenção de danos ao meio ambiente. Este processo envolve, em muitos casos, a elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) que necessitam de obtenção de dados primários (obtidos por uma equipe multidisciplinar) e dados secundários (literatura). Esses dados têm em comum a necessidade do rigor científico. O objetivo deste trabalho é analisar a taxa de crescimento radial de duas espécies de jatobá, uma de mata (*H. courbaril*) e outra de cerrado (*H. stigonocarpa*) e assim poder estimar idade de árvores no campo por meio do seu tamanho. Foram coletadas amostras do tronco principal de 11 indivíduos de *H. courbaril* e 12 de *H. stigonocarpa*. As amostras foram polidas e posteriormente os anéis de crescimento foram identificados, datados e medidos. Com as cronologias bem definidas, foi possível analisar a taxa de crescimento de cada espécie, que podem auxiliar na estimativa da idade das árvores no campo. A espécie de cerrado possui uma taxa de crescimento anual em média 2,4 vezes menor, com um incremento radial médio anual de apenas 2mm, enquanto a espécie de cerrado possui um incremento de 4,75mm. Essa diferença na taxa de crescimento dos troncos mostra que as tomadas de decisão de processos que envolvam corte ou manejo em ambientes que possuam a espécie de *H. stigonocarpa*, e no cerrado de uma maneira geral, devem ser bem pensadas, pois qualquer tentativa futura de restauração destes ambientes pode ser muito mais difícil, uma vez que, os indivíduos de jatobá de cerrado podem levar mais de duas vezes o tempo dos indivíduos de mata para atingirem dimensões maduras.

Palavras-chaves: incremento radial, dendrocronologia, jatobá, mata semidecídua, cerrado.

1. Introdução

Na busca pelo desenvolvimento o homem vem alterando consideravelmente o ambiente. Antes da revolução industrial ocorrida no século XIX, as mudanças eram

mais pontuais e graduais, mas se tornaram significativas com o aumento populacional e uso intenso dos recursos naturais (Goldenberg & Lucon 2008). Estas alterações vêm preocupando a sociedade, e como consequência muitas políticas internacionais foram adotadas ao longo do século XX, que refletiram na elaboração de leis e políticas nacionais para a preservação e conservação do meio ambiente. No caso do Brasil, a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA, Lei nº 6.938/81) instituiu a avaliação do impacto ambiental e o licenciamento ambiental, sendo este último um importante instrumento para prevenir os danos ambientais (Sánchez 2006). É importante ressaltar que a Constituição Federal de 1988 recepcionou a PNMA em quase todos os seus aspectos, determinando que o meio ambiente é um bem difuso, de uso comum do povo, e que deve garantir a sadia qualidade de vida das gerações presentes e futuras (Fiorillo 2009).

No processo de licenciamento ambiental são exigidos estudos ambientais em projetos que utilizem recursos naturais e/ou tenham potencial de causar degradação do ambiente. Estes estudos utilizam dois tipos de dados: os primários, que devem ser levantados pela equipe multidisciplinar, e os secundários, que devem ser obtidos em fontes confiáveis de literatura. Independentemente do tipo de dados utilizados, esses necessitam de bases científicas para que o processo de tomada de decisão seja o melhor possível (Sánchez 2006).

Um exemplo de dados primários e secundários sobre a vegetação, que pode ser importante para a tomada de decisão, é a estimativa da idade das árvores em uma região, principalmente em um caso hipotético de restauração de um ambiente, pois indica quanto tempo aquelas árvores presentes no local necessitariam para chegar ao estágio atual. Esses dados podem auxiliar na escolha do melhor local para a instalação de um projeto, por exemplo.

Para estimar a idade e as taxas de crescimento das árvores, o método mais confiável é o dendrocronológico, pois os métodos estatísticos que envolvem a dendrocronologia fazem com que as datações dos anéis de crescimento possuam alto grau de confiança (Huges 2002). A dendrocronologia utiliza a largura de cada anel de crescimento como base de informação para a comparação entre os indivíduos de uma população o que permite reconhecer padrões de crescimento e alinhar as cronologias

para saber quando um determinado anel foi formado e quanto que o tronco daquela árvore cresceu no ano (Schweingruber 1989).

A dendrocronologia já é utilizada com sucesso no Brasil em projetos de conservação de espécies arbóreas, em especial nos planos de manejo de espécies alvo da exploração de madeira na Floresta Amazônica, indicando a importância da relação tamanho versus idade em projetos de conservação (Schongart *et al.* 2007, Schongart *et al.* 2008 e Wittmann *et al.* 2009).

O objetivo deste trabalho é estudar a relação idade versus diâmetro do tronco das espécies de jatobá: *Hymenaea courbaril* L. e *Hymenaea stigonocarpa* Mart ex. Hayne localizadas em um mosaico vegetacional, e assim determinar as taxas de incremento radial para cada uma das espécies. Esta análise também permite a elaboração de estimadores de idade a partir do diâmetro do tronco. Estes dados produzidos são de grande importância para auxiliar na tomada de decisão dentro do processo de licenciamento ambiental de atividades que atinjam locais com mata semi-decídua e cerrado que possuam espécimes de jatobá, bem como auxiliar em atividades de cultivo das espécies e na recuperação ambiental de áreas degradadas de mata e cerrado.

2. Material e métodos

2.1. Local de coleta

As amostras de *Hymenaea courbaril* L. e *Hymenaea stigonocarpa* Mat. ex Hayne foram coletadas, respectivamente, em fragmentos de mata semi-decídua e de cerrado, na fazenda Jagoara Velha, localizada no município de Matozinhos/MG. (S 19°27'28" e W 43°57'43", altitude de 792 metros a.n.m.).

De cada árvore foram obtidos discos da secção transversal do tronco principal provenientes de uma derrubada autorizada do cerrado e da mata semi-decídua para o estabelecimento de uma cultura de eucalipto, ou amostras de trado motorizado (baquetas) de árvores dos fragmentos remanescentes. Os discos foram os mais basais possíveis, até 1m de altura, e as amostras de trado foram na altura do peito (1,3m do solo). Ao todo foram coletados 12 indivíduos de *H. courbaril* e 11 de *H. stigonocarpa*.

2.2. Preparação das amostras

Após a coleta, as amostras ficaram em uma estante para a secagem da madeira ao ar livre. As baquetas foram fixadas em suportes de madeira para que as amostras não empenassem durante a secagem e para facilitar a posterior manipulação.

Os discos foram polidos utilizando lixas de diferentes granulações , desde 60 até 2000. As baquetas foram polidas utilizando navalhas descartáveis de micrótomo.

2.3. Datação e medição dos anéis de crescimento

Os anéis de crescimento de cada espécie foram datados utilizando os métodos tradicionais de dendrocronologia (Stokes & Smiles 1996). Para isso, foram marcados quatro raios nos discos, sempre evitando regiões problemáticas, como aquelas com cicatrizes, para a datação dos anéis de crescimento e medição da largura de cada um. No caso das baquetas foram utilizados os raios disponíveis obtidos no momento da coleta.

Os anéis datados foram medidos a partir de imagens digitais obtidas de cada raio datado utilizando uma câmera digital Canon 350D com uma lente macro Canon 100mm e um tubo de extensão de 36mm (Kenko). As imagens foram medidas utilizando o programa de domínio público ImageJ 1.38X (Wayne Hasband, National Institute of Health USA).

2.4. Construção das cronologias e análise dos dados

Com os dados de medidas das larguras de anéis de crescimento prontos, estes foram analisados no programa COFECHA (Holmes 1983) para realizar a datação cruzada, a partir da verificação da presença de anéis faltantes e/ou anéis falsos, até que se atinja um valor de intercorrelação entre as séries maior do que o considerado crítico. Essa intercorrelação mostra o quão comum é o sinal de crescimento e quão bem alinhadas estão as cronologias de anéis de crescimento. Isso permite que se tenha certeza de que um determinado anel foi formado em um ano conhecido.

2.5. Análise dos dados

Com a segurança da datação dos anéis de crescimento, é possível dizer qual a idade de cada um dos indivíduos analisados e quanto cada um cresceu em um determinado ano.

Para sintetizar as duas informações foram construídos gráficos para cada espécie de crescimento acumulado por idade mostrando os raios dos indivíduos que obtiveram os melhores valores de intercorrelação.

Também foi calculada para cada espécie a média do crescimento radial (incremento) pela idade para a análise de regressões lineares. Para estas também foi calculado o desvio padrão. As funções provenientes dessas regressões podem ser utilizadas para estimar a idade de indivíduos de jatobá no campo (Charnet *et al.* 2008).

3. Resultados e discussão

Os anéis de crescimento de jatobá são demarcados pela presença de faixas de parênquima marginal. A figura 1 mostra um exemplo de conjunto de anéis de crescimento de cada uma das espécies analisadas.

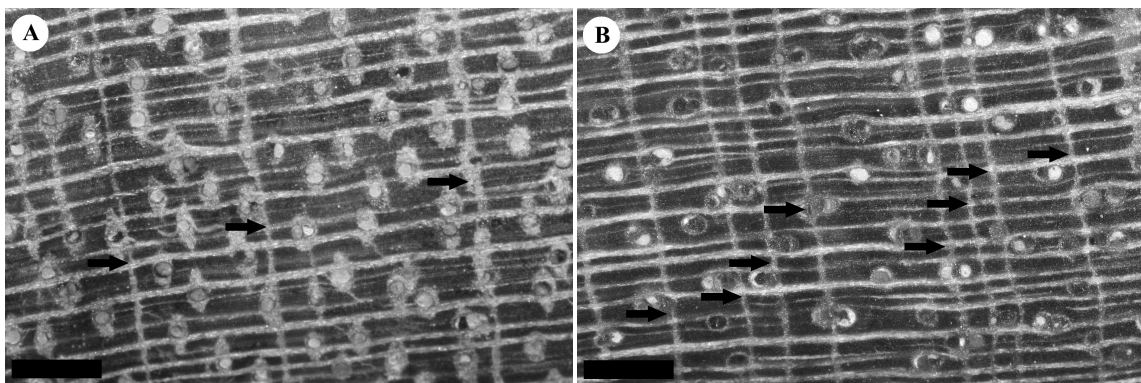


Figura 1: Exemplos dos anéis de crescimento de A) *Hymenaea courbaril* e B) *Hymenaea stigonocarpa* (1mm).

Como é possível ver nos exemplos de lenho mostrados na figura 1, o incremento anual de crescimento anual do jatobá de mata é maior que a do cerrado. Essa informação é reforçada nos gráficos de crescimento acumulado por idade construídos para as duas espécies (Figura 2).

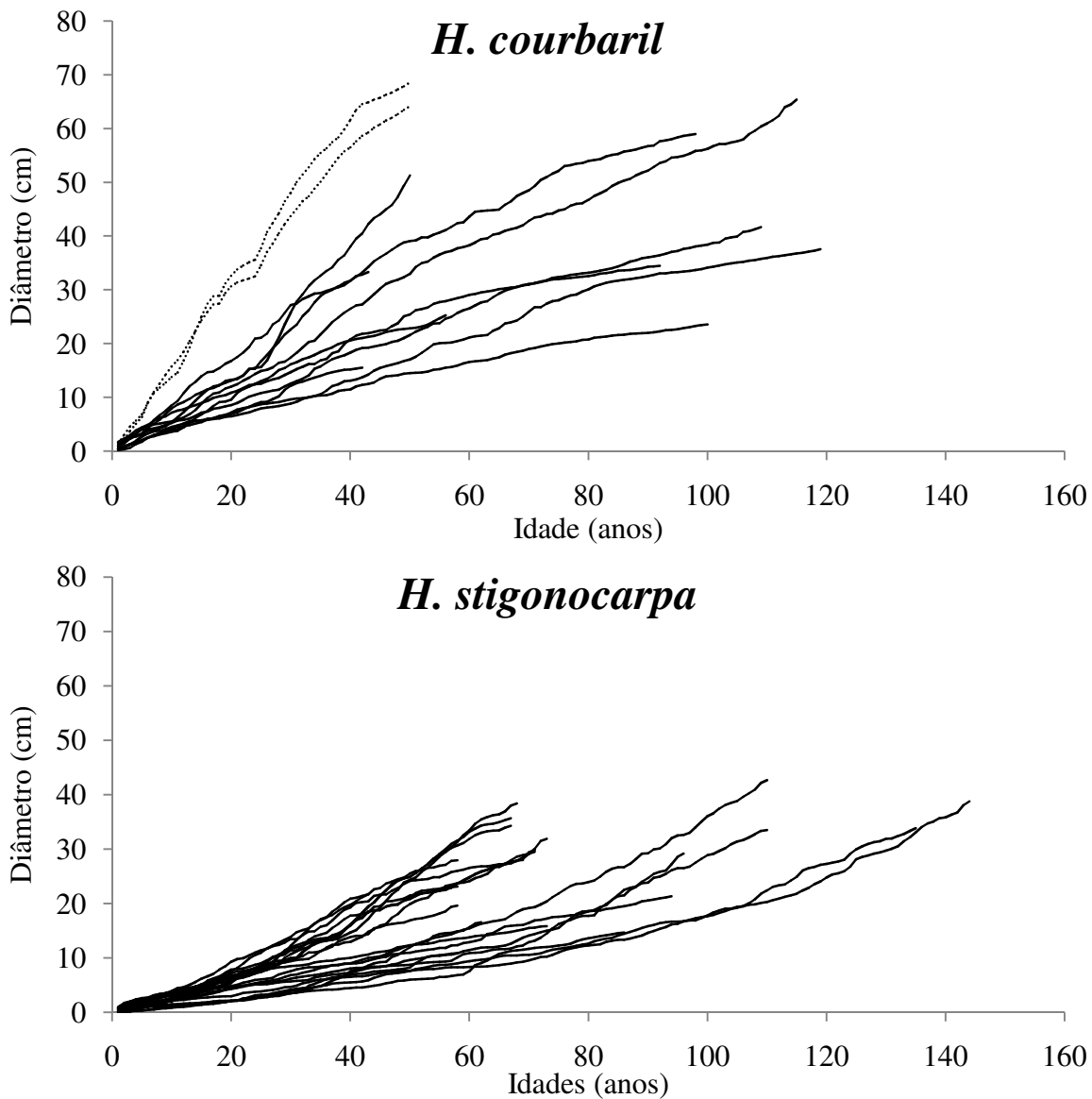


Figura 2: Incremento radial acumulado em função da idade para os indivíduos de *H. courbaril* e *H. stigonocarpa* em função da idade. A linha pontilhada corresponde aos raios do indivíduo GC3163, que possui uma taxa de crescimento 60% maior que a média de seus semelhantes.

A Figura 2 mostra incremento anual acumulado indivíduos de *H. courbaril* e *H. stigonocarpa*. Nessa figura é possível perceber que a taxa de incremento dos indivíduos de *H. courbaril* tende a ser maior que a de *H. stigonocarpa*. Por exemplo, um indivíduo de 40 anos de idade de *H. stigonocarpa* pode ter entre 14cm 50cm de diâmetro (incremento radial anual médio = 2mm), enquanto um indivíduo de *H. courbaril* de mesma idade pode ter entre 110mm a 650mm de diâmetro (incremento radial anual

médio = 4,75mm), o que representa em média uma taxa de crescimento 2,4 vezes maior para o jatobá de mata. Essa taxa reduzida de crescimento da espécie de cerrado é ilustrada pela figura 3, que mostra um indivíduo de *H. stigonocarpa* de 95 anos de idade.

Os dados mostram que existe certa variação nas taxas de crescimento entre os indivíduos, que pode ser consequência de pequenas variações ambientais como a proximidade a um corpo d'água ou variações de crescimento dentro do indivíduo como a presença de lenho de reação (Schweingruber 1996), mas que de maneira geral se agrupam dentro de uma faixa de variação não muito grande. A única exceção são os raios do indivíduo GC3163 (linha pontilhada na figura 02), que possuem uma taxa de crescimento 60% maior que a média de seus semelhantes. Este indivíduo provavelmente cresceu em um local muito favorável para o seu desenvolvimento.



Figura 3: Exemplo de *H. stigonocarpa* de 95 anos de idade, para ilustrar o crescimento reduzido da espécie.

As diferenças no crescimento entre as duas espécies ficam ainda mais evidentes quando analisadas na figura 4 que mostra a média do crescimento radial acumulado pela idade e o respectivo desvio padrão. No caso de *H. courbaril*, o indivíduo GC 3163 apresentado anteriormente não foi utilizado pois, certamente, iria influenciar demais na média do crescimento dos indivíduos do jatobá de mata.

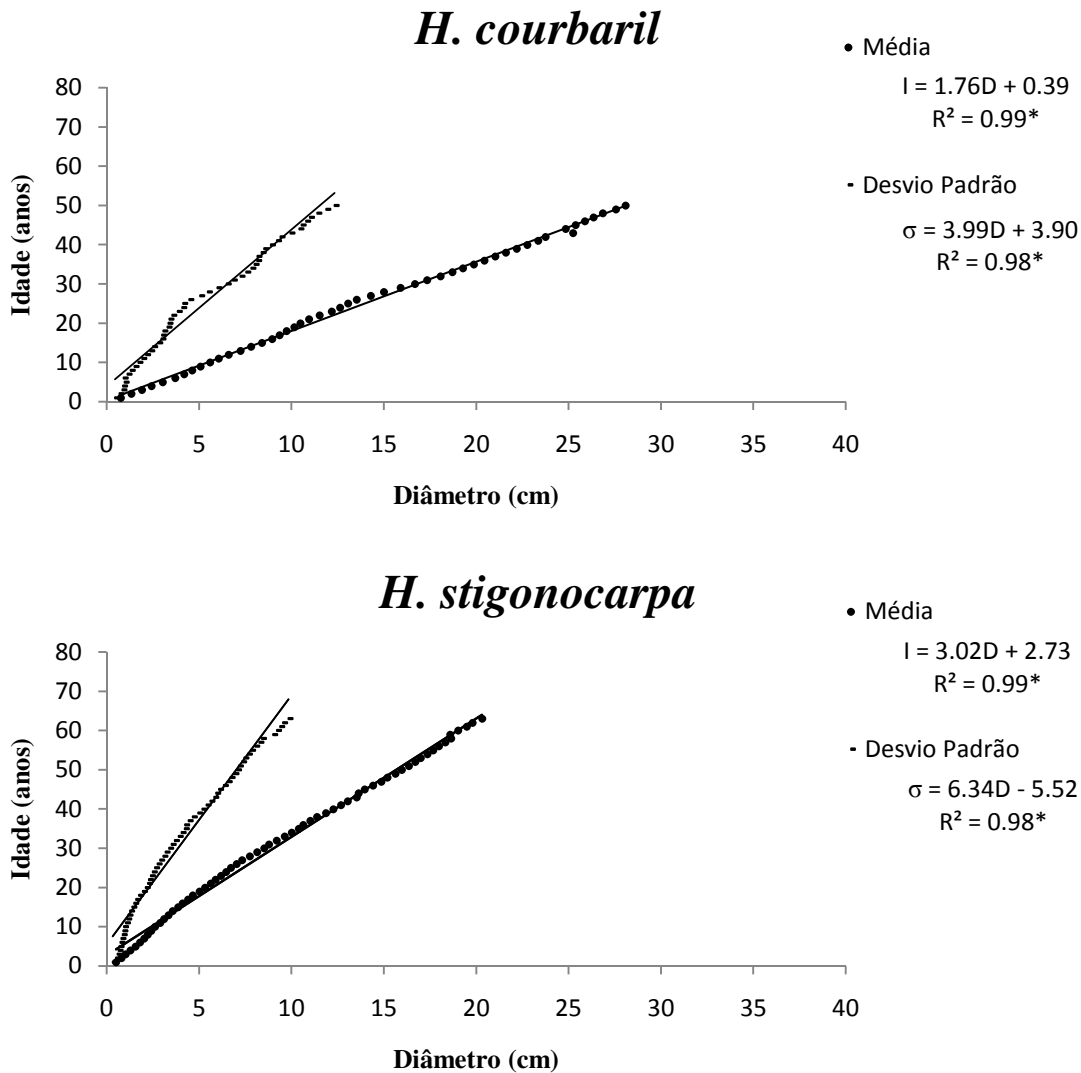


Figura 04: Regressão linear do diâmetro médio pela idade (círculos) e do desvio padrão (traço) para os indivíduos de *H. courbaril* e *H. stigonocarpa*. Para cada reta são apresentados os valores de R^2 , *significativo para $\alpha = 0.05$. I=idade (anos), D=diâmetro (cm) e σ =desvio padrão da idade (anos).

A diferença de crescimento encontrada neste trabalho pode ser interpretada como consequência de diferentes estratégias fisiológicas adotadas por cada uma das espécies. A literatura mostra que, em geral, as espécies arbóreas de cerrado possuem raízes mais profundas para conseguirem alcançar o lençol freático que pode estar a 18 metros de profundidade (Rawitscher *et al.* 1943). Como consequência deste fato, estas plantas investem menos nas partes aéreas e dão prioridade para o crescimento das raízes (Hoffmann & Franco 2003, Hoffmann *et al.* 2004).

Porém, independentemente da diferença de crescimento das raízes entre as espécies de mata e de cerrado, os indivíduos de *H. stigonocarpa* certamente demoram muito mais para conseguir cumprir suas funções maduras no ecossistema devido à menor taxa de crescimento das partes aéreas. Isso cria a necessidade de uma especial atenção ao jatobá de cerrado, e se possível a este bioma como um todo, em processos de tomada de decisão, em especial quando se trata de licenciamento ambiental.

Isto não quer dizer que é melhor cortar um indivíduo de mata do que um de cerrado, mas mostra que, o tempo de restauração do ambiente de mata, pensando apenas nas taxas de crescimento das espécies estudadas, pode ser sensivelmente menor do que no caso do cerrado. Além disso, com exceção do pequi (*Cariocar brasiliense*) que é imune ao corte no estado de Minas Gerais por conta da lei estadual nº 10.883 de 2 de outubro de 1992, todas as outras espécies não possuem uma regulamentação de corte, deixando o bioma especialmente vulnerável.

Apesar deste trabalho ser um estudo de caso com espécimes de uma localidade do estado de Minas Gerais, é possível que ele possa ter resultados reprodutíveis em outros locais em que ocorram mosaicos de mata-cerrado semelhantes aos estudados.

As funções mostradas na figura 4 podem ser utilizadas para estimar a idade das plantas no campo. Mas esta estimativa deve ser realizada com cuidado, pois o desvio padrão da idade aumenta conforme aumenta a idade média, ou seja, quão maior a árvore, menos precisa é a estimativa.

Os resultados também vão contra a cultura popular de que árvore grande é velha e a pequena é nova. Como a figura 3 mostra, uma árvore consideravelmente pequena pode ter uma idade avançada, no caso 95 anos.

4. Conclusão

Os estudos da taxa de crescimento radial das espécies de jatobá de mata e de cerrado utilizando a metodologia rigorosa da dendrocronologia mostraram que os indivíduos da espécie de cerrado possuem um crescimento consideravelmente menor que os indivíduos da espécie de mata. Essa diferença de crescimento mostra a necessidade de uma maior atenção ao jatobá de cerrado, e provavelmente ao bioma como um todo, no momento de tomada de decisão em políticas ou empreendimentos que possam causar significativo dano ambiental.

5. Bibliografia

- Charnet R., Freire C.A.L., Charnet E.M.R. & Bonvino H., 2008, Análise de modelos de regressão linear: com aplicações, 2ª Edição, Editora Unicamp, Campinas, SP, 356 pg
- Fiorillo C. A. P., 2009, Curso de direito ambiental brasileiro, 10ª edição, Editora Saraiva, São Paulo, SP, 642 pg
- Goldenberg J. & Lucon O., 2008, Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento, 3ª Edição, EDUSP, São Paulo, SP, 396 pg
- Hoffmann W.A. & Franco A.C., 2003, Comparative growth analysis of tropical forest and savanna woody plants using phylogenetically independent contrasts, *Journal of Ecology*, 91, 475-484
- Hoffmann W.A., Orthen B. & Franco A.C., 2004, Constraints to seedling success of savanna and forest trees across the savanna-forest boundary. *Oecologia*, 140, 252-260
- Holmes R.L., 1983, Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring bulletin*, 43, 69-78
- Huges M.K., 2002 Dendrochronology in climatology-the state of the art. *Dendrochronologia*, 20(1-2), 95-116
- Rawitscher F., Ferri M.G. & Rachid M., 1943, Profundidade dos solos e vegetação em campos cerrados do Brasil Meridional. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, T 15, n°4
- Sánchez L. E., 2006, Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos, 1ª Edição, Oficina de Textos, São Paulo, SP, 495 pg
- Schöngart J., Wittmann F., Worbes M., Piedade M.T.F., Krambeck H. & Junk W.J., 2007, Management criteria for *Ficus insipid* Willd. (Moraceae) in Amazonian white-water floodplain forest defined by tree-ring analysis. *Annals of Forest Science*, 64, 657-664

- Schongart J., 2009, Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. *Forest Ecology Management*, 256, 46-58
- Schweingruber F.H., 1988: Tree rings. Basics and applications of dendrochronology. Kluwer, Academic press, Dordrecht, Boston, London.
- Schweingruber F.H., 1996, Tree rings and environment dendroecology, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt, 609 pg.
- Stokes A.M. & Smiley T.L. 1996, An introduction to tree-ring dating, The University of Arizona Press, Tucson.
- Wittmann F., Schöngart J., Queiroz H.L., Wittmann A.O., Conserva A.S., Piedade M.T.F., Kesselmeier J. & Junk W.J., 2009, The Amazon floodplain Demonstration Site: Sustainable timber production and management of Central Amazonian with-water floodplains. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 9, 1, 41-54

Considerações Finais

As duas espécies estudadas produziram bons resultados dendrocronológicos, com anéis de crescimento sensitivos e que registravam informações climáticas. Além dos resultados obtidos com a largura dos anéis de crescimento, as áreas de vasos e os isótopos estáveis de carbono foram capazes de fornecer informações importantes sobre as temperaturas e precipitações anuais.

A adição de mais indivíduos das duas espécies no trabalho provocaria pouca ou nenhuma mudança na sensibilidade, na intercorrelação e nos sinais climáticos registrados nas cronologias construídas. Isso ficou claro conforme os indivíduos foram sendo adicionados à cronologia média e, gradativamente, menos alterações nas cronologias foram observadas. Vale ressaltar que a datação cruzada de amostras de trado foi mais fácil de realizar em *H. courbari*, por conta dos anéis maiores, e os melhores resultados foram obtidos quando haviam sido coletadas três baquetas por árvore. No caso de estudos com *H. stigonocarpa*, é interessante começar o trabalho com alguns discos para depois complementar com amostras de trado.

Além das informações de precipitação da estação de crescimento corrente, tanto no caso da largura dos anéis de crescimento, como nas áreas de vasos, quanto no $\delta^{13}\text{C}$, foram encontrados sinais climáticos da estação de crescimento imediatamente anterior. Esses resultados mostram a complexidade na formação do anel de crescimento e que outras questões inerentes ao próprio lenho já formado, podem influenciar em parte o lenho que virá a se formar.

Por exemplo, um anel produzido na estação de crescimento corrente, que possui vasos de grande calibre, ainda continuará a conduzir muita água no ano seguinte, mesmo se o próximo anel tiver vasos de pequeno calibre, por ser um ano seco. O inverso também pode ser possível, e provavelmente essa quantidade de água sendo conduzida pelo anel anterior pode influenciar o seguinte. O mesmo vale para a influência da quantidade de reservas acumuladas em um ano favorável ou desfavorável ao crescimento pode influenciar o crescimento do ano seguinte.

Essas influências sobre a formação dos anéis de crescimento poderiam ser melhor estudadas para uma compreensão mais ampla dos processos de formação do anel. Desta maneira, caso sejam consideradas nas construções das cronologias ou modelos

climáticos, é possível que uma nova fronteira possa surgir para os estudos dendrocronológicos, trazendo informações que antes não eram obtidas, pois apareciam como ruídos nos modelos.

Para alcançar esse objetivo, estudos das reservas nos anéis de crescimento podem ser realizadas, principalmente em função do clima para definir quais as condições ideais de acúmulo de reserva e as condições desfavoráveis. Em relação à arquitetura hidráulica, um primeiro passo poderia ser a determinação do número de anéis de crescimento que são condutores.

Ao analisar conjuntamente os resultados obtidos com a largura dos anéis, as áreas de vaso e os isótopos estáveis de carbono é possível inferir como são as demandas ambientais de cada tipo vegetacional e ainda tentar compreender como essas plantas respondem fisiologicamente a estas demandas. Aparentemente, as fontes de stress hídrico, a que as duas espécies estão submetidas, são diferentes. *H. courbaril* depende de um estoque limitado de água do solo que se abastece na época de chuvas, mas se exaure no período de seca. Esta dificuldade é reforçada pela espécie possuir raízes não tão profundas, como ocorre com a espécie de cerrado, e pela maior demanda ambiental de água por ser a mata uma formação mais fechada, o que leva a uma maior competição por água. Esse stress é contornado, nesta espécie, pelos estômatos, que são menores e de controle de abertura/fechamento mais rápido.

Já *H. stigonocarpa*, possui outra fonte de stress hídrico, que não está no solo como na espécie de mata, pois possui raízes profundas e maior disponibilidade de água no solo ao longo do ano. A maior irradiância solar combinada com um ambiente mais aberto leva a uma maior taxa de perda de água por transpiração. Isso é possível de ser inferido, pois a espécie possui estômatos maiores, e de menor controle que, portanto permitem uma grande transpiração, mas com vasos de menor calibre, o que denota uma necessidade de maior segurança na condução. Se a água presente no solo não é limitante, a baixa pressão parcial dela na atmosfera, possivelmente é.

Todas essas influências do clima sobre o anel de crescimento permitem especular que as previsões de elevação da temperatura e a mudança dos padrões de chuva influenciarão as espécies estudadas. De uma maneira geral, a elevação da temperatura pode levar a uma diminuição do crescimento das espécies, e a elevação da precipitação, em geral, seria favorável ao crescimento das duas espécies, mas se, junto ao aumento do

volume, ocorrer uma concentração da precipitação, *H. courbaril* poderia ter um crescimento seriamente prejudicado, pois esta espécie responde principalmente ao comprimento da estação chuvosa e o solo dessa formação não acumula grandes estoques de água.

Em relação aos efeitos diretos da elevação da concentração atmosférica de CO₂, *H. stigonocarpa* já está respondendo há pelo menos cinco décadas, com um aumento da eficiência intrínseca do uso da água, o que pode, teoricamente, favorecer a espécie em condições de stress hídrico induzidas pelas mudanças do clima. Já *H. courbaril* não apresentou nenhuma variação na eficiência intrínseca do uso da águas no mesmo período, possivelmente por já possuir um valor elevado de eficiência. Provavelmente, em concentrações maiores de CO₂ ele obtenha uma resposta semelhante à de *H. stigonocarpa*.

Esse aumento na eficiência intrínseca do uso da água pode levar a uma maior resistência das plantas aos períodos mais secos, e também pode permitir que o estoque de água no solo dure por mais tempo, prolongando o período de crescimento das espécies. Essas hipóteses podem explicar o aumento na taxa de crescimento de *H. stigonocarpa* observado em todos os indivíduos nas últimas cinco décadas, independentemente das idades deles (figura 2, terceiro capítulo).

Os resultados deste trabalho se unem aos muitos outros obtidos no mundo e são mais um passo na complexa tarefa de compreender o que acontecerá daqui a algumas décadas com os ambientes naturais e artificiais com as mudanças globais. Assim como muitos outros trabalhos, este realizado com as duas espécies de jatobá mostra que as espécies já estão respondendo às mudanças no clima e que possivelmente o futuro não será muito promissor para, ao menos, a espécie de mata.

Apesar das condições futuras serem aparentemente mais favoráveis ao crescimento de *H. stigonocarpa*, essa é uma espécie que merece atenção em curto prazo por possuir uma taxa de crescimento substancialmente menor que *H. courbaril* e estar presente em um bioma que sofre grande pressão, seja por força de empreendimentos que demandam o desmate, seja pelo uso de recurso madeireiro, principalmente para a produção de carvão. Se os tomadores de decisão pretendem inserir o país em um modelo de desenvolvimento mais sustentável, e isso demandar a recuperação de áreas

degradadas, fica muito clara a maior dificuldade de regenerar áreas com a espécie de cerrado, e talvez o bioma como um todo.

Conclusões Gerais

- As duas espécies apresentaram potenciais para estudos dendrocronológicos;
- Os anéis de crescimento e as áreas de vaso do lenho inicial das duas espécies são influenciados pelas precipitações e temperaturas mensais;
- O $\delta^{13}\text{C}$ da α -celulose das duas espécies registra sinais climáticos da estação de crescimento corrente e da imediatamente anterior, sugerindo que a espécie acumule reservas de carbono na estação de crescimento;
- *H. courbaril* possui valores médios de eficiência intrínseca do uso da água (W_i) maiores do que *H. stigonocarpa*;
- *H. stigonocarpa* possui uma tendência de elevação do W_i ao longo das últimas cinco décadas como uma consequência da elevação das concentrações atmosféricas de CO_2 . Essa tendência não foi encontrada em *H. courbaril*;
- *H. stigonocarpa* possui anéis de crescimento significativamente menores que os de *H. courbaril*, o que mostra que as taxas de crescimento radial da porção aérea daquela espécie é inferior, o que chama a atenção para a ameaça a sua conservação e, possivelmente, do bioma do cerrado na qual está inserida.

Resumo

O desenvolvimento das atividades humanas está ocorrendo a um alto custo ambiental. A elevação das concentrações atmosféricas de CO₂ e as mudanças no uso do solo estão desencadeando mudanças relevantes no clima global. O objetivo deste trabalho é determinar, por meio da largura dos anéis de crescimento, áreas de vasos e isótopos estáveis de carbono, como as espécies de jatobá: *Hymenaea courbaril* L. (de mata) e *Hymenaea stigonocarpa* Mart ex. Hayne (de cerrado) estão respondendo às mudanças do clima. Foram coletadas amostras do tronco principal de 12 indivíduos de *H. stigonocarpa* e 11 de *H. courbaril*. As amostras foram polidas e os anéis de crescimento foram identificados, datados e medidos. As cronologias foram construídas utilizando os programas COFECHA e ARSTAN. Com os anéis datados, foram medidas as áreas de vaso do lenho inicial de cada anel e também foram obtidas amostras de α -celulose dos anéis de crescimento para a análise de $\delta^{13}\text{C}$ e cálculo da eficiência intrínseca do uso da água (W_i). Os resultados mostram que, a largura dos anéis de *H. courbaril* sofre influência positiva da precipitação, e negativa da temperatura, no final da estação de crescimento. Já as áreas de vaso são influenciadas positivamente pela precipitação do meio da estação de crescimento e negativamente pela temperatura da estação seca antes do início do crescimento. Para *H. stigonocarpa*, a largura do anel de crescimento sofre influência positiva da precipitação, e negativa da temperatura, durante a estação seca anterior ao início do crescimento. Já as áreas de vaso são influenciadas positivamente pela precipitação do início da estação seca anterior à estação de crescimento e negativamente pela temperatura no início do crescimento. Em relação ao $\delta^{13}\text{C}$, as duas espécies mostraram uma influência do clima da estação de crescimento corrente e também da imediatamente anterior. Além disso, *H. stigonocarpa* possui uma tendência de elevação do W_i nas últimas cinco décadas que não foi encontrada em *H. courbaril*. Os resultados mostram que as espécies respondem a diferentes pressões ambientais, e isso levará a respostas diferentes em cenários de mudanças climáticas. Nesses cenários, as duas espécies podem ser prejudicadas, mas *H. courbaril*, possivelmente, sofrerá mais. Porém, existe outra pressão imediata sobre as espécies, que é o desmatamento. A análise das taxas de crescimento pode auxiliar as tomadas de decisão em projetos que envolvam supressão das matas e cerrados. Nesse contexto, *H. stigonocarpa* possui uma taxa de crescimento média 2.4x menor que a de *H. courbaril*, mostrando o maior tempo que essa espécie leva para atingir um tamanho maduro.

Abstract

The development of human activities is taking place at a high environmental cost. The increasing atmospheric CO₂ concentrations and changes in land-use are unleashing relevant changes in global climatic. The objective of this study is to determinate how *H. courbaril* L. (from forest) and *H. stigonocarpa* Mart ex. Hayne (from cerrado) are responding to the climatic change through tree-ring width, vessel area and stable carbon isotope analysis. Twelve specimens of *H. stigonocarpa* and eleven of *H. courbaril* were sampled. Then, samples were polished and tree-rings were identified, dated, measured and chronologies were built using COFECHA and ARSTAN softwares. With tree-rings dated, early wood vessel areas were measured and α -celluloses were sampled from wood of each tree-ring to $\delta^{13}\text{C}$ analysis and intrinsic water-use efficiency estimation (W_i). The results shows that tree-ring width in *H. courbaril* are positively related with the precipitation, and negatively related to temperature, during the end of growth period. Also, vessel areas are positively related to precipitation during the middle growth period and negatively related with temperature during the dry season previous to growth period. Tree-rings width in *H. stigonocarpa* were positively related to precipitation during dry season previous to growth period and were negatively related to temperature during the same period. Also, vessel areas were positively related to precipitation during the beginning of dry season, previous to the current growth period, and negatively related to temperature during the beginning of growth period. In relation to $\delta^{13}\text{C}$, climate signals were found during the current growth period and the previous one. Beyond that, *H. stigonocarpa* showed a clear increasing trend on W_i during the last five decades, that was not found in *H. courbaril*. The results indicate that these species respond to different environmental demands, and that shall lead to different responses regarding the climatic change scenarios. In these scenarios, both species shall be negatively influenced, which will be probably worse in *H. courbaril*. But, there is another immediate pressure on both species that is related with deforestation. The growth ratio analysis can help policy-makers in projects that have forest and cerrado suppression. In this context, *H. stigonocarpa* has a mean growth ratio 2.4x smaller than *H. courbaril*, what implicates longer time for those species reach a mature size.