

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

**CRESCIMENTO DE OITO ESPÉCIES MADEIREIRAS SOB DUAS
CONDIÇÕES DE PLANTIO: A PLENO SOL E SOB DOSSEL DA
RESTAURAÇÃO FLORESTAL**

MARINA PÉROLA ZERBINATO JOSÉ

ARARAS
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

**CRESCIMENTO DE OITO ESPÉCIES MADEIREIRAS SOB DUAS
CONDIÇÕES DE PLANTIO: A PLENO SOL E SOB DOSSEL DA
RESTAURAÇÃO FLORESTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agricultura e Ambiente da Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Discente: Marina Pérola Zerbinato José

Orientador(a): Dra. Kayna Agostini

ARARAS
2023

Zerbinato José, Marina Pérola

Crescimento de oito espécies madeireiras sob duas condições de plantio: a pleno sol e sob dossel da restauração florestal / Marina Pérola Zerbinato José -- 2023.
61f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras
Orientador (a): Kayna Agostini
Banca Examinadora: Samir Gonçalves Rolim, Roberta Cornélio Ferreira Nocelli
Bibliografia

1. Restauração florestal. 2. Silvicultura de nativas. 3. Mata Atlântica. I. Zerbinato José, Marina Pérola. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8
7083



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Agrárias
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Marina Pérola Zerbinato José, realizada em 17/08/2023.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Kayna Agostini (UFSCar)

Prof. Dr. Samir Gonçalves Rolim (UFES)

Profa. Dra. Roberta Cornélio Ferreira Nocelli (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente.

À minha mãe, que foi à todas as reuniões e que caminhou comigo até a escola, todos os dias da minha infância; e ao meu pai, que me deu todos os materiais escolares e todas as enciclopédias que eu precisei.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, ao Prof. Dr. Ricardo Viani, pela orientação e por acreditar no meu trabalho, dentro e fora da UFSCar. À Profa. Dra. Kayna Agostini por assumir a presidência da banca e possibilitar a defesa dessa dissertação.

Também gostaria de agradecer aos professores Dr. Samir Rolim, Dr. Miguel Freitas, Dr. Pedro Brancalion, Dra. Vera Lex, Dra. Valéria Martins, Dr. Jozrael Rezende, Dra. Maria Teresa Abdo e Dra. Anna Hoffmann por se disponibilizarem a participar das bancas que aconteceram ao longo desses 2 anos e meio. A contribuição intelectual de vocês foi valiosa para a conclusão desse trabalho.

Ao LASPEF pelo suporte estrutural e financeiro, a todos os meus colegas de laboratório que colaboraram com as atividades em campo, à Dra. Priscilla Loiola pelo auxílio no momento da análise estatística e ao Dr. Paulo Molin por disponibilizar fotografias aéreas incríveis, e por me instruir no geoprocessamento. Sem a disposição de vocês, a conquista do meu título de mestre não seria possível.

À UFSCar e ao Centro de Ciências Agrárias pela concessão das áreas onde foram realizados os plantios de restauração florestal que compõe essa pesquisa. Ao PPGAA, que me concedeu auxílio financeiro no início do mestrado, em um momento que o recebimento da bolsa era incerto.

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

RESUMO

O plantio de espécies madeireiras nativas é uma atividade econômica crescente e uma questão pertinente, ainda não esclarecida, é qual o melhor momento para inserir árvores madeireiras na restauração florestal. Essas espécies são geralmente tardias e tolerantes à sombra, mas podem responder positivamente em crescimento à maior disponibilidade de luz. O objetivo dessa pesquisa foi testar a hipótese de que o crescimento inicial de árvores madeireiras nativas é mais rápido quando estas são plantadas a pleno sol do que quando plantadas sob dossel florestal estruturado. Para isso, foi avaliado o crescimento relativo em altura e diâmetro à altura do solo, e a mortalidade aos 12 e aos 19 meses após o plantio, de oito espécies nativas da Mata Atlântica, inseridas em duas condições e momentos distintos: a pleno sol, concomitantemente com as espécies pioneiras da restauração, e sob sombreamento natural, no sub-bosque de plantio de restauração florestal com dossel estruturado. Também foi investigado, apenas no plantio sombreado, se o crescimento das mudas se relaciona com a variação dos níveis de luminosidade e de déficit de pressão de vapor (DPV) sobre elas. No geral, as mudas do plantio a pleno sol apresentaram maior crescimento e mortalidade similar às mudas do plantio sombreado, mas ambos os plantios apresentaram altos níveis de mortalidade. Não foi encontrado efeito da variação da luz e do DPV sobre o crescimento da comunidade de árvores, possivelmente pela forma pontual, no espaço e no tempo, da coleta de dados de temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade no sub-bosque, que parece não ser eficaz para este propósito. No entanto, a nível de população, sete das oito espécies tiveram respostas significativas às variações de luminosidade e DPV na área, em algum momento. Os resultados indicam que é melhor plantar as espécies madeireiras em área aberta, concomitantemente com as espécies pioneiras da restauração florestal, quando o objetivo é o rápido crescimento dos indivíduos arbóreos. Para investigar o efeito da variação da luz e do DPV sobre o crescimento de uma comunidade de espécies madeireiras nativas, diferentes métodos devem ser testados, como fotos hemisféricas ou coletas com exposições prolongadas, com uso de sensores *data-logger*. Futuros estudos devem avaliar mudas plantadas nestas diferentes condições, em idades mais avançadas, para compreender as causas da alta mortalidade geral e avaliar a continuidade do crescimento ao longo do tempo, além de investigar a arquitetura dos indivíduos arbóreos e o efeito do

rápido crescimento sobre a densidade da madeira, que são fatores importantes para árvores plantadas com fins de produção de madeira destinada à serraria.

Palavras-chave: Árvores; Madeira; Restauração ecológica; Silvicultura de nativas; Sucessão ecológica; Mata Atlântica.

ABSTRACT

The planting of native timber species is a growing economic activity and a pertinent question, still not clarified, is the best moment to insert timber trees in forest restoration. These species are generally late secondary and shade tolerant, but can respond positively in growth to greater light availability. The objective of this research was to test the hypothesis that the initial growth of native timber species is faster when they are planted in full sun than when planted under a structured forest canopy. We evaluated the relative growth in height and diameter at ground level, and mortality of eight native species of the Atlantic Rainforest, at 12 and 19 months after planting, inserted in two different conditions and moments: in full sun, concomitantly with the pioneer species of the restoration, and under natural shading, in the understory of a forest restoration planting with structured canopy. It was also investigated, only in the shaded planting, whether the seedlings growth is related to the variation in light and vapor pressure deficit levels (VPD) on them. In general, the seedlings from planting in full sun showed higher growth and similar mortality to the seedlings in the shaded plantation, but both presented high levels of mortality. No effect of light and VPD variation was found on tree community growth, possibly due to the punctual way, in space and time, of data collection on temperature, relative air humidity and luminosity in the understory, which seems to not be effective for this purpose. However, at population level, seven of the eight species had significant responses to variations in light and DPV in the area, at some point. The results indicate that it is better to plant timber species in open areas, concomitantly with forest restoration pioneer species, when the objective is the rapid growth of arboreal individuals. To investigate the effect of varying light and VPD on the growth of a community of native timber species, different methods should be tested, such as hemispherical photos or data collections with prolonged exposures, using data-logger sensors. Future studies should evaluate seedlings planted in these different conditions, at more advanced ages, to understand the causes of high general mortality and evaluate the continuity of growth over time, in addition to investigating the architecture of tree individuals and the effect of rapid growth on the wood density, which are important factors for trees planted for the purpose of producing wood destined for sawmills.

Keywords: Tree; Timber; Ecological restoration; Native forestry; Ecological succession; Atlantic Rainforest.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Áreas de restauração florestal na UFSCar, campus Araras	8
Figura 2. Precipitação (mm), temperatura média (°C) e umidade relativa.....	9
Figura 3. Plantio das espécies nativas madeireiras na UFSCar Araras-SP	10
Figura 4. Croqui dos plantios realizados em 2021 no CCA/UFSCar, em Araras - SP.	11
Figura 5. Espécies madeireiras nativas da Mata Atlântica analisadas nesse estudo	12
Figura 6. Coleta de dados de mortalidade	13
Figura 7. Coleta de dados de altura e de diâmetro à altura do solo (DAS)	14
Figura 8. Sensores <i>data-loggers</i> (Hobo) usados para a coleta de dados de luminosidade, temperatura e umidade relativa do ar no plantio sombreado.....	15
Figura 9. Croqui da coleta de dados realizada com os sensores <i>data-logger</i> (Hobo) ...	16
Figura 10. GPS RTK (Real-time Kinematic) utilizado para a coleta de dados de localização no plantio sombreado.....	17
Figura 11. Taxas de crescimento relativo em altura (CR _H) e DAS (CR _{DAS}) por espécie, nos plantios a pleno sol e sombreado, aos 12 e 19 meses após o plantio	22
Figura 12. Mortalidade por espécie (χ^2) e área (teste-t pareado) aos 12 e 19 meses após o plantio	23
Figura 13. Relação da luminosidade (%) e do crescimento (altura e DAS) das mudas arbóreas no plantio sombreado, aos 12 e 19 meses após o plantio.....	26
Figura 14. Relação do DPV (kPa) e do crescimento (altura e DAS) das mudas arbóreas no plantio sombreado, aos 12 e 19 meses após o plantio	27
Figura 15. Mapas interpolados de luminosidade e DPV no plantio sombreado aos 12 e 19 meses após o plantio	28
Figura 16. Mapas interpolados de temperatura e umidade relativa do ar no plantio sombreado aos 12 e 19 meses após o plantio	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados da análise de modelos lineares generalizados (GLM) comparando o crescimento de árvores madeireiras a pleno sol e sob o dossel de árvores pioneiras em plantio de restauração (sombreado).....	19
---	----

Tabela 2. Médias do crescimento relativo por espécie nos plantios a pleno sol e sombreado, e resultado da comparação do desempenho das espécies por condição de plantio e por período..... 20

Tabela 3. Resultados da análise GLM para verificar a interação entre o déficit de pressão de vapor (DPV) e luminosidade (LUX), e as variáveis de crescimento das árvores madeireiras plantadas no sub-bosque de um plantio de restauração 25

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Análises químicas (micro e macronutrientes) e análise física do solo das duas áreas de restauração florestal..... 42

Anexo 2. Espécies arbóreas nativas pioneiras e não-pioneiras plantadas em 2021, em restauração 43

Anexo 3. Espécies arbóreas nativas pioneiras plantadas em 2018, em restauração florestal que hoje constitui a área sombreada desse estudo 43

Anexo 4. Croqui do plantio da restauração com sistema agroflorestal implantado em 2018 no CCA/UFSCar, em Araras - SP 44

Anexo 5. Espécies arbóreas plantadas em 2021 no plantio de enriquecimento de sub-bosque da área sombreada 44

Anexo 6. Espécies madeireiras tardias plantadas em 2021 e selecionadas para compor este estudo 45

Anexo 7. Modelos lineares generalizados (GLM) testados para comparar CR_H e CR_{DAS} entre plantios a pleno sol e sob sombra 46

Anexo 8. Modelos lineares generalizados (GLM) testados para verificar a interação entre variáveis ambientais e variáveis de crescimento em plantio sombreado aos 12 meses após o plantio 47

Anexo 9. Modelos lineares generalizados (GLM) testados para verificar a interação entre variáveis ambientais e variáveis de crescimento em plantio sombreado aos 19 meses após o plantio 48

Anexo 10. Mortalidade geral (%) de mudas de espécies arbóreas nativas plantadas a pleno sol e sob sombreamento natural e comparação entre as áreas da proporção de mudas mortas 49

Anexo 11. Comparação entre áreas da proporção de mudas mortas de cada espécie. ... 49

SUMÁRIO

1. Introdução e justificativa	1
1.1. Geração de produtos florestais madeireiros no Brasil	1
1.2. Silvicultura de espécies nativas e o PP&D-SEN	2
1.3. Oportunidades e lacunas na restauração florestal brasileira	3
1.4. Influência de fatores ambientais e sucessionais no crescimento de espécies madeireiras do Brasil em plantios de restauração florestal.....	5
2. Objetivo	7
3. Objetivos específicos	7
4. Material e métodos	8
4.1. Área de estudo e manejos	8
4.2. Área a pleno sol	9
4.3. Área de sombreamento natural	10
4.4. Espécies avaliadas.....	11
4.5. Coleta de dados	13
4.6. Análise dos dados	17
5. Resultados	18
5.1. Plantio a pleno sol <i>versus</i> Plantio sombreado.....	18
5.2. Relação da variação ambiental com o crescimento sob sombreamento natural ..	24
6. Discussão	29
7. Conclusão	33
8. Referências	34
9. Anexos	42

1. Introdução e justificativa

1.1. Geração de produtos florestais madeireiros no Brasil

A flora brasileira abriga mais de 8.000 espécies arbóreas e cerca de 14,5% da riqueza de árvores conhecidas do mundo (BEECH *et al.*, 2017). Lorenzi (1992), Carvalho (2003b; 2006; 2008; 2010; 2014) e Rolim e Piotto (2018) apontam para o potencial madeireiro de centenas de espécies de árvores nativas do Brasil. O país é uma potência mundial na geração de produtos florestais madeireiros e não madeireiros e na provisão de serviços ecossistêmicos florestais, com cerca de 488 milhões de hectares de floresta nativa e 9,93 milhões de hectares de florestas plantadas (PAYN *et al.*, 2015; SFB, 2019; IBÁ, 2022).

Atualmente, a maior parte da oferta mundial e brasileira de madeira tropical vem de florestas naturais (ROLIM *et al.*, 2019). Em 2021, a área desmatada no Brasil foi de 1.655.782 hectares, sendo 98% dessa área desmatamento ilegal. Entre 2019 e 2021, a agropecuária (incluindo produção madeireira) foi a causa de 97,8% dos desmatamentos registrados (AZEVEDO *et al.*, 2022). No entanto, apesar dos altos índices de desmatamento e da crescente demanda global por madeira tropical serrada, a oferta de madeira nobre advinda do manejo florestal na Amazônia tem caído nas últimas décadas (ROLIM *et al.*, 2019; LENTINI *et al.*, 2020).

A produção de madeira de espécies nativas do Brasil em plantios econômicos é uma estratégia com potencial para suprir a demanda por madeira tropical e frear o desmatamento de florestas brasileiras, no entanto, mais de 94,4% dos plantios florestais no Brasil são de espécies exóticas de *Eucalyptus* e *Pinus*, plantadas principalmente para a produção de celulose, energia e painéis processados (ROLIM *et al.*, 2019; IBÁ, 2022). Isso se deve, majoritariamente, aos rendimentos e sistemas de gestão consolidados para a produção de madeira exótica, graças a avanços científicos e tecnológicos nos últimos 40 anos de investimento em programas de Pesquisa e Desenvolvimento (ROLIM *et al.*, 2019).

O investimento no setor de reflorestamento com espécies exóticas, no Brasil, é de cerca de US\$ 35 bilhões, enquanto o investimento em plantios econômicos de espécies nativas está próximo a zero (ROLIM *et al.*, 2019), o que limita o desenvolvimento sustentável da indústria de madeira tropical no país. Diante disso, em 2021, a Coalizão Brasil, composta por mais de 200 organizações privadas e civis, lançou o PP&D-SEN, no

intuito de consolidar a silvicultura de espécies nativas e impulsionar o setor madeireiro no Brasil, de forma semelhante ao que aconteceu com o setor de madeira exótica (PIOTTO *et al.*, 2021).

1.2. Silvicultura de espécies nativas e o PP&D-SEN

Os estudos nacionais acerca da utilização de espécies nativas da Mata Atlântica em plantios silviculturais existem desde a década de 1930, com destaque para projetos desenvolvidos nos Estados de São Paulo e Paraná. Na década de 1960, vários plantios experimentais de espécies arbóreas nativas para fins econômicos foram implantados no território brasileiro e, em 1982, no Congresso Nacional de Essências Nativas, os resultados obtidos nesses experimentos foram divulgados (ROLIM; PIOTTO, 2018). Apesar do interesse de longa data, a ausência de investimentos em tecnologia e ciência, e de políticas e linhas de créditos específicas, levam a baixa adoção da silvicultura de espécies nativas por produtores rurais (ROLIM; PIOTTO, 2018).

Outro fator limitante, é a maior complexidade dos sistemas silviculturais com espécies nativas, geralmente mistos, em relação aos sistemas de monocultura (LIU *et al.*, 2018), normalmente utilizados para as espécies exóticas. A complexidade vem da interação de duas ou mais espécies em uma área e da escassez do conhecimento técnico referente ao manejo desses plantios, além da variedade no comportamento dentro de uma única espécie plantada em regiões diferentes (NGUYEN *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2015a; ROLIM *et al.*, 2019). Logo, para tornar o uso de espécies nativas viável para o produtor rural, e impulsionar as políticas e investimentos do setor, é importante compreender melhor o comportamento das espécies madeireiras do Brasil em áreas produtivas (ROLIM *et al.*, 2019).

Diante dessa necessidade, foi lançado pela Coalizão Brasil (aliança entre universidades públicas e agências de pesquisa com especialidade em florestas, empresas florestais e o governo), em 2021, o PP&D-SEN pré-competitivo. O programa possui estrutura interdisciplinar apoiada em três pilares: a pesquisa, a capacitação (acadêmica e de extensão) e a comunicação; e com três grandes temas prioritários: a produção florestal, o meio ambiente e a paisagem, e as dimensões humanas (PIOTTO *et al.*, 2021).

A base conceitual do P&D foi elaborada por pesquisadores e especialistas em espécies florestais nativas e publicada em 2019. Para isso, os envolvidos revisaram a

literatura científica existente sobre silvicultura de espécies arbóreas nativas, selecionaram 30 espécies da Mata Atlântica e/ou da Amazônia com potencial madeireiro, identificaram suas principais lacunas do conhecimento e as prioridades de pesquisa, e quantificaram o investimento necessário e o retorno econômico a curto, médio e longo prazos. Os resultados indicam que são necessários investimentos de US\$ 3,8 milhões a US\$ 7,3 milhões, o que representa menos de 0,05% do investimento em P&D no Brasil e que, para cada dólar investido em P&D, é possível obter US\$ 2,39 de retorno (ROLIM *et al.*, 2019).

Em 2021, na publicação de lançamento do PP&D-SEN, também foram definidas as prioridades de ação para a implementação do programa. São elas: (a) estruturação da Rede Seld (Rede Sítios de Estudo de Longa Duração) que, na sua fase inicial, implementará 20 sítios de estudo de longa duração, com 15 hectares cada, em quatro regiões (Sul, Sudeste, Norte e Nordeste); (b) estruturação de um banco de dados aberto para a consulta de dados e resultados de pesquisas; (c) padronização mínima do delineamento amostral de experimentos, com escala espaço-temporal regional e com flexibilidade em experimentos com escala espaço-temporal local. Logo, com a implantação do PP&D-SEN, a silvicultura de espécies nativas gerará diversos benefícios para a sociedade, com a geração de empregos e o aumento da renda, e para o ambiente, promovendo, por exemplo, o sequestro de carbono e aumento da biodiversidade (ROLIM *et al.*, 2019).

1.3. Oportunidades e lacunas na restauração florestal brasileira

A degradação florestal no Brasil, historicamente, está associada à produção de *commodities* (CURTIS *et al.*, 2018). Especificamente na Mata Atlântica, o desmatamento em função da expansão agrícola e urbana, resultou na remanescência de apenas 12,4% da sua área original (SOS MATA ATLÂNTICA, 2021). Entre os anos de 1989 e 2018, foi observada uma estabilidade relativa na cobertura de vegetação nativa do bioma, variando entre 28 e 30 milhões de hectares, no entanto, a fragmentação dos remanescentes florestais que ameaça a sua importante biodiversidade, classifica a Mata Atlântica como um *hotspot* mundial, com muitas oportunidades para a prática da restauração florestal (NANNI, *et al.*, 2019; ROSA *et al.*, 2021).

Em 2015, durante a COP 21, realizada em Glasgow, o Brasil se comprometeu a restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares até 2030, a fim de colaborar com a agenda

climática. O mesmo compromisso foi anunciado em 2017, para integrar as metas do Bonn Challenge, que visa restaurar 350 milhões de hectares de paisagens e florestas em todo o mundo até 2030 (DOCKENDORFF *et al.*, 2022). Na Década da ONU da Restauração de Ecossistemas (2021-2030), a restauração florestal, inclusive aquela com perspectiva de geração de renda, é parte importante da estratégia brasileira para cumprir tais metas de restauração ecológica (PIOTTO *et al.*, 2021; DOCKENDORFF *et al.*, 2022). Uma iniciativa nacional de referência, é o Pacto pela Restauração da Mata Atlântica, que se comprometeu a restaurar 15 milhões de hectares de florestas do bioma até 2050 (ROSA *et al.*, 2021).

Estima-se que o Brasil tenha entre 30 e 70 milhões de hectares de áreas de baixa aptidão agrícola, entre pastagens degradadas, relevos muito declivosos e áreas protegidas por lei (DIAS-FILHO, 2014; STRASSBURG *et al.*, 2014). Estas, quando manejadas adequadamente, podem ser usadas estrategicamente no cumprimento das metas internacionais e nacionais de restauração ecológica (DOCKENDORFF *et al.*, 2022) e na regularização florestal de propriedades rurais, em conformidade com a Lei de Proteção da Vegetação Nativa (nº. 12.651 de 2012) (BRASIL, 2012; SOS MATA ATLÂNTICA, 2016).

Logo, é notável que são várias as oportunidades e necessidades de se praticar a restauração florestal no Brasil, mas há fatores limitantes que devem ser superados. Estão entre eles a governança ambiental enfraquecida, o conhecimento técnico, tecnológico e científico limitado, a necessidade de melhorias nas etapas de implementação e monitoramento, e a falta de recursos financeiros aplicados na cadeia da restauração (DOCKENDORFF *et al.*, 2022). Para preencher essas lacunas do conhecimento e tornar a restauração uma atividade economicamente competitiva e atrativa para proprietários rurais, é necessário traçar e aplicar novas estratégias, como, por exemplo, o uso de espécies nativas que forneçam produtos florestais madeireiros e não madeireiros na restauração florestal, para gerar rentabilidade nas áreas restauradas e justificar o investimento (BRANCALION *et al.*, 2012; PIÑA-RODRIGUES *et al.*, 2021).

1.4. Influência de fatores ambientais e sucessionais no crescimento de espécies madeireiras do Brasil em plantios de restauração florestal

Embora já tenhamos informações sobre as principais espécies nativas com potencial para cultivo madeireiro na Mata Atlântica, uma questão pertinente, ainda não claramente respondida, é o melhor momento para inserir essas espécies em plantios florestais, especialmente naqueles que devem atender também ao propósito de restauração florestal (SILVA, 2013; ROLIM; PIOTTO, 2018; ROLIM, *et al.*, 2019).

Isso acontece, pois, além da variação no padrão de crescimento entre espécies arbóreas, mesmo entre as que pertencem ao mesmo grupo sucessional, fatores ambientais, como luminosidade, temperatura e umidade do ar, variam com diferentes níveis de cobertura da área do plantio florestal. Tal variação afeta o movimento estomático das plantas e, conseqüentemente, influencia o processo fotossintético (HETHERINGTON; WOODHARD, 2003). Logo, indivíduos da mesma espécie podem se aclimatar às condições ambientais às quais estão submetidos e se comportar de forma diferente ao longo de suas vidas (WHITMORE, 1975; KAGEYAMA, 1989; SILVA *et al.*, 2007; PARRESOL; DEVAL, 2013; ROLIM *et al.*, 2018; BARROS, 2019; AIMI, *et al.*, 2020). No entanto, como pontuado por KAGEYAMA (1989), há uma lacuna no conhecimento sobre a aclimatação de espécies arbóreas tropicais, em especial nos primeiros anos de desenvolvimento, durante o estabelecimento da planta em campo. Hoje, tal lacuna perdura e se expande quando há também o propósito de produção de madeira nativa (ROLIM *et al.*, 2019).

A luz, além de ser um recurso limitante para a sobrevivência, o crescimento e a reprodução vegetal, também é, possivelmente, o recurso natural que tem a maior variação na sua disponibilidade ao longo do dia (CHAZDON *et al.*, 1996). Os níveis de luminosidade e de radiação fotossinteticamente ativa variam mesmo em áreas abertas devido às mudanças nas condições atmosféricas, mas variam especialmente sob o dossel de florestas, onde predomina a luz difusa devido a existência de *sunflecks* somados às mudanças da posição do sol, determinada pela estação do ano (declinação solar) e pelo horário do dia (elevação solar) (CHAZDON *et al.* 1996; SMITH; BERRY, 2022; WAY; PEARCY, 2022).

As espécies madeireiras, em especial as espécies analisadas nesse estudo, raramente possuem tendência ao pioneirismo, sendo majoritariamente espécies

secundárias tardias e/ou clímax, com algum grau de tolerância à sombra e com maior eficiência no uso de luz em locais com baixa incidência luminosa, resultando em uma grande variação em relação à exigência de luz nos diferentes estágios do crescimento (WHITMORE, 1975; CHAZDON *et al.*, 1996; RÊGO; POSSAMAI, 2001; SILVESTRINI *et al.*, 2007; CARVALHO, 2002; 2003a; 2003b; 2005; 2010). Dessa forma, mudas dessas espécies podem persistir por muitos anos na sombra do dossel de florestas nativas ou plantadas, crescendo muito lentamente, tanto em altura quanto em diâmetro, mas as mesmas espécies também podem responder positivamente em crescimento à maior disponibilidade de luz das áreas abertas quando estas possuem maior plasticidade e/ou níveis maiores de compensação e saturação luminosa (WHITMORE, 1975; KAGEYAMA, 1989; CHAZDON *et al.*, 1996; SOUZA; VÁLIO, 2003; SANTOS *et al.*, 2006; SILVESTRINI *et al.*, 2007; DURIGAN; RAMOS, 2013; BARROS, 2019; PIOTTO *et al.*, 2020; GUNATILLEKE *et al.*, 2023).

Além da luminosidade, o déficit de pressão de vapor (DPV) também é um fator ambiental que limita o desenvolvimento de mudas de espécies arbóreas em plantios florestais. O DPV é a combinação da umidade relativa do ar (UR) e da temperatura (°C) em um único valor. Quanto menor a umidade relativa do ar, maior o DPV, ou seja, maior o potencial da atmosfera capturar e forçar a saída de água da planta, e até secá-la completamente, caso não haja fontes de água disponíveis (EAMUS *et al.*, 2013; CÁRCER *et al.*, 2017). Além da saída de água da planta, o aumento do DPV gera respostas fisiológicas, como o fechamento dos estômatos das folhas para minimizar a perda de água para a atmosfera, o que diminui a absorção de carbono e a fotossíntese, afetando o desenvolvimento, o estabelecimento e a sobrevivência dos indivíduos (CARNICER *et al.*, 2013; EAMUS *et al.*, 2013; CÁRCER *et al.*, 2017).

Assim, se por um lado plantar essas espécies a pleno sol concomitantemente com as demais espécies da restauração florestal pode ser logisticamente mais fácil e, em muitos casos, promover maiores taxas de crescimento, por outro lado, os indivíduos arbóreos podem ser impactados negativamente e apresentar maiores taxas de mortalidade relacionadas ao aumento do DPV e a maior exposição do solo à luz, diminuindo a disponibilidade de água do ambiente para as mudas (SCHULZE, 2008; SOUZA, *et al.*, 2010; WANGINIAK, 2016; CÁRCER *et al.*, 2017).

2. Objetivo

Testar a hipótese de que o crescimento inicial de espécies madeireiras não pioneiras é mais rápido quando estas são plantadas a pleno sol do que quando plantadas sob dossel florestal já estruturado, pois a pleno sol a maior intensidade luminosa favorece o crescimento inicial das mudas.

3. Objetivos específicos

- a.** Avaliar e comparar o crescimento inicial (altura total e diâmetro à altura do solo) e a mortalidade inicial de mudas de oito espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica com potencial madeireiro, em duas condições distintas: 1) a pleno sol; 2) em sombreamento natural, sob dossel estruturado de um plantio de restauração florestal.
- b.** Relacionar o crescimento das mudas plantadas sob sombreamento natural com a luminosidade e o déficit de pressão de vapor mensurado pontualmente sobre cada muda em duas épocas do ano, para avaliar se estas variáveis ambientais influenciam o crescimento inicial de espécies madeireiras;

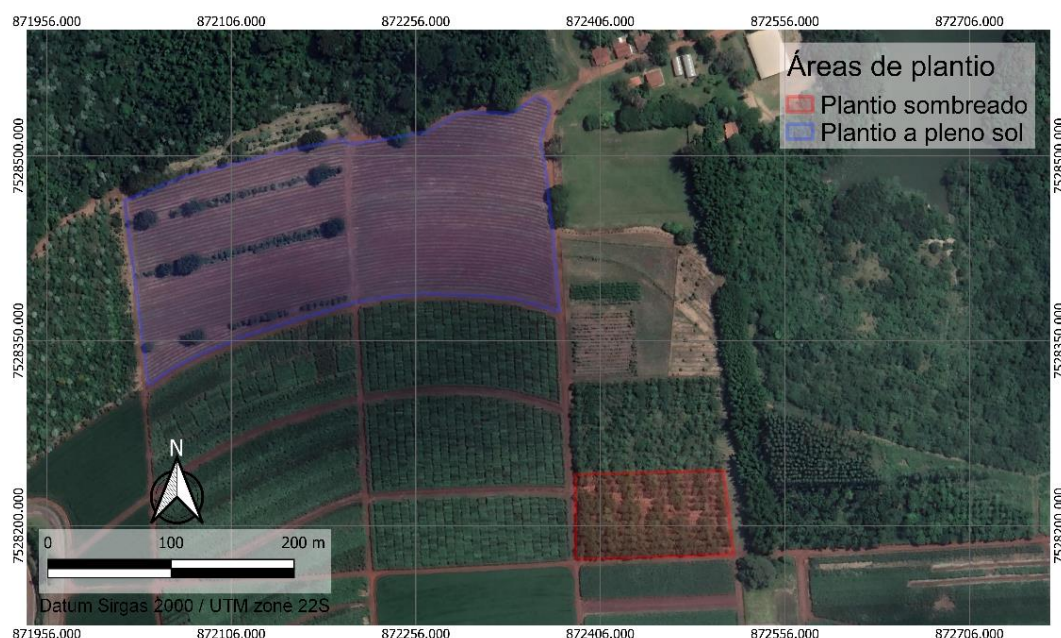
4. Material e métodos

4.1. Área de estudo e manejos

O estudo foi realizado em duas áreas de restauração florestal a menos de 300 m uma da outra, que compõem a área de Reserva Legal do Centro de Ciências Agrárias da UFSCar, em Araras - SP (Figura 1). A vegetação original da região do Campus é composta, predominantemente, pela Floresta Estacional Semidecidual (IBGE, 2012).

O solo do local do estudo é classificado como NVdf: Nitossolo Vermelho Distroférico latossólico; textura argilosa; A proeminente; caulínico – oxidico; catiônico (YOSHIDA; STOLF, 2016). As análises físico-químicas do solo das duas áreas têm fertilidade (M.O.) e textura similares (Anexo 1).

Figura 1. Áreas de restauração florestal na UFSCar, campus Araras.

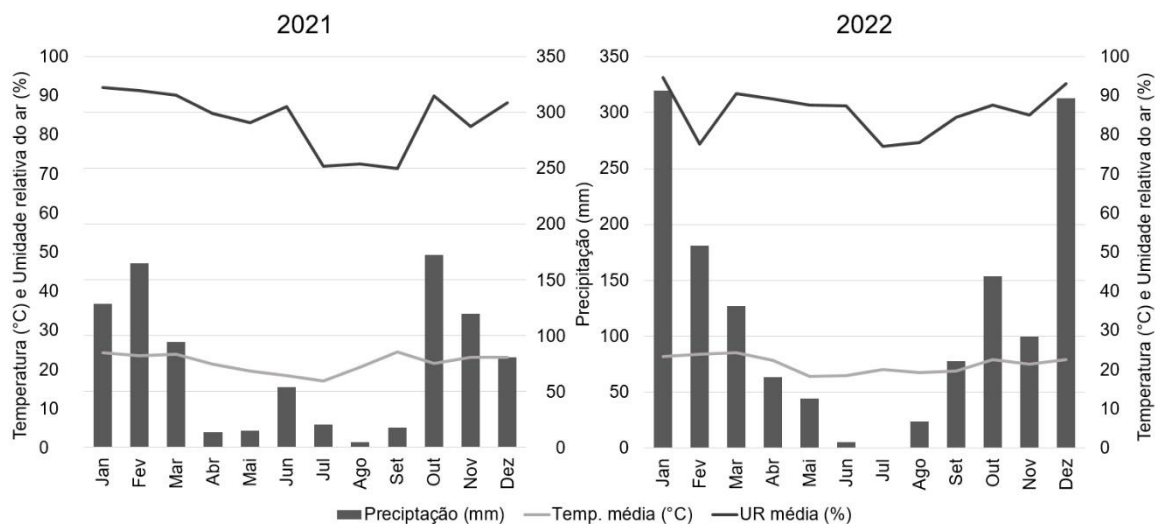


Fonte: a autora.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da cidade de Araras - SP é Cwa, subtropical de inverno seco ($< 18^{\circ}\text{C}$) e verão quente ($> 22^{\circ}\text{C}$). Nos anos de 2021 e 2022, o período em que foi realizado esse estudo, as temperaturas médias anuais foram de $21,7^{\circ}\text{C}$ e $21,4^{\circ}\text{C}$, com taxas de umidade relativa do ar em 83,8% e 86,1%, respectivamente (Figura 2). A precipitação total anual da região de Araras - SP é de, aproximadamente, 1.433 mm, com o período de chuvas concentrado entre outubro e março (ALVARES *et al.*, 2013). No primeiro ano de coleta de dados, em 2021, a

precipitação média anual de 884 mm, registrada pela Estação Meteorológica Automática (EMA) do Centro de Ciências Agrárias, em Araras – SP, foi muito abaixo do que a média observada para o clima Cwa, mas em 2022 as chuvas se aproximaram dos valores históricos, atingindo 1.408 mm/ano (Figura 2).

Figura 2. Precipitação (mm), temperatura média (°C) e umidade relativa do ar média (%) no período do estudo (2021/2022).



Em ambos os plantios foram realizados manejos de rega, com 5 L de água por planta, de controle de formigas, com iscas a base de sulfuramida, e de gramíneas invasoras, mecanicamente, com o uso de enxada e roçadeira, ou quimicamente, com a aplicação de glifosato. Até os 6 meses após o plantio houve diferença, entre os plantios, na frequência desses manejos. Após esse período, não foram realizadas novas regas, nem controle de formigas-cortadeiras, e as gramíneas invasoras foram controladas na mesma época. A adubação das mudas plantadas em 2021, em ambas as áreas, foi realizada 2 meses após o plantio, em ambas as áreas, com 75 g de adubo formulado N:20%-P:0%-K:20%, distribuídos em círculo na coroa das mudas, visando fornecer a cada plântula, nitrogênio (15 g) e potássio (12,5 g) em cobertura.

4.2. Área a pleno sol

O plantio a pleno sol das árvores madeireiras tardias foi realizado de 10 a 16 de fevereiro de 2021, concomitantemente com o das espécies arbóreas pioneiras que compõem a restauração florestal, em uma área de aproximadamente 3,11 ha (Figura 3a;

4a). No total, foram plantadas 26 espécies (Anexo 2), entre pioneiras e tardias, em 98 linhas de plantio, com espaçamento de 2 m entre mudas e 3 m entre linhas.

Figura 3. Plantio das espécies nativas madeireiras na UFSCar Araras-SP, em fevereiro e março de 2021. **(a)** plantio sombreado sob o dossel de um plantio de restauração de 2018; **(b)** plantio a pleno sol.

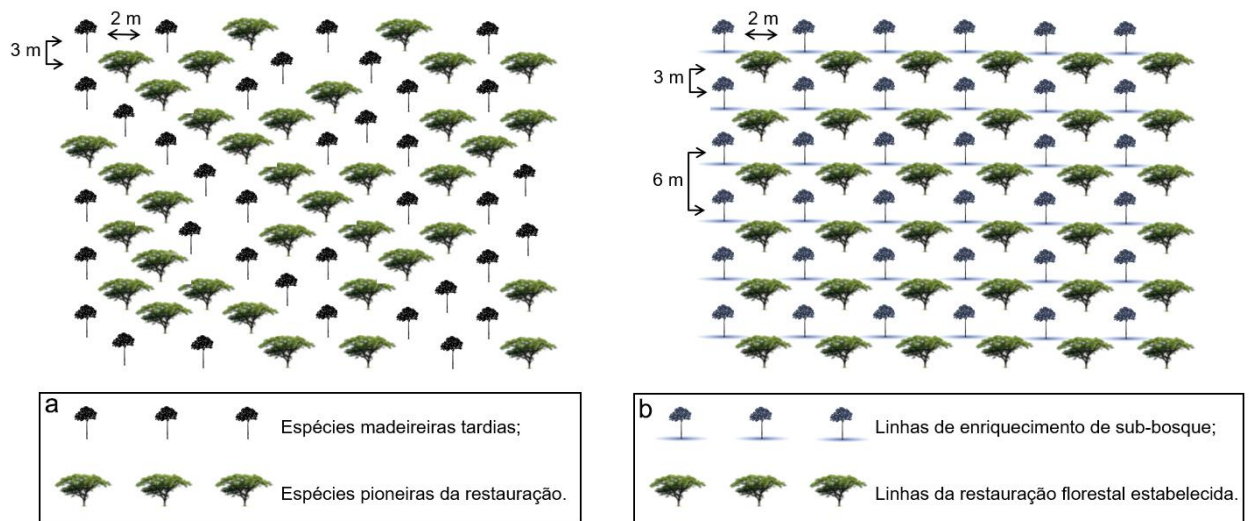


4.3. Área de sombreamento natural

A restauração florestal estabelecida, que forneceu o sombreamento natural, foi implantada em 2018, originalmente sendo um sistema agroflorestal experimental, constituído por seis blocos com tratamentos mecânicos e químicos de controle de daninhas. Foram plantadas na área 10 espécies arbóreas pioneiras (Anexo 3), no espaçamento de 6 m entre linhas e 2 m entre plantas, e mudas de café da variedade Catuaí-144 na mesma linha, entre as espécies florestais (Anexo 4) (REZENDE, 2019). O plantio de enriquecimento de sub-bosque sob o dossel da restauração florestal, onde foram incluídas algumas espécies madeireiras tardias, foi conduzido em 2 de março de 2021, ocupando, aproximadamente, 0,86 ha. As árvores pioneiras da restauração já estavam com 3 anos no momento do plantio de enriquecimento e com copas estabelecidas,

sombreado o solo da área, havendo a existência de *sunflecks* causados por aberturas no dossel e pelo movimento dos galhos das árvores (Figura 3b). As mudas foram plantadas aproximadamente 2 m de distância entre si na linha e 6 m na entrelinha, porém, com as linhas das árvores pioneiras entre elas, resultando no espaçamento geral do plantio, de 2 x 3 m. No total, foram plantados 616 indivíduos arbóreos de 17 espécies nativas (Anexo 5), em 11 linhas de plantio, inseridas nas entrelinhas do plantio inicial (Figura 4b).

Figura 4. Croqui dos plantios realizados em 2021 no CCA/UFSCar, em Araras - SP. (a) plantio a pleno sol; (b) plantio sob sombreamento natural.



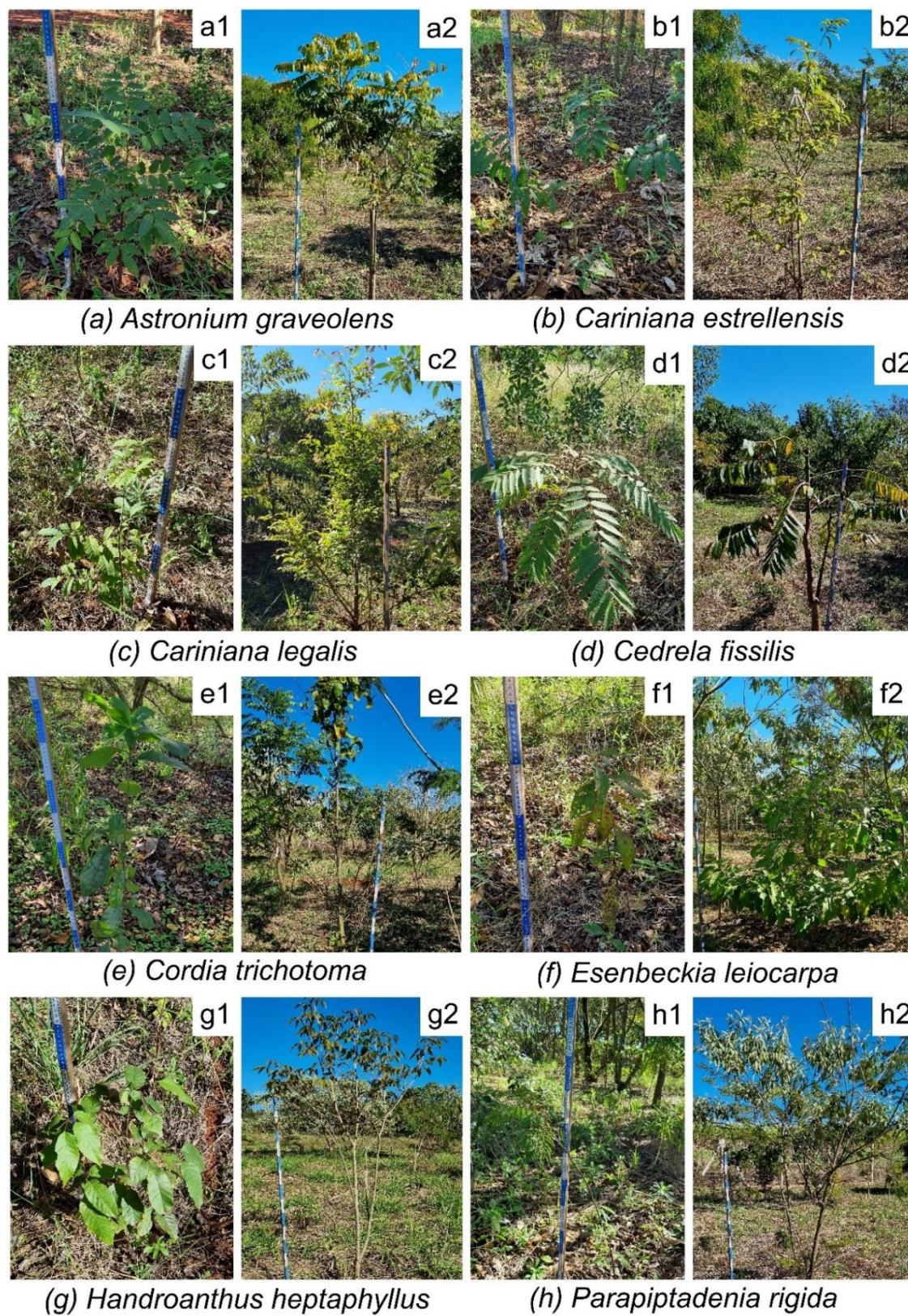
Fonte: a autora.

4.4. Espécies avaliadas

Para compor esse experimento, foram selecionadas oito espécies madeireiras tardias (Anexo 6), atendendo aos seguintes critérios: apenas as espécies com disponibilidade suficiente no viveiro de mudas no momento do plantio, que estão presentes em ambas as áreas de restauração florestal com pelo menos 44 indivíduos e com potencial madeireiro comprovado (Figura 6).

Todas as espécies selecionadas já foram citadas por diversos autores como espécies madeireiras úteis para vários fins, como marcenaria, construção civil e naval (LORENZI, 1992; CARVALHO, 2002; 2003a; 2005; CAMPOS FILHO; SARTORELLI, 2015; PIÑA-RODRIGUES; SILVA, 2021), e algumas delas são espécies prioritárias no PP&D-SEN, lançado pela Coalizão Brasil em abril de 2021.

Figura 5. Espécies madeireiras nativas da Mata Atlântica analisadas nesse estudo, fotografadas em julho de 2023. (1) plantio sombreado; (2) plantio a pleno sol.



4.5. Coleta de dados

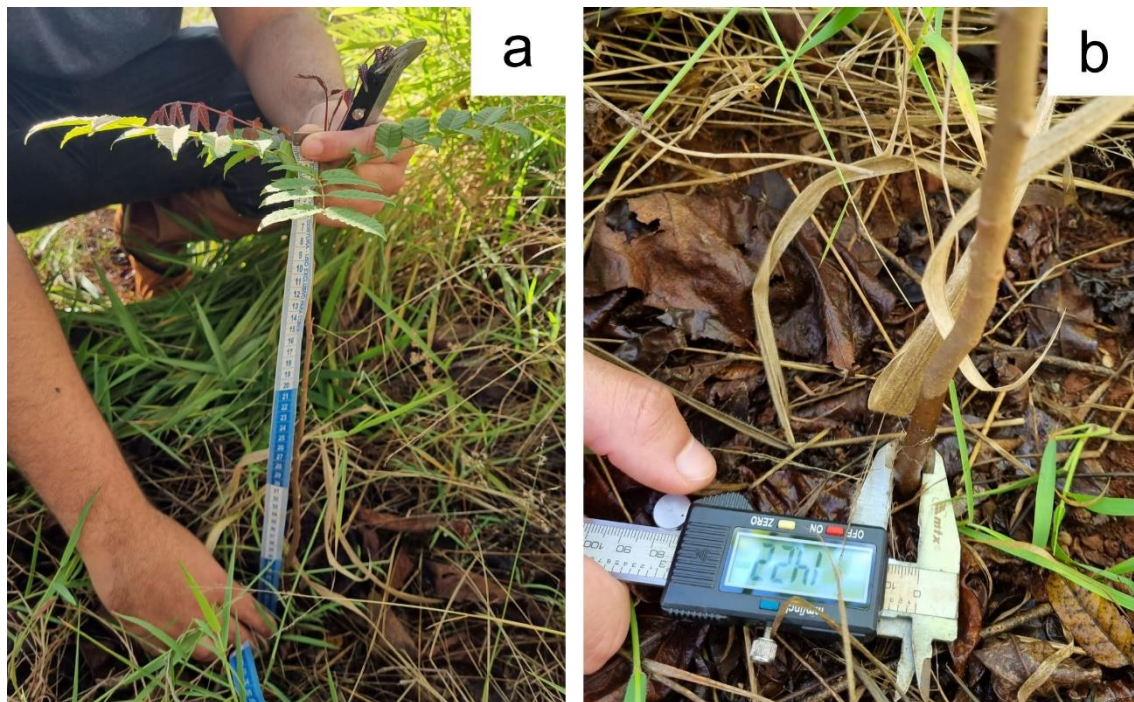
Três avaliações de mortalidade das mudas foram realizadas, aos 6, 12 e 19 meses após o plantio. Foram consideradas mortas as mudas secas e com o caule abaixo da casca também seco, mediante observação após raspagem com a unha (Figura 7).

Figura 6. Coleta de dados de mortalidade. **(a)** muda morta, com caule seco abaixo da casca; **(b)** muda viva, com caule verde abaixo da casca.



O diâmetro à altura do solo (DAS) das mudas foi medido com paquímetro digital, já a altura foi coletada com o auxílio de fita métrica para medir o comprimento do caule em sua posição natural, desde o nível do solo até a inserção da última folha (Figura 8) (ENCINAS; SILVA; TICCHETTI, 2002). Essas variáveis foram coletadas em todos os indivíduos vivos de cada espécie em cada área, aos 12 meses (fevereiro/março de 2022, fim da estação chuvosa) e aos 19 meses após o plantio (setembro/outubro de 2022, fim da estação seca).

Figura 7. Coleta de dados de (a) altura e de (b) diâmetro à altura do solo (DAS) das espécies madeireiras nativas, realizadas aos 12 e 19 meses após o plantio.



Para se obter as médias de altura e DAS das mudas no momento do plantio, foram medidas 20 mudas de cada espécie do lote de mudas destinado aos plantios. Todas as mudas foram adquiridas com o mesmo fornecedor e cada espécie era composta de um lote único, com mudas de mesma idade e porte, o que minimiza as diferenças interespecíficas iniciais, fenotípicas e de desenvolvimento (THOMAS *et al.*, 2014). De forma a relativizar o crescimento por período, foi calculado o crescimento relativo (CR) das variáveis altura (CR_H) e diâmetro à altura do solo (CR_{DAS}), usando as seguintes equações (BARROS, 2019):

$$CR_H = \frac{H_f - H_i}{H_i} \qquad CR_{DAS} = \frac{DAS_f - DAS_i}{DAS_i}$$

Onde:

H_i = altura inicial (antes do plantio)

DAS_i = diâmetro à altura do solo inicial (antes do plantio)

H_f = altura final

DAS_f = diâmetro à altura do solo final

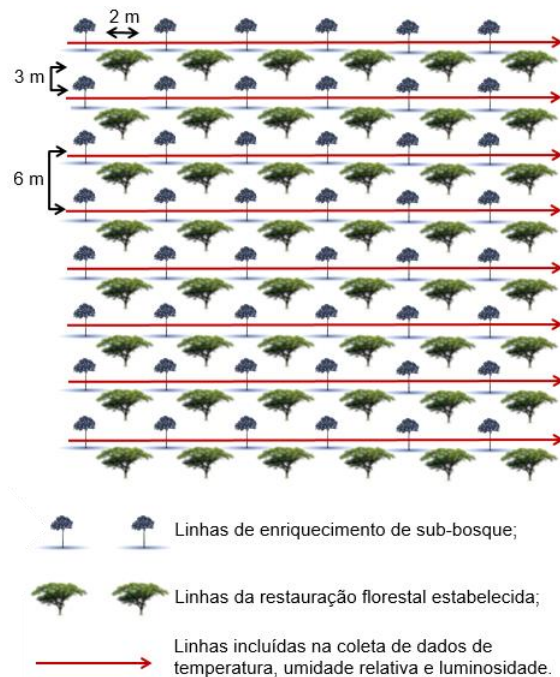
Para análise da variação ambiental na área sombreada, foram coletados dados de luminosidade (LUX), temperatura (°C) e umidade relativa do ar (UR), estes dois últimos usados no cálculo do déficit de pressão de vapor (DPV) (GROSSIORD *et al.*, 2020). Essas coletas foram realizadas em março de 2022 (fim da estação chuvosa, 12 meses após o plantio) e setembro de 2022 (fim da estação seca, 19 meses após o plantio), com sensores *data-loggers* (Hobo) (Figura 9), sempre em dias de céu azul e sem nuvens, entre 10h e 13h, para minimizar interferências atmosféricas (BARROS, 2019).

Figura 8. Sensores *data-loggers* (Hobo) usados para a coleta de dados de temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade.



Todas as 11 linhas de plantio no sub-bosque do plantio de enriquecimento foram incluídas na coleta de dados de temperatura, UR e luminosidade, e as medições foram feitas pontualmente acima de cada muda da espécie madeireira que selecionamos. Essas variáveis ambientais também foram coletadas na estrada ao lado dos plantios de restauração, a pleno sol, para estabelecer uma medida de referência externa, que serviu para calcular a porcentagem de intensidade de luz que atinge o sub-bosque no plantio sombreado (HAKAMADA *et al.*, 2016). A equação aplicada foi: $\%LUX_{sub} = LUX_{sub} / LUX_{estrada} * 100$ (BARROS, 2019).

Figura 9. Croqui da coleta de dados realizada com os sensores *data-loggers* (Hobo).



Fonte: a autora.

Em março de 2022 também foram coletados dados de localização, utilizando um aparelho GPS com correção RTK (*Real-time Kinematic*), que fornece localização com precisão de centímetros (Figura 11). Os valores das variáveis ambientais temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade e DPV e a localização das mudas na área sob sombreamento natural foram interpolados no programa QGIS, gerando mapas com a distribuição dessas variáveis na área, de modo a descrever e visualizar a heterogeneidade espacial de variáveis ambientais em plantios de restauração florestal.

Figura 10. GPS RTK (*Real-time Kinematic*) utilizado para a coleta de dados de localização com alta precisão, no plantio sombreado.



4.6. Análise dos dados

Para avaliar o desempenho das mudas madeireiras no plantio a pleno sol e no plantio sombreado, comparamos os crescimentos relativos em altura e em DAS entre os tratamentos, usando modelos generalizados mistos (GLM), incluindo as áreas e as espécies como fatores fixos, e as espécies também como fator aleatório, para destacar a resposta da comunidade, com significância a 5% e significância parcial até 10%. Foram realizadas comparações múltiplas e testes de significância de cada fator fixo usando a função *emmeans* ($p < 0,05$) (LENTH *et al.*, 2019).

O método de análise GLM também foi aplicado para investigar a relação e as interações das variáveis de crescimento (altura e DAS) com as variáveis ambientais (LUX e DPV) apenas no plantio sombreado, incluindo as variáveis ambientais e as espécies como fatores fixos, e as espécies também como fator aleatório, para destacar a resposta da comunidade, com significância a 5% e significância parcial até 10%.

Em ambas as análises GLM, foi aplicada distribuição linear para analisar a variável altura e distribuição *gamma* para analisar da variável DAS. Os melhores modelos

para explicar cada variável foram selecionados por meios do critério de *Akaike* (Anexo 7; 8; 9) (AKAIKE, 1973).

Todas as análises de crescimento foram aplicadas para os dados coletados aos 12 meses (fim da estação chuvosa) e aos 19 meses após o plantio (fim da estação seca), considerando todos os indivíduos vivos em cada data e em cada área (NICHOLLS, 1989). Com elas, objetivamos responder se a variação ambiental espacial no plantio ajuda a explicar o crescimento das árvores madeireiras. Variáveis como intensidade de luz e DPV devem variar espacialmente entre plantios de restauração e, quando já há um dossel estabelecido como no plantio sombreado, devem variar dentro do mesmo plantio, visto que há diferentes espécies no dossel, cada qual com suas características de tamanho de copa, densidade de folhagem e nível de retenção da luminosidade pelas copas (ALMEIDA; VIANI, 2019).

Os percentuais de mortalidade das áreas a pleno sol e sob sombreamento natural foram comparados entre si, aos 12 e 19 meses após o plantio. Para a análise de mortalidade, foram considerados apenas indivíduos que estavam vivos a partir de 6 meses após o plantio, devido a diferenças nos períodos de rega, de controle de gramíneas e de formigas-cortadeiras dos dois plantios até essa idade. Foi aplicado o teste de homogeneidade do qui-quadrado (χ^2) em tabelas de contingência, a fim de comparar a proporção de indivíduos vivos e mortos (geral e por espécie) aos 12 e 19 meses após o plantio, nas duas condições em questão, a pleno sol e sob sombreamento natural. O teste t pareado considerando cada espécie como uma repetição foi aplicado para verificar a diferença na mortalidade entre as áreas, com significância a 5% e significância parcial até 10% (CONOVER, 1971; BUSSAB; MORETTIN, 2017).

Todas as análises estatísticas e os gráficos foram gerados com o software R (R Core Team, 2022).

5. Resultados

5.1. Plantio a pleno sol *versus* Plantio sombreado

Houve diferença (GLM, $p < 0,0001$) entre as áreas no crescimento relativo em altura (CR_H) e em DAS (CR_{DAS}), aos 12 e 19 meses após o plantio (Tabela 1; Figura 12).

Tabela 1. Resultados da análise de modelos lineares generalizados (GLM) comparando o crescimento de árvores madeireiras a pleno sol e sob o dossel de árvores pioneiras em plantio de restauração (sombreado). Valores significativos ($p < 0,05$) estão em negrito. Valores parcialmente significativos ($0,05 < p < 0,1$) estão em itálico. **CR_H**: crescimento relativo em altura. **CR_{DAS}**: crescimento relativo em diâmetro à altura do solo.

Fator	12 meses		19 meses	
	CR _H (cm.cm ⁻¹)	CR _{DAS} (mm.mm ⁻¹)	CR _H (cm.cm ⁻¹)	CR _{DAS} (mm.mm ⁻¹)
Condição (pleno sol vs sombreado)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Área*Astronium graveolens	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Área*Cariniana estrellensis	<0,0001	0,3859	<0,0001	0,0459
Área*Cariniana legalis	<0,0001	0,9537	<0,0001	0,9104
Área*Cedrela fissilis	0,0011	0,0128	0,0001	0,8952
Área*Cordia trichotoma	0,5440	0,4357	0,0802	0,6478
Área*Esenbeckia leiocarpa	0,0349	0,7868	0,0053	0,3191
Área*Handroanthus heptaphyllus	0,0031	0,0644	0,6360	0,4316
Área*Parapiptadenia rigida	<0,0001	0,0839	<0,0001	0,0518

No geral, as mudas no plantio a pleno sol cresceram mais que as mudas do plantio sombreado, porém, tal resultado não se aplica a todas as espécies e em todas as variáveis e condições, embora em nenhuma delas uma espécie tenha crescido mais no plantio sombreado (Figura 12). Aos 12 meses, a *Cordia trichotoma* se destacou no crescimento em altura a pleno sol e sob sombreamento natural (emmeans, $p < 0,0001$, Tabela 2), sendo a única espécie que não apresentou diferença entre os plantios no período (GLM, $p = 0,5440$; Tabela 1; Figura 12a).

No plantio sombreado, todas as espécies se comportaram de forma semelhante em relação ao CR_{DAS} no mesmo período (emmeans, $p > 0,10$), com valores muito baixos (Tabela 2; Figura 12c). No plantio a pleno sol aos 12 meses, a espécie *Parapiptadenia rigida* apresentou o maior CR_{DAS} (emmeans, $p < 0,0001$; Figura 12c), e também se destacou em CR_H (Tabela 2; Figura 12a). Os valores de CR da *Parapiptadenia rigida* plantada a pleno sol foram muito discrepantes dos valores encontrados para a mesma espécie no plantio sombreado nesse período (emmeans, $p < 0,0001$; Figura 12a; 12c).

Tabela 2. Médias do crescimento relativo por espécie nos plantios a pleno sol e sombreado, e resultado da comparação do desempenho das espécies por condição de plantio e por período (emmeans, $p < 0,05$). **CR_H**: crescimento relativo em altura. **CR_{DAS}**: crescimento relativo em diâmetro à altura do solo.

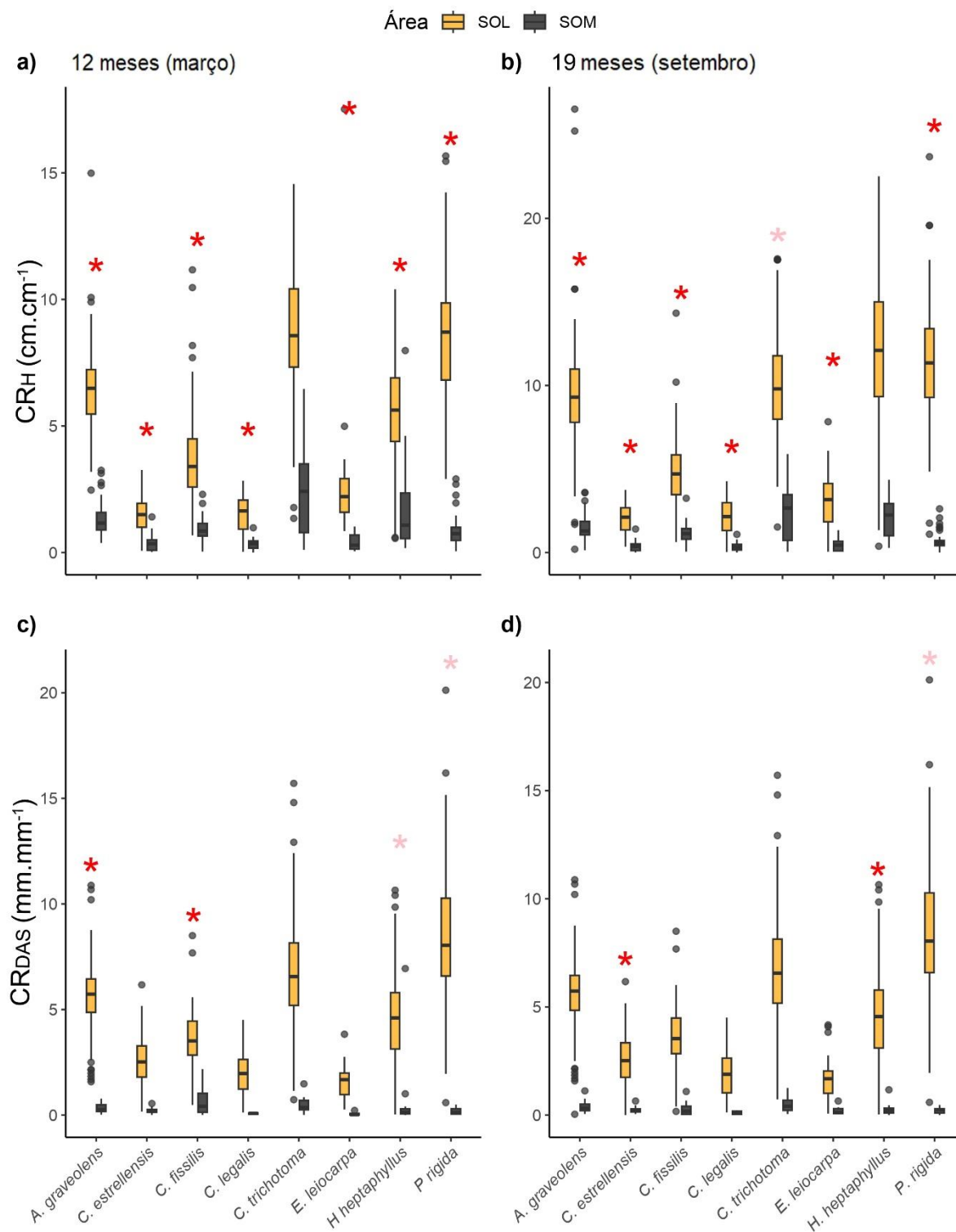
Condição	Pleno sol		Sombreado	
Variável de crescimento	CR _H (cm.cm ⁻¹)	CR _{DAS} (mm.mm ⁻¹)	CR _H (cm.cm ⁻¹)	CR _{DAS} (mm.mm ⁻¹)
Espécies	12 meses			
<i>Astronium graveolens</i>	6.46b	5.51c	1.21bc	0.24a
<i>Cariniana estrellensis</i>	1.36f	2.05f	0.19d	-0.01a
<i>Cariniana legalis</i>	1.32f	1.35f	0.15d	-0.20a
<i>Cedrela fissilis</i>	3.65d	3.09e	0.63bcd	-0.12a
<i>Cordia trichotoma</i>	8.73a	6.64b	2.37a	0.29a
<i>Esenbeckia leiocarpa</i>	2.76e	0.67f	0.26d	-0.07a
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	5.47c	4.36d	1.60ab	0.23a
<i>Parapiptadenia rigida</i>	8.4a	8.05a	0.77cd	-0.03a
	19 meses			
<i>Astronium graveolens</i>	9.27b	5.55c	1.46ab	0.30a
<i>Cariniana estrellensis</i>	1.78d	2.23f	0.18c	-0.01a
<i>Cariniana legalis</i>	1.96d	1.75f	0.17bc	-0.17a
<i>Cedrela fissilis</i>	4.8c	3.48e	0.91b	-0.04a
<i>Cordia trichotoma</i>	9.98b	6.71b	2.3a	-0.04a
<i>Esenbeckia leiocarpa</i>	2.78d	1.67f	0.36bc	0.03a
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	12.09a	4.69d	2.12a	0.14a
<i>Parapiptadenia rigida</i>	11.45ab	8.28a	0.51bc	-0.01a

Aos 19 meses, *Cordia trichotoma* seguiu sendo o maior CR_H do plantio sombreado (emmeans, $p < 0,0001$), juntamente com *Handroanthus heptaphyllus* (emmeans, $p < 0,0001$, Tabela 2; Figura 12a; 12c). Porém, no plantio a pleno sol, o *Handroanthus heptaphyllus* superou a *Cordia trichotoma* (emmeans, $p < 0,0001$), apresentando o maior CR_H, logo, nesse período, a espécie se destacou em ambas as condições de plantio (GLM, $p > 6360$; Tabela 1-2; Figura 12b).

No plantio sombreado, aos 19 meses, o CR_{DAS} das espécies seguiu sendo muito baixo e semelhante entre eles (emmeans, $p > 0,10$; Tabela 2). No plantio a pleno sol, o *Handroanthus heptaphyllus* superou todas as espécies em CR_{DAS} , seguido pela *Parapiptadenia rigida* (emmeans, $p > 0,10$; Tabela 2; Figura 12d).

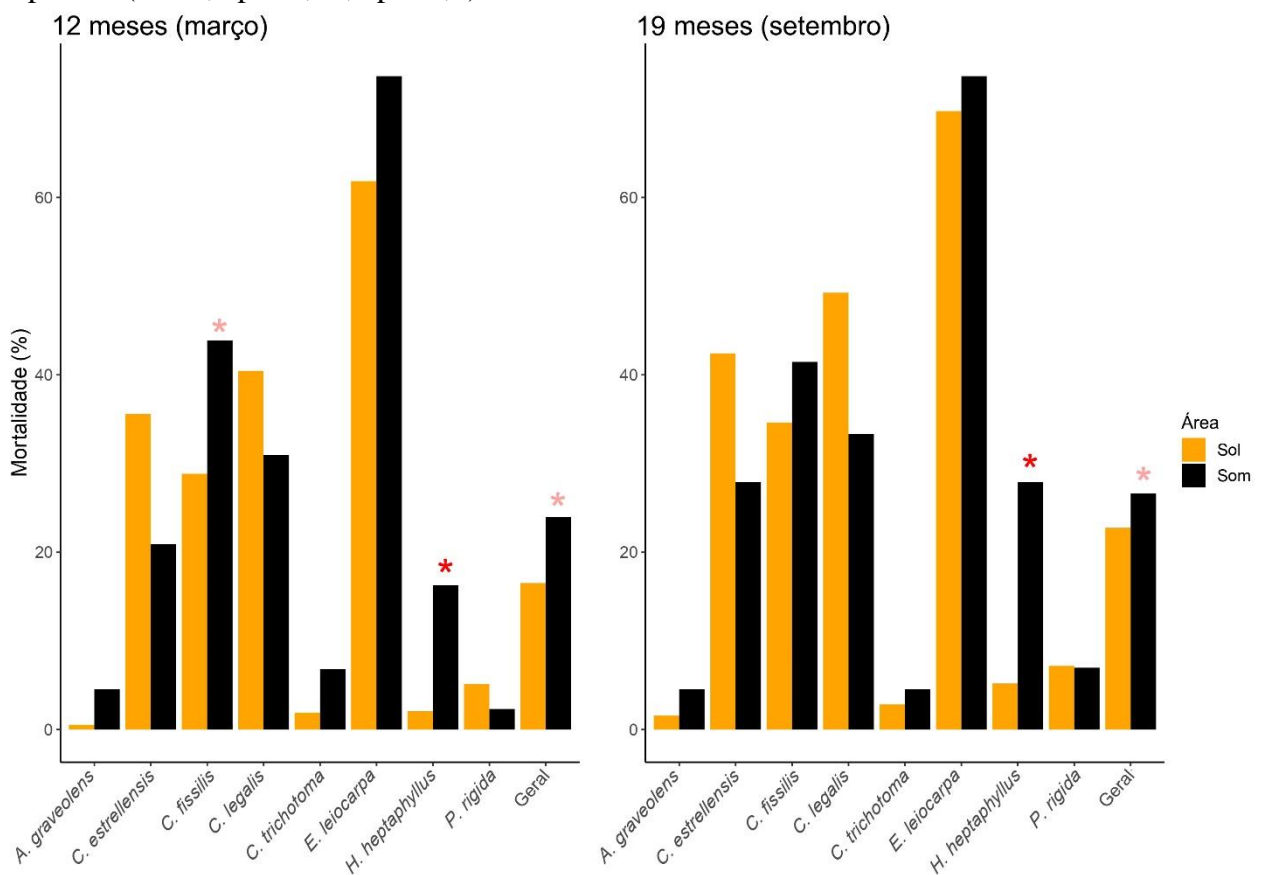
Em ambas as análises, aos 12 e 19 meses após o plantio, os menores desempenhos em CR_H a pleno sol foram registrados para as espécies *Cariniana legalis* e *Cariniana estrellensis* (emmeans, $p > 0,10$), inclusive sendo semelhantes a algumas espécies do plantio sombreado, como *Cordia trichotoma* (emmeans, $p < 0,0001$) e *Handroanthus heptaphyllus* (emmeans, $p > 0,10$; Tabela 2; 11; Figura 12). O menor CR_{DAS} registrado no plantio a pleno sol, em ambos os períodos, foi das espécies *Esenbeckia leiocarpa*, *Cariniana legalis* e *Cariniana estrellensis* (emmeans, $p < 0,0001$; Figura 12c; 12d).

Figura 11. Taxas de crescimento relativo em altura (CR_H) e DAS (CR_{DAS}) por espécie, nos plantios a pleno sol e sombreado, aos 12 e 19 meses após o plantio. Asteriscos vermelhos indicam diferença de crescimento dentro da espécie, entre a condição de plantio a pleno sol e sob dossel da restauração florestal (GLM, * $p < 0,05$; * $p < 0,1$).



Houve, entre os plantios, diferença parcialmente significativa na taxa de mortalidade das mudas, aos 12 (χ^2 , $p = 0,0027$; teste-t pareado, $p = 0,0994$) e 19 meses (χ^2 , $p = 0,0067$; teste-t pareado, $p = 0,0606$), com maiores valores encontrados sob sombreamento natural (Anexo 10), mas, por espécie, apenas a *Handroanthus heptaphyllus* apresentou diferença significativa entre os plantios (χ^2 , $p < 0,05$), com maior mortalidade no plantio sombreado, apesar da alta taxa de CR_H observada nas mudas sobreviventes (Anexo 11; Figura 12; 13). Aos 12 meses, a *Cedrela fissilis* apresentou diferença parcialmente significativa (χ^2 , $p < 0,1$), também com maior mortalidade no plantio sombreado. A espécie *Esenbeckia leiocarpa* apresentou a maior porcentagem de mortalidade, e como as outras espécies, não houve diferença entre os plantios (Anexo 11; Figura 13).

Figura 12. Mortalidade por espécie (χ^2) e área (teste-t pareado) aos 12 e 19 meses após o plantio (GLM, * $p < 0,05$; * $p < 0,1$).



5.2. Relação da variação ambiental com o crescimento sob sombreamento natural

No plantio a pleno sol, aos 12 meses, as médias de luminosidade e DPV foram de 44,99% e 2,52 kPa, respectivamente, e aos 19 meses, 86,49% e 5,21 kPa. No plantio sombreado, aos 12 meses, a luminosidade atingiu média de 49,4% e o VPD, 2,39 kPa, e aos 19 meses, os valores foram de 55,66% e 4,01 kPa. No geral, foi observada uma relação fraca entre as variáveis ambientais e o crescimento das mudas, em ambos os períodos (Anexo 8; 9).

A variação da luminosidade na área explicou parcialmente o CR_H a nível de comunidade aos 12 meses, de forma negativa, mas não explicou o CR_{DAS} (GLM, $p = 0,0869$; $P = 0,2604$). Aos 19 meses, não houve resposta da comunidade, de nenhuma variável de crescimento (GLM, $p = 0,1394$; $p = 0,4542$) (Tabela 3). A nível da população, *Astronium graveolens*, *Cariniana legalis* e *Handroanthus heptaphyllus* responderam positivamente em CR_H a luminosidade aos 12 meses (GLM, $p < 0,1$), e apenas a espécie *A. graveolens* respondeu, também positivamente, em CR_{DAS} (GLM, $p < 0,05$) (Tabela 3; Figura 13a; 13c). Aos 19 meses, os resultados se mantiveram para a variável CR_H , mas a *C. estrellensis* passou a responder negativamente em CR_{DAS} ao aumento da luminosidade (GLM, $p < 0,05$) observado no período, que é caracterizado pela maior incidência luminosa no solo do plantio, devido à queda das folhas das árvores decíduas presentes na área (Tabela 3; Figura 13b; 13d).

A nível de comunidade, a variação do DPV na área sombreada não explicou o CR_H e o CR_{DAS} inicial das mudas aos 12 (GLM, $p = 0,4342$; $p = 0,3723$) e 19 meses ($p = 0,1428$; $p = 0,4465$) após o plantio, mas foi detectado efeito significativo a nível de populações (Tabela 3; Figura 14). Todas as espécies tiveram respostas significativas e positivas em CR_{DAS} às variações de DPV aos 12 meses e 19 meses (GLM, $p < 0,05$; $p < 0,1$), com exceção da *Cordia trichotoma* (GLM, $p = 0,5618$; $0,9091$) (Tabela 3; Figura 14c; 14d). Apenas *Astronium graveolens* e *Cedrela fissilis* responderam significativamente em CR_H a variação do DPV na área, aos 12 meses (GLM, $p < 0,1$). Aos 19 meses, obtivemos o mesmo resultado para ambas as espécies, e também para *Cariniana estrellensis* (GLM, $p < 0,1$) (Tabela 3; Figura 14a; 14b).

Tabela 3. Resultados da análise GLM para verificar a interação entre o déficit de pressão de vapor (DPV) e luminosidade (LUX), e as variáveis de crescimento das árvores madeireiras plantadas no sub-bosque de um plantio de restauração. Valores significativos ($p < 0,05$) estão em negrito. Valores parcialmente significativos ($0,05 < p < 0,1$) estão em itálico. + ou – após o valor-p indica uma interação positiva ou negativa, respectivamente, entre a variável ambiental e a variável de crescimento.

Fator	12 meses		19 meses	
	CR _H (cm.cm ⁻¹)	CR _{DAS} (mm.mm ⁻¹)	CR _H (cm.cm ⁻¹)	CR _{DAS} (mm.mm ⁻¹)
LUX	0,0869-	0,2604	0,1394	0,4542
LUX: <i>Astronium graveolens</i>	<0,0001+	<0,0001+	<0,0001+	<0,0001+
LUX: <i>Cariniana estrellensis</i>	0,56620	0,6373	0,0853+	0,0339-
LUX: <i>Cariniana legalis</i>	0,0617+	0,3250	0,3168	0,7050
LUX: <i>Cedrela fissilis</i>	0,7792	0,9152	0,7067	0,2985
LUX: <i>Cordia trichotoma</i>	0,2976	0,8178	0,6447	0,3611
LUX: <i>Esenbeckia leiocarpa</i>	0,6151	0,9259	0,1309	0,1161
LUX: <i>Handroanthus heptaphyllus</i>	0,0148+	0,2538	0,0676+	0,2182
LUX: <i>Parapiptadenia rigida</i>	0,2283	0,8122	0,3670	0,9861
DPV	0,4342	0,3723	0,1428	0,4465
DPV: <i>Astronium graveolens</i>	0,0319+	<0,0001+	<0,0001+	<0,0001+
DPV: <i>Cariniana estrellensis</i>	0,4033	0,0027+	0,0537+	0,0004+
DPV: <i>Cariniana legalis</i>	0,2188	<0,0001+	0,2731	<0,0001+
DPV: <i>Cedrela fissilis</i>	0,0825+	<0,0001+	0,0324+	0,0004+
DPV: <i>Cordia trichotoma</i>	0,8047	0,5618	0,2083	0,9091
DPV: <i>Esenbeckia leiocarpa</i>	0,3131	0,0165+	0,8141	0,0433+
DPV: <i>Handroanthus heptaphyllus</i>	0,8774	0,0213+	0,5403	0,0629+
DPV: <i>Parapiptadenia rigida</i>	0,8399	0,0003+	0,6528	<0,0001+

Figura 13. Relação da luminosidade (%) e do crescimento (altura e DAS) das mudas arbóreas no plantio sombreado, aos 12 e 19 meses após o plantio (GLM, * $p < 0,05$; ** $p < 0,1$).

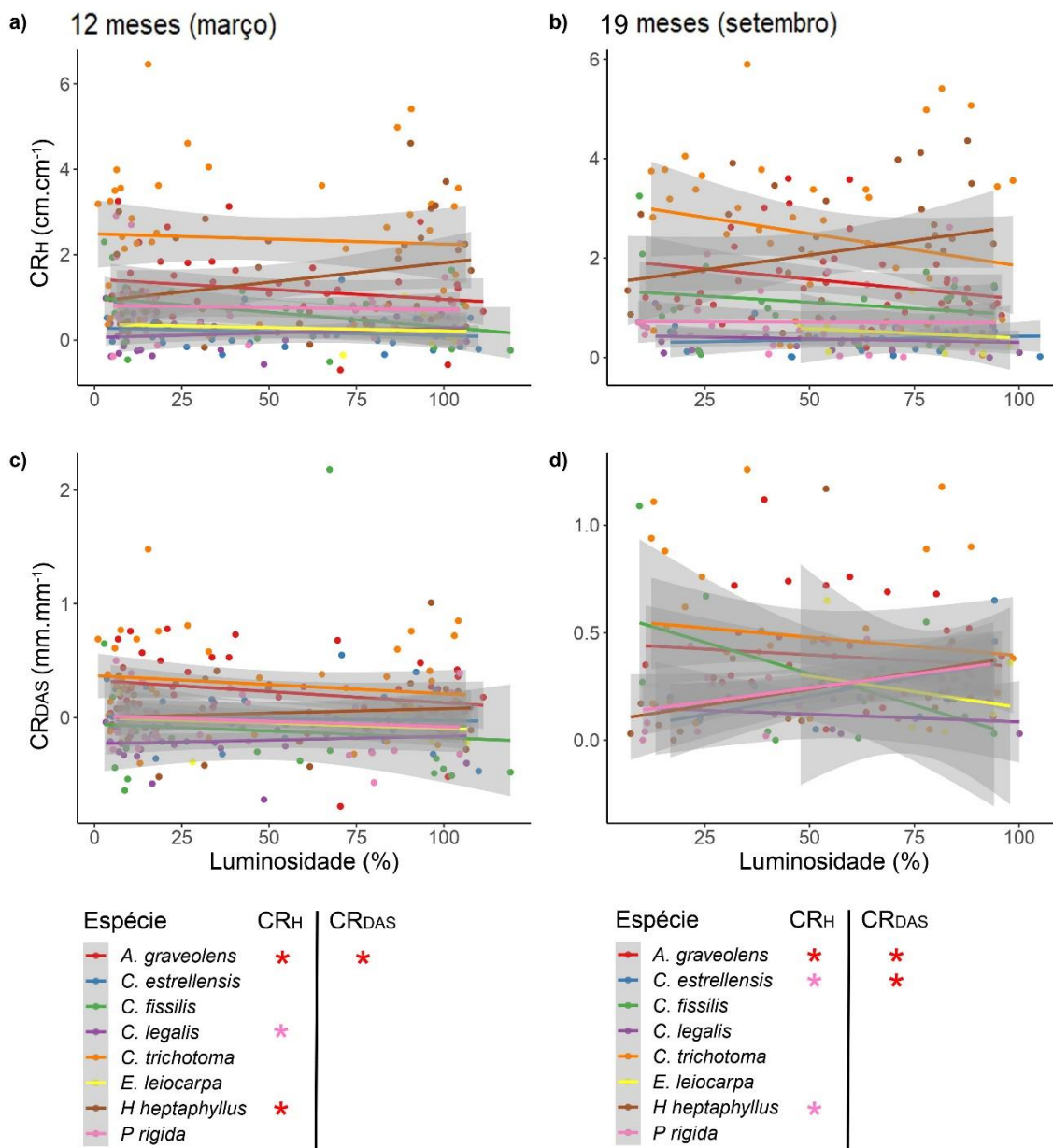
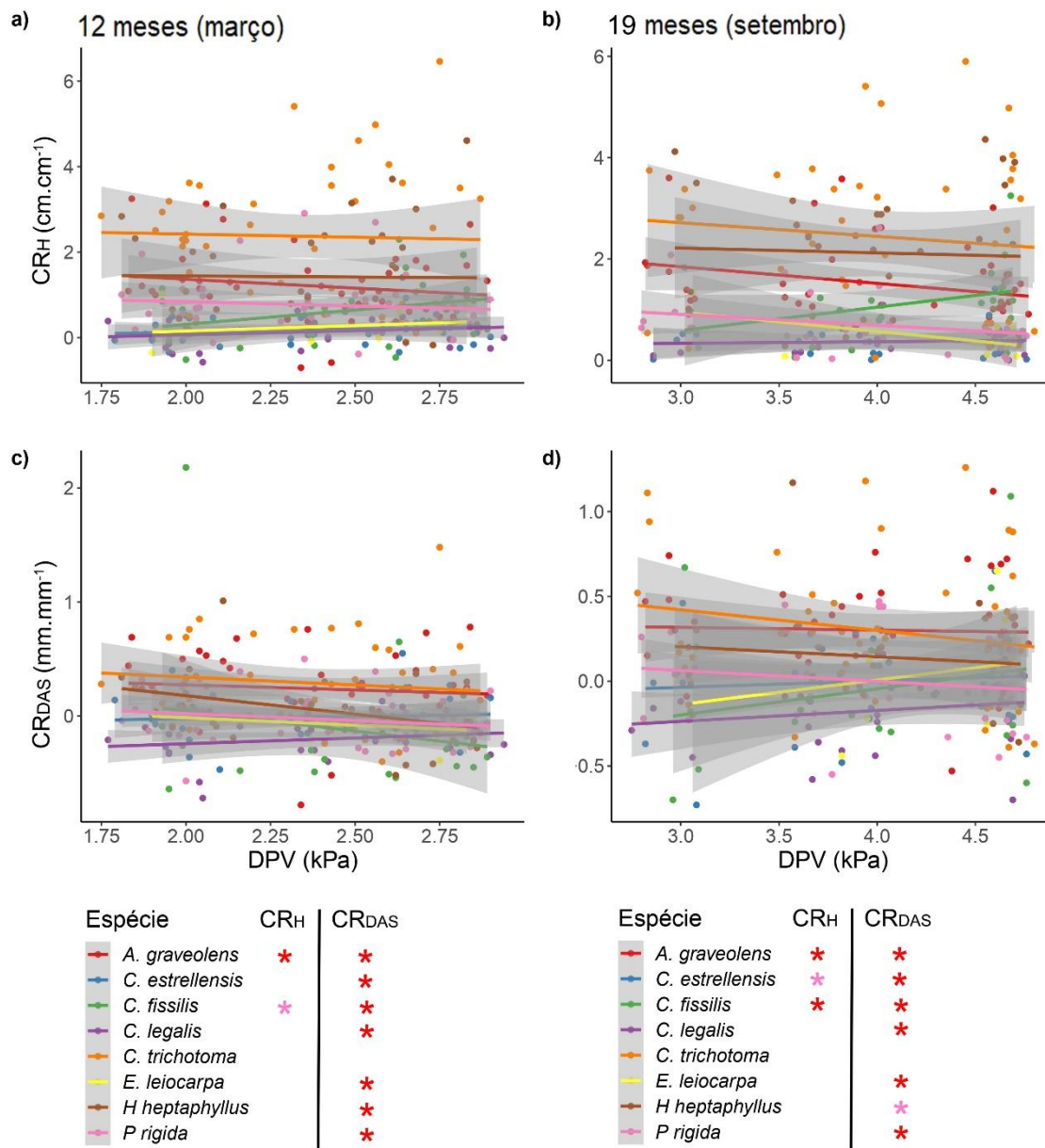


Figura 14. Relação do DPV (kPa) e do crescimento (altura e DAS) das mudas arbóreas no plantio sombreado, aos 12 e 19 meses após o plantio (GLM, * $p < 0,05$; ** $p < 0,1$).



Analisando os mapas interpolados com dados de temperatura, umidade relativa do ar e DPV sobre cada muda do plantio sombreado, é possível notar que houve variação no microclima da área entre as estações chuvosa e seca, mas não há grandes variações na área na mesma data (Figura 16;17). O nível de incidência luminosa sobre cada muda também variou, porém não apenas entre as estações, mas também na mesma data, em toda a área do plantio (Figura 16).

Figura 15. Mapas interpolados com variáveis ambientais coletadas no plantio sombreado. **(1)** 12 meses (fim da estação chuvosa); **(2)** 19 meses (fim da estação seca); **(a)** Luminosidade; **(b)** DPV.

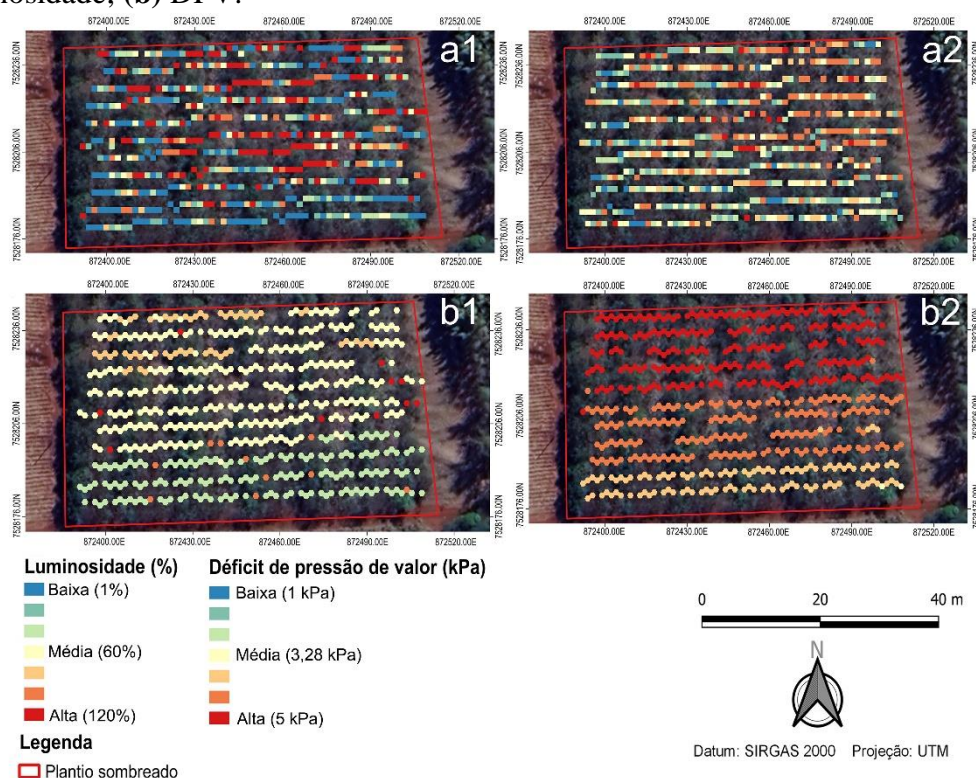
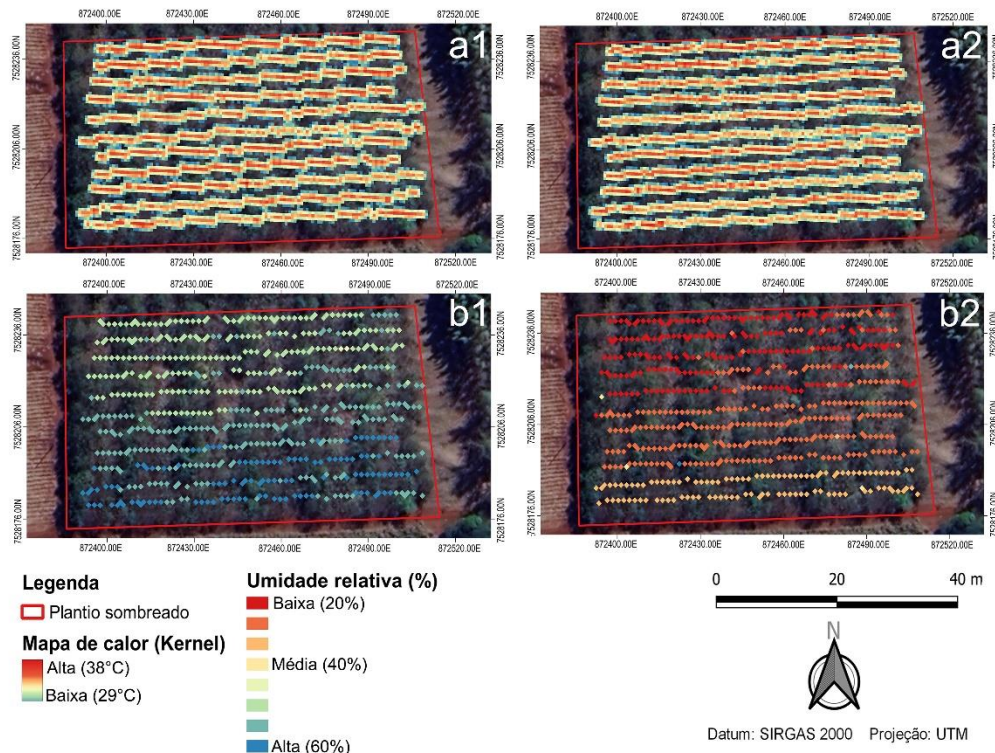


Figura 16. Mapas interpolados com variáveis ambientais coletadas no plantio sombreado. (1) 12 meses; (2) 19 meses; (a) Temperatura; (b) Umidade relativa do ar.



6. Discussão

As árvores madeireiras, no geral, cresceram mais e morreram menos quando plantadas a pleno sol, o que corrobora com resultados encontrados por Piotto *et al.* (2020), mas houve variações entre espécies, com exemplos em que não houve variação do crescimento (em altura ou diâmetro) ou da mortalidade em função do ambiente de plantio (a pleno sol ou sob dossel da restauração). É fato que a luz influencia o crescimento das plantas (WHITMORE, 1975; KAGEYAMA, 1989; CHAZDON *et al.*, 1996; SOUZA; VÁLIO, 2003; SANTOS *et al.*, 2006; SILVESTRINI *et al.*, 2007; DURIGAN; RAMOS, 2013; WAGNIACK, 2016; BARROS, 2019), entretanto, foi observada uma relação fraca entre os níveis de luminosidade no plantio sombreado com o crescimento das mudas. Assim, embora a luminosidade possa ser maior no ambiente a pleno sol, neste estudo, não podemos atestar que foi ela que levou ao maior crescimento das mudas das árvores madeireiras nesta condição de plantio.

A luz tende a ser muito heterogênea em curtas escalas espaciais e temporais, especialmente sob o dossel de florestas, em função de *sunflecks*, que são o aumento da irradiação no sub-bosque devido a pequenas aberturas e ao movimento de galhos da copa.

Assim, a intensidade luminosa varia não apenas ao longo das estações do ano, mas ao longo do dia, entre dias e a curtas distâncias, em função dessas condições, do tempo climático (CHAZDON *et al.* 1996; SMITH; BERRY, 2022; WAY; PEARCY, 2022) e em função da existência ou não de clareiras temporais em função das árvores plantadas (GANDOLFI *et al.*, 2009; ALMEIDA; VIANI, 2019). Logo, é provável que a forma pontual como a variável foi obtida, ou seja, apenas uma medida sobre cada muda, em um dado dia por estação, não seja uma medida integrativa da quantidade e da variação da luminosidade ao qual as mudas foram expostas ao longo do período desse estudo, e por esta razão, não tenha sido encontrada uma forte relação com o crescimento das mudas madeireiras aos 12 e 19 meses após o plantio.

O mesmo pode ser argumentado para o DPV. A forma pontual, no espaço e no tempo, da coleta de dados de temperatura e UR também não se mostrou eficaz quando o propósito é identificar o efeito da variação do DPV sobre o crescimento de uma comunidade de árvores sob sombreamento natural, em uma mesma área e em um mesmo período, visto que as coletas foram realizadas apenas em dias de céu aberto, entre 10h e 13h, e os valores de DPV podem variar ao longo dos dias e em um único dia, assim como a luminosidade, em resposta a condições atmosféricas, como nuvens e precipitação, que causam queda na incidência luminosa e na temperatura, e aumentam a umidade relativa do ar (CHAZDON *et al.*, 1996; GROSSIORD *et al.*, 2020). Além disso, foi verificado que as espécies, inclusive as que pertencem ao mesmo grupo sucessional, podem responder de forma diferente a variação do DPV, em um mesmo período (KAGEYAMA, 1989; HETHERINGTON; WOODHARD, 2003; CÁRCER *et al.*, 2018), logo, registrar a duração dos períodos de baixo ou alto DPV, para então associar ao crescimento das mudas nativas, pode ser um método mais adequado para investigar tal relação a nível de comunidade.

Embora as espécies tenham no geral crescido mais a pleno sol, os níveis de resposta em relação às duas diferentes condições de plantio variaram entre as espécies. Das oito espécies avaliadas, sete tiveram ou DAS ou altura maior na condição a pleno sol em algum período de avaliação (12 ou 19 meses). No entanto, ao analisar algumas espécies separadamente, é possível identificar a influência de seus grupos sucessionais e da tolerância a luz de cada uma delas no crescimento, como é o caso de *Cordia trichotoma* e *Parapiptadenia rigida*, que tiveram os maiores CRs em altura e DAS no plantio a pleno

sol, respectivamente, nos 12 primeiros meses de plantio, e que são as únicas espécies desse estudo que foram identificadas, na literatura existente, como espécies de comportamento pioneiro em alguns casos (CARVALHO, 1982; 2002; 2003, SOUZA; VÁLIO, 2003). *Cordia trichotoma* teve desenvolvimento igualmente satisfatório sob sombreamento natural, enquanto *Parapiptadenia rigida*, que também apresentou bom desenvolvimento em altura, teve o crescimento a pleno sol muito discrepante do crescimento observado no plantio sombreado, o que provavelmente está relacionado à tolerância de cada espécie à sombra. *Cordia trichotoma* é uma espécie semiheliófila, de secundária inicial a secundária tardia, mas com tendência ao pioneirismo e, além disso, seu crescimento nos primeiros anos de vida é mais expressivo (CARVALHO, 1982; 2002), o que explicaria seu destaque no desenvolvimento em altura em ambos os plantios, enquanto que *Parapiptadenia rigida*, que é espécie heliófila, de pioneira à secundária tardia e de regeneração abundante em clareiras de florestas naturais (CARVALHO, 2003b), destacou-se apenas no plantio a pleno sol.

Outros exemplos de desenvolvimentos influenciados pelas características sucessionais inerentes às espécies, podem ser observados para *Cariniana estrellensis*, *Cariniana legalis* e *Esenbeckia leiocarpa*, que são todas secundárias tardias, típicas de estágios finais da sucessão ecológica e que apresentaram os menores valores de CR_H e CR_{DAS} aos 19 meses. No entanto, *Cariniana estrellensis* e *Cariniana legalis* também são classificadas como espécies clímax com algum grau de tolerância à luz, diferente da *Esenbeckia leiocarpa* que é espécie umbrófila, com grande preferência por locais sombreados (RÊGO; POSSAMAI, 2001; CARVALHO, 2003a; 2010).

Há indícios de que as espécies clímax têm maior capacidade para se adaptar a diferentes níveis de luminosidade (VALLADARES; NIINEMETS, 2008; GABURRO *et al.*, 2014), como é o caso da *Cariniana estrellensis* e *Cariniana legalis*, que possuem boa plasticidade fenotípica (PORTELLA *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2019). As respostas fotossintéticas similares e a maior plasticidade observadas nessas espécies, provavelmente as garantiu maior sobrevivência em ambos os plantios (VALLADARES; NIINEMETS, 2008; GABURRO *et al.*, 2014; COSTA *et al.*, 2019), enquanto *Esenbeckia leiocarpa* apresentou alta mortalidade, mesmo no plantio sombreado, provavelmente devido à passagem de luz através das copas das árvores, especialmente no período de seca, quando as árvores perdem suas folhas.

Apesar de *Cariniana estrellensis* possuir certa tolerância à luz e boa plasticidade fenotípica, e isso ter colaborado com a sobrevivência das espécies, o baixo CR_H no plantio a pleno sol, significativamente menor do que outras espécies do mesmo grupo sucessional, pode estar associado à fotoinibição e a baixa eficiência no uso da água detectadas na *Cariniana estrellensis* quando exposta a alta radiação solar, que causa uma queda no teor de clorofila, prejudicando o crescimento da muda (PORTELA *et al.*, 2019). Considerando que a *Cariniana legalis* possui respostas fotossintéticas similares às da *Cariniana estrellensis*, é provável que tais estratégias estejam presentes na espécie também, mesmo que de forma menos expressiva (COSTA *et al.*, 2019).

Apesar da evidente importância do grupo sucessional para a escolha das espécies a serem plantadas em ambientes com diferentes níveis de luminosidade, como no caso das citadas acima, todas as espécies secundárias tardias estudadas tiveram maior crescimento em altura no plantio a pleno sol do que no plantio sombreado. Por exemplo, *Handroanthus heptaphyllus*, espécie classificada como secundária tardia por Carvalho (2003), forneceu resultados que corroboram estudos que indicam que o crescimento e a sobrevivência inicial da espécie são favorecidos quando esta é plantada a pleno sol, visto que sua taxa fotossintética é reduzida em ambientes sombreados (SIEBENEICHLER *et al.*, 2008; BORGES *et al.*, 2014). *Cedrela fissilis* também apresentou resultados que corroboram com estudos disponíveis, com maior CR_H no plantio a pleno sol, porém com taxas de mortalidade similares em ambas as condições de plantio, provavelmente devido a sua aclimação eficiente ao ambiente exposto a radiação solar, através de alterações fisiológicas e morfológicas nas mudas (SANCHES *et al.*, 2017). Não foram encontradas informações na literatura existente sobre o *Astronium graveolens*, mas a espécie também apresentou maior CR_H a pleno sol, o que condiz com a hipótese desse trabalho, de que espécies não pioneiras, no geral, plantadas a pleno sol têm crescimento inicial mais rápido, sendo favorecidas pela maior incidência luminosa dessa condição de plantio.

Em suma, os resultados sugerem que, do ponto de vista de crescimento inicial das mudas, é preferível plantar espécies arbóreas madeireiras a pleno sol, mesmo estas sendo, com frequência, espécies tardias na sucessão ecológica. Na condição a pleno sol as mudas têm crescimento inicial e sobrevivência maiores ou similares ao encontrados na condição de plantio sombreado (SIEBENEICHLER *et al.*, 2008; BORGES *et al.*, 2014; WANGINIAK, 2016). Além disso, plantios a pleno sol podem ser feitos

concomitantemente, com todas as mudas e espécies plantadas num único momento, o que é mais fácil logisticamente e provavelmente mais barato que realizar um plantio escalonado, no qual é necessário construir um dossel com árvores pioneiras, para depois, num segundo momento, plantar as árvores madeireiras (SCHULZE, 2006). O estudo também sugere que, baseado no crescimento relativo em altura e em diâmetro à altura do solo, e na taxa de mortalidade, as espécies com maior potencial para a produção de madeira na condição a pleno sol são *Astronium graveolens*, *Cordia trichotoma*, *Handroanthus heptaphyllus* e *Parapiptadenia rigida*, enquanto que apenas *C. trichotoma* e *A. graveolens* mostraram-se como boas opções quando o plantio de espécies madeireiras for conduzido sob o dossel estruturado de uma restauração florestal existente.

Estes aspectos reforçam a opção pelo plantio a pleno sol de árvores madeireiras em áreas de restauração florestal. Entretanto, não se trata de um assunto esgotado. Foram encontrados altos níveis de mortalidade em ambas as condições de plantio (SOUZA *et al.*, 2010), o que carece de investigações sobre os fatores envolvidos, como, por exemplo, a concentração de macro e micronutrientes no solo de cada área e a sua influência na fisiologia e morfologia das espécies arbóreas (JOSÉ *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2015b). Além disso, este estudo avaliou apenas o crescimento e a mortalidade inicial das mudas. Futuros estudos devem reavaliar as mudas plantadas nestas diferentes condições em idades mais avançadas, de forma a não só avaliar a continuidade do crescimento ao longo do tempo, assim gerando dados para reforçar ou não os resultados deste estudo, mas também para investigar a arquitetura das árvores, que é um fator importante para o aproveitamento das árvores plantadas quando a finalidade é produção de madeira serrada (POORTER *et al.*, 2006; ROLIM *et al.*, 2018), e a qualidade da madeira, visto que o rápido crescimento pode afetar negativamente a densidade da madeira e, conseqüentemente, seu valor, e não há muitas informações disponíveis, na literatura existente, sobre essa questão para espécies tropicais (ZOBEL; BUIJTENEN, 1989; ROLIM *et al.*, 2018).

7. Conclusão

O crescimento inicial das espécies madeireiras tardias analisadas nesse estudo foi mais rápido a pleno sol, com exceção da *Cordia trichotoma* que apresentou bom desenvolvimento inicial mesmo plantada sob sombreamento natural de um dossel já

estabelecido. Além disso, a mortalidade no plantio a pleno sol foi inferior ou semelhante a mortalidade observada no plantio sombreado, logo, há evidências de que é melhor plantar as outras sete espécies madeireiras em área aberta, concomitantemente com as espécies pioneiras da restauração florestal.

A relação entre as variáveis ambientais e as variáveis de crescimento no plantio sombreado foram fracas e não obtivemos resposta significativa a nível de comunidade. A forma pontual como as variáveis luminosidade, umidade relativa do ar e temperatura foram obtidas (apenas uma medida sobre cada muda, em apenas um dia por estação) não foi uma medida integrativa da quantidade e da variação ao qual as mudas foram submetidas ao longo do período desse estudo, logo, diferentes métodos devem ser testados, como fotos hemisféricas ou coletas com exposições prolongadas, com uso de sensores *data-logger*.

8. Referências

AIMI, S. C.; ARAUJO, M. M.; TABALDI, L. A.; TONETTO, T. da S.; ZAVISTANOVICZ, T. C.; BERGHETTI, A. L. P. Shading as a determinant factor for the survival and growth of *Cabralea canjerana* in southern Brazil. **Cerne**, v. 26, n. 3, p. 349-355, 2020.

AKAIKE, H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In PET ROV, B. N.; CASKI, F. (Eds.), **Proceedings of the Second International Symposium on Information Theory**, p. 267-281, Budapest: Akademiai Kiado, 1973.

ALMEIDA, C.; VIANI, R.A.G. Selection of shade trees in forest restoration plantings should not be based on crown tree architecture alone. **Restoration ecology**, v. 27, n. 4, p. 832-839, 2019.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AZEVEDO, T.; ROSA, M.R.; SHIMBO, J.Z.; OLIVEIRA, M.G.; VALDIONES, A.P.; DEL LAMA, C.; TEIXEIRA, L.M.S. **RAD 2021: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil**. MapBiomias, 126 p., 2022. Disponível em: <<http://alerta.mapbiomas.org>>.

BARROS, A. J. **Crescimento de seis espécies madeireiras nativas da Mata Atlântica sob diferentes intensidades de luz**. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) - Centro de Ciências Agrária, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2019.

BEECH, E.; RIVERS, M.; OLDFIELD, S.; SMITH, P.P.; Global Tree Search: The first complete global database of tree species and country distributions. **Journal of Sustainable Forestry**, p. 454-489, 2017.

BORGES, V.P.; COSTA, M.A.P.C.; RIBAS, R.F. Emergência e crescimento inicial de *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Toledo em ambientes contrastantes de luz. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 523-531, 2014.

BRANCALION, P.H.S.; VIANI, R. A. G.; STRASSBURG, B.B.N.; RODRIGUES, R. R. Finding the money for tropical forest restoration. **Unasyuva**, v. 63, n. 239, p. 41-50, 2012.

BRASIL. **Lei nº. 12.651 de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa, 2012.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística Básica**. São Paulo: Editora Saraiva, 2006. (5ª Edição).

CAMPOS FILHO, E. M.; SARTORELLI, P. A. R. **Guia de árvores com valor econômico**. São Paulo: Agroicone - "Iniciativa INPUT", 2015.

CÁRCER, P.S.; VITASSE, Y.; PENUELAS, J.; JASSEY, V.E.J.; BUTTLER, A.; SIGNARBIEUX, C. Vapor-pressure deficit and extreme climatic variables limit tree growth. **Global Change Biology**, v. 24, p. 1108-1122, 2018.

CARNICER, J.; BARBETA, A.; SPERLICH, D.; COLL, M.; PEÑUELAS, J. C. Contrasting trait syndromes in angiosperms and conifers are associated with different responses of tree growth to temperature on a large scale. **Frontiers in Plant Science**, v. 4, n. 409, 2013.

CARVALHO, P.E.R. **Resultados experimentais de espécies madeireiras nativas do Estado do Paraná**, Embrapa Florestas, 1982.

CARVALHO, P.E.R. **Louro-pardo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. (Embrapa Circular Técnica 66).

CARVALHO, P.E.R. **Jequitibá-branco**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003a. (Embrapa Florestas. Circular Técnica 73).

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**, Colombo: Embrapa Florestas, v. 1, 1039 p., 2003b. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras).

CARVALHO, P.E.R. **Cedro**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. (Embrapa Florestas. Circular Técnica 113).

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**, Colombo: Embrapa Florestas, v. 2, 627 p., 2006. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras).

- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**, Colombo: Embrapa Florestas, v. 3, 593 p., 2008. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras).
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**, Colombo: Embrapa Florestas, v. 4, 644 p., 2010. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras).
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**, Colombo: Embrapa Florestas, v. 5, 634 p., 2014. (Coleção Espécies Arbóreas Brasileiras).
- CHAZDON, R.L.; PEARCY, R.W.; LEE, D.W.; FETCHER, N. Photosynthetic responses of tropical forest plants to contrasting light environments. *In*: MULKEY, S.S.; CHAZDON, R.L.; SMITH, A.P. (Ed.). **Tropical Forest Plant Ecophysiology**, 1996.
- CONOVER, W.J. **Practical nonparametric statistics**, New York: John Wiley. 568 p., 1971.
- COSTA, G.S.; DALMOLIN, A.C.; SCHILLING, A.C.; SANCHES, M.C.; SANTOS, M.S.; MIELKE, M.S. Physiological and growth strategies of two *Cariniana* species in response to contrasting light availability. **Flora**, v. 258, 2019.
- CURTIS, P.G.; SLAY, C.M.; HARRIS, N.L.; TYUKAVINA, A.; HANSEN, M.C. Classifying drivers of global forest loss. **Science**, v. 361, p. 1108-1111, 2018.
- DIAS-FILHO, M. B.; FERREIRA, J.N. Barreiras à adoção de sistemas silvipastoris no Brasil. *In*: Fernandes, E. N.; Pacuillo, D. S.; Castro, C. R. T. de; Muller, M. D.; Arcuri, P. B.; Carneiro, J. da C. (Org.). **Sistemas agrossilvipastoris na América do Sul: desafios e potencialidades**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, p. 327-340, 2007.
- DOCKENDORFF, C.; FUSS, S.; AGRA, R.; GUYE, V.; HERRERA, D.; KRAXNER, F. Committed to restoring tropical forests: an overview of Brazil's and Indonesia's restoration targets and policies. **Environmental Research Letters**, v. 17, 2022.
- DURIGAN, G.; RAMOS, V.S. (Org.). **Manejo adaptativo: primeiras experiências na restauração de ecossistemas**. São Paulo: Páginas & Letras Editora e Gráfica, 49 p., 2013.
- EAMUS, D.; BOULAIN, N.; CLEVERLY, J.; BRESHEARS, D.D. Global change-type drought-induced tree mortality: vapor pressure deficit is more important than temperature per se in causing decline in tree health. **Ecology and Evolution**, v. 3, n. 8, p. 2711-2729, 2013.
- ENCINAS, J.I.; SILVA, G.F.; TICCHETTI, I. **Variáveis dendrométricas**. Brasília: UnB, Departamento de Engenharia Florestal, 102 p., 2002.
- ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA (EMA). **Dados meteorológicos**. Araras: Centro de Ciências Agrárias, 2021-2022. Disponível em: <<http://www.meteorologia-ara.ufscar.br/dados-meteorologicos/>>.

GABURRO, T.A.; GAMA, V.N.; ZANETTI, L.; MILANEZ, C.R.D.; CUZZUOL, G.R.F. Physiological variables related to photosynthesis are more plastic than the morphological and biochemistry in non-pioneer tropical trees under contrasting irradiance. **Brazilian Journal of Botany**, v. 37, n. 4, p. 395–402, 2014.

GANDOLFI, S.; JOLY, C.A.; LEITÃO FILHO, H.F. “Gaps of deciduousness”: cyclical gaps in tropical forests. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 2, p. 280-284, 2009.

GROSSIORD, C.; BUCKLEY, T.N., CERNUSAK, L.A.; NOVICK, K.A.; POULTER, B.; SIEGWOLF, R.T.; SPERRY, J.S.; MCDOWELL, N.G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. **New Phytologist**, v. 225, p. 1550-1566, 2020.

GUNATILLEKE, N.; NEIDEL, J.D.; RAMAN, T.R.S.; GUNARATNE, T.; ASHTON, M.; GAMAGE, S.; GUNATILLEKE, S.; TENNAKON, K.; KATHRIARACHCHI, H.; EDIRIWEERA, S.; GEEKIYANAGE, N.; BURSLEM, D.; SENEVIRATHNE, G.; MADAWALA, S.; GUNASEKERA, R.; MUDAPPA, D.; OSURI, A.M.; KASINATHAN, S.; BHAT, K.; BENDE, M.; YASSIR, I.; MILAN, P.; ARBAINSYAH; COMPENDIO, S.J. Ecological approaches to forest restoration: lessons learned from tropical wet Asia. *In*: FLORENTINE, S.; GIBSON-ROY, P.; DIXON, K.W.; BROADHURST, L (Eds.). **Ecological restoration: moving forward using lessons learned**, Springer Cham, 2023.

HAKAMADA, R.; GIUNTI NETO, C.; LEMOS, C. C. Z.; SILVA, S. R.; OTTO, M. S. G.; HALL, K. B.; STAPE, J. L. Validation of an efficient visual method for estimating leaf area index in clonal Eucalyptus plantations. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 78, n. 4, p. 275-281, 2016.

HETHERINGTON, A. M.; WOODWARD, F. I. The role of stomata in sensing and driving environmental change. **Nature**, London, v. 424, p. 901-908, 2003.

IBÁ - Indústria Brasileira de produtores de Árvores. **Relatório IBÁ 2022**. Brasília, 176 p., 2022. Disponível em: <<http://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. Manuais Técnicos em Geociências. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2012.

JOSÉ, A.B.S.; PRADO, N.B.; BOMFIM, M.P.; REBOUÇAS, T.N.H.; MENDES, H.T.A. Marcha na absorção de nutrientes em Anonáceas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, p. 176-183, 2014.

KAGEYAMA, P.Y.; CASTRO, C.F.A. Sucessão secundária, estrutura genética e plantações de espécies arbóreas nativas. **IPEF**, n. 41/42, p. 83-93, 1989.

LENTH, R; BOLKER, B.; BUERKNER, P.; GINÉ-VÁZQUEZ, I.; HERVE, M.; JUNG, M.; LOVE, J; MIGUEZ, F.; RIEBL, H.; SINGMANN, H. **emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means** (Version 1.3.4), 2019.

LENTINI, M.; SOBRAL, L.; VIEIRA, R. Como o mercado de produtos madeireiros da Amazônia evoluiu nas últimas décadas (1998-2018). **Imaflora**, n. 2, 2020. Disponível em:

<https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/boletim_timberflow_2_abril_2020.pdf>.

LIU, C.L.C.; KUCHMA, O.; KRUTOVSKY, K.V. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. **Global Ecology and Conservation**, v. 15, 2018.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992.

NANNI, A.S.; SLOAN, S.; AIDE, T.M.; GRAESSER, J.; EDWARDS, D.; GRAU, H.R. The neotropical reforestation hotspots: A biophysical and socioeconomic typology of contemporary forest expansion. **Global Environmental Change**, v. 54, p. 148-159, 2019.

NGUYEN, H., FIRN, J., LAMB, D., HERBOHN, J. Wood density: a tool to find complementary species for the design of mixed species plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 334, p. 106-113, 2014.

NICHOLLS, A.O. How to make biological surveys go further with generalised linear models. **Biological Conservation**, v. 50, p. 51-75, 1989.

PARRESOL, B.R.; DEVALL, M.S. Patterns of diametric growth in stem-analyzed laurel trees (*Cordia alliodora*) in a Panamanian forest. **The Southwestern Naturalist**, v. 58, p. 170-178, 2013.

PAYN, T.; CARNUS, J.M.; FREER-SMITH, P.; KIMBERLEY, M.; KOLLERT, W.; LIU, S.; ORAZIO, C.; RODRIGUEZ, L.; SILVA, L.N.; WINGFIELD, M.J. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57-67, 2015.

PIÑA-RODRIGUES, F.C.M; SILVA, J.M.S. (Org.). **Silvicultura tropical: o potencial madeireiro e não madeireiro das espécies tropicais**. Sorocaba: Ed. Dos Autores, livro eletrônico, 595 p., 2021.

PIOTTO, D., FLESHER, K., NUNES, A.C.P., ROLIM, S., ASHTON, M. AND MONTAGNINI, F. "Restoration plantings of non-pioneer tree species in open fields, young secondary forests, and rubber plantations in Bahia, Brazil." **Forest Ecology and Management**, v. 474, 2020.

PIOTTO, D.; PIÑA-RODRIGUES, F.; VERDADE, L.M.; CALMON, M.; FREITAS, M.L.M.; ROLIM, S.; BRIENZA JUNIOR, S. **Programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Silvicultura de Espécies Nativas**. Coalização Brasil, 2021.

POORTER, L.; BONGERS, L.; BONGERS, F. Architecture of 54 moist-forest tree species: traits, trade-offs, and functional groups. **Ecology**, v. 87, n. 5, p. 1289-1301, 2006.

PORTELA, F.C.S.; MACIEIRA, B.P.B.; ZANETTI, L.V.; GAMA, V.N.; SILVA, D.M.; MILANEZ, C.R.D.; CUZZUOL, G.R.F. How does *Cariniana estrellensis* respond to different irradiance levels? **Journal of Forestry Research**, v. 30, n. 1, p. 31-44, 2019.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing**. Vienna, 2022.

RÊGO, G.M.; POSSAMAI, E. **Recomposição florestal: cultivo de jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*)**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 24 p., 2001. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Circular Técnica 25).

REZENDE, A. **Uso de sistemas agroflorestais como alternativa de restauração ecológica associada a diferentes métodos de controle de plantas daninhas**. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) - Centro de Ciências Agrária, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2019.

ROLIM, S. G.; PIOTTO, D. (Eds). **Silvicultura e tecnologia de espécies da Mata Atlântica**. Editora Rona, Belo Horizonte, 160 p., 2018.

ROLIM, S.G.; PIÑA-RODRIGUES, F.C.M.; PIOTTO, D.; BATISTA, A.; FREITAS, M.L.M.; BRIENZA JUNIOR, S.; ZAKIA, M.J.B.; CALMON, M. **Research gaps and priorities in silviculture of native species in Brazil**. Working paper. São Paulo, 2019. WRI Brasil. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/publicacoes>>.

ROSA, M.R.; BRANCALION, P.H.S.; CROUZEILLES, R.; TAMBOSI, L.R.; PIFFER, P.R.; LENTI, F.E.B.; HIROTA, M.; SANTIAMI, E.; METZGER, J.P. Hidden destruction of older forests threatens Brazil's Atlantic Forest and challenges restoration programs. **Science Advances**, v. 7, 2021.

SANCHES, M.C.; MARZINEK, J.; BRAGIOLA, N.G.; NASCIMENTO, A.R.T. Morpho-physiological responses in *Cedrela fissilis* Vell. submitted to changes in natural light conditions: implications for biomass accumulation. **Trees**, v. 31, p. 215-227, 2017.

SANTOS, D. L; RAKOCEVIC, M.; TAKAKI, M.; RIBASKI, J. Morphological and physiological responses of *Cedrela fissilis* Vellozo (Meliaceae) seedlings to light. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 49, n. 1, p. 171-182, 2006.

SCHULZE, M. Technical and financial analysis of enrichment planting in logging gaps as a potential component of forest management in the eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 3/4, p. 866-879, 2008.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Mapa das florestas do Brasil**, 2019.

SIEBENEICHLER, S.C.; FREITAS, G.A.; SILVA, R.R.; ADORIAN, G.C.; CAPELLARI, D. Características morfofisiológicas em plantas de *Tabebuia heptaphylla* (Vell.) Tol. em condições de luminosidade. **Acta Amazônica**, v.38, n.3, p.467-472, 2008.

SILVA, B.M.S.; LIMA, J.D.; DANTAS, V.A.V.; MORAES, W.S.; SABONARO, D.Z. Efeito da luz no crescimento de mudas de *Hymenaea parvifolia* Huber. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1019-1026, 2007.

SILVA, C.C. **Potencial de espécies nativas para a produção de madeira serrada em plantios de restauração florestal**. Piracicaba, 99 p., 2013.

SILVESTRINI, M.; VÁLIO, I.F.M.; MATTOS, E.A. Photosynthesis and carbon gain under contrasting light levels in seedlings of a pioneer and a climax tree from Brazilian Semideciduous Tropical Forest. **Brazilian Journal of Botany**, v. 30, n. 3, p. 463-474, 2007.

SMITH, W.K.; BERRY, Z.C. Sunflecks? **Tree Physiology**, v. 33, n. 3, p. 233-237, 2013.

SOS MATA ATLÂNTICA. **O Novo Código Florestal nos Estados da Mata Atlântica. Relatório Técnico**. Fundação SOS Mata Atlântica, 2016.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**. Relatório Anual, 2021.

SOUZA, R. P.; VÁLIO, I. F. M. Seedling growth of fifteen Brazilian tropical tree species differing in successional status. **Brazilian Journal of Botany**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 35-47, 2003.

SOUZA, C.R.; AZEVEDO, C.P.; LIMA, R.L.; ROSSI, L.M.B. Comportamento de espécies florestais em plantios a pleno sol e em faixas de enriquecimento de capoeira na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 1, p. 127-134, 2010.

SOUZA, C.E.M.; VILAS-BOAS, O.; DURIGAN, G. Sobrevivência e crescimento de espécies tropicais madeireiras em consórcio com espécie pioneira em diferentes proporções. **Revista do Instituto Florestal**, v. 27, p. 155-165, 2015a.

SOUZA, F.B.M.; PIO, R.; COELHO, V.A.T.; RODAS, C.L.; SILVA, I.P. Sintomas visuais de deficiência de macronutrientes boro e ferro e composição mineral de amoreira-preta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 241-248, 2015b.

STRASSBURG, B.B.N.; LATAWIEC, A.E.; BARIONI, L.G.; NOBRE, C.A.; SILVA, V.P. da S.; VALENTIM, J.F.; VIANNA, M.; ASSAD, E.D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84-97, 2014.

THOMAS, E.; JALONEN, R.; LOO, J.; BOSHIER, D.; GALLO, L.; CAVERS, S.; BORDACS, S.; SMITH, P.; BOZZANO, M. Genetic considerations in ecosystem

restoration using native tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 333, p. 66-75, 2014.

VALLADARES, F.; NIINEMETS, U. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, vol. 39, p. 237–257, 2008.

WANGINIÁK, T.C.R. **Desenvolvimento inicial de guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess. Clusiaceae) em sistema sob cobertura e a pleno sol**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), Botucatu, 2016.

WAY, D.A.; PEARCY, R.W. Sunflecks in trees and forests: from photosynthetic physiology to global change biology. **Tree Fisiology**, v. 32, n. 9, p. 1066 – 1081, 2012.

WHITMORE, T.C. **Tropical rain forests of the far East**. Oxford, Clarendon Press, 282p., 1975.

YOSHIDA, F. A.; STOLF, R. Mapeamento digital de atributos e classes de solos da UFSCar-Araras/SP. **Ciência, Tecnologia & Ambiente**, Araras, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2016.

ZOBEL, B.J.; BUIJTENEN, J.P. **Wood Variation: its causes and control**. Springer-Verlag, 1989.

9. Anexos

Anexo 1. Análises químicas (micro e macronutrientes) e análise física do solo das duas áreas de restauração florestal, realizadas em abril de 2023.

ÁREA SOMBREADA											
Profundidade	Areia total	Silte	Argila	Textura	B	Cu	Fe	Mn	Zn	pH CaCl2	M.O.
	g kg ⁻¹			-	mg.dm ⁻³					-	g.dm ⁻³
0-20 cm	205	192	603	high clay	0.25	4.3	15	58.9	1.3	4.84	23.7
20-40 cm	193	153	654	high clay	0.20	3.8	12.9	32.7	0.9	5.02	19.9
Profundidade	P	S	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	mg.dm ⁻³		mmolc.dm ⁻³							%	
0-20 cm	17.2	<12	26	12.2	1.38	<0.1	50	39.6	89.6	44	0
20-40 cm	10.2	24.8	25.7	11.5	0.32	<0.1	43.6	37.5	81.1	46	0

ÁREA PLENO SOL											
Profundidade	Areia total	Silte	Argila	Textura	B	Cu	Fe	Mn	Zn	pH CaCl2	M.O.
	g kg ⁻¹			-	mg.dm ⁻³					-	g.dm ⁻³
0-20 cm	307	166	527	clay	0,21	2,8	18,4	22,6	2	5,13	23,4
20-40 cm	267	107	626	high clay	0,18	2,9	10,1	11,1	0,8	4,96	15,6
Profundidade	P	S	Ca	Mg	K	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
	mg.dm ⁻³		mmolc.dm ⁻³							%	
0-20 cm	11,8	<12	29,8	19,7	1,39	<0,1	39,2	50,9	90,1	56	0
20-40 cm	8,3	16,7	21,7	10,5	0,45	<0,1	39,6	32,7	72,3	45	0

Fonte: Departamento de Ciência do Solo (LSO), ESALQ – USP, Piracicaba - SP. P: Fósforo; M.O: Matéria Orgânica; pH: Acides do Solo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; H+Al: Acidez Potencial; Al: Alumínio; SB: Soma de Bases; CTC: Capacidade de Troca de Cátions; V: Saturação de Bases; m: Saturação de Alumínio; S: Enxofre; B: Boro; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco; arg: argilosa; mt-arg: muito argilosa.

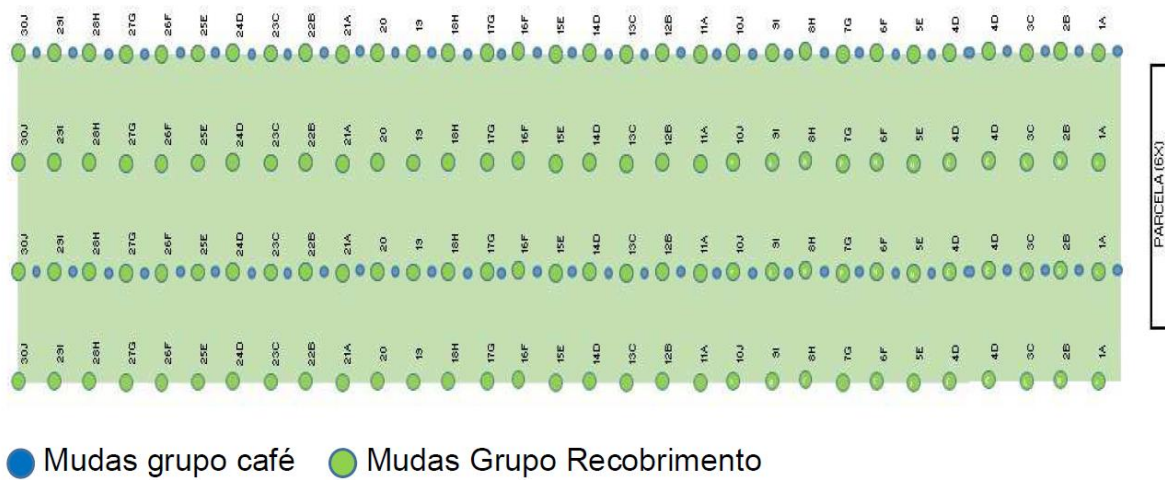
Anexo 2. Espécies arbóreas nativas pioneiras e não-pioneiras plantadas em 2021, em restauração florestal que constitui a área a pleno sol desse experimento. 1: pioneira; 2: não-pioneira.

Nome científico	Família	Nome Comum	Grupo ecológico
<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Anacardiaceae	Guaritá	não-pioneira
<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart.	Apocynaceae	Guatambu	não-pioneira
<i>Tabernaemontana hystrix</i> Steud.	Apocynaceae	Leiteiro	pioneira
<i>Handroanthus chrysotrichus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	Bignoniaceae	Ipê-amarelo	não-pioneira
<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	Bignoniaceae	Ipê-roxo	não-pioneira
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	Boraginaceae	Louro-pardo	pioneira
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	Fabaceae	Timburi	pioneira
<i>Inga affinis</i> DC.	Fabaceae	Ingá	pioneira
<i>Inga marginata</i> Willd.	Fabaceae	Ingá-feijão	pioneira
<i>Parapiptadenia rigida</i> (Benth.) Brenan	Fabaceae	Angico	não-pioneira
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	Fabaceae	Canafístula	não-pioneira
<i>Senna multijuga</i> (Rich.) H. S. Irwin & Barneby	Fabaceae	Pau-cigarra	pioneira
<i>Aegiphila sellowiana</i> Cham.	Lamiaceae	Tamanqueiro	pioneira
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	Lecythidaceae	Jequitibá-branco	não-pioneira
<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	Lecythidaceae	Jequitibá-rosa	não-pioneira
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	Malvaceae	Paineira	pioneira
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Malvaceae	Mutambo	pioneira
<i>Heliocarpus americanus</i> L.	Malvaceae	Jangada-brava	pioneira
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Meliaceae	Cedro-rosa	não-pioneira
<i>Eugenia uniflora</i> L.	Myrtaceae	Pitanga	não-pioneira
<i>Psidium cattleianum</i> Sabine	Myrtaceae	Araçá-rosa	não-pioneira
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	Primulaceae	Capororoca	não-pioneira
<i>Genipa americana</i> L.	Rubiaceae	Jenipapeiro	não-pioneira
<i>Esenbeckia leiocarpa</i> Engl.	Rutaceae	Guarantã	não-pioneira
<i>Solanum granuloseprosum</i> Dunal	Solanaceae	Fumo-bravo	pioneira
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	Verbenaceae	Tucaneira	pioneira

Anexo 3. Espécies arbóreas nativas pioneiras plantadas em 2018, em restauração florestal que hoje constitui a área sombreada desse estudo.

Nome científico	Família	Nome Comum
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	Anacardiaceae	Aroeira-pimenteira
<i>Croton floribundus</i> Spreng.	Euphorbiaceae	Capixingui
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	Fabaceae	Canafístula-branca
<i>Aegiphilla sellowiana</i> Cham.	Lamiaceae	Fruta-de-papagaio
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	Malvaceae	Paineira
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Malvaceae	Mutamba-verdadeira
<i>Heliocarpus americanus</i> L.	Malvaceae	Jangada-algodão
<i>Colubrina grandulosa</i> Perkins	Rhamnaceae	Sanguaraji-vermelho
<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	Urticaceae	Embaúba-branca
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	Verbenaceae	Pau-viola

Anexo 4. Croqui do plantio da restauração com sistema agroflorestal implantado em 2018 no CCA/UFSCar, em Araras – SP (REZENDE, 2019).



Anexo 5. Espécies arbóreas plantadas em 2021 no plantio de enriquecimento de sub-bosque da área sombreada.

Nome científico	Família	Nome Comum
<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Anacardiaceae	Guaritá
<i>Aspidosperma subincanum</i> Mart.	Apocynaceae	Guatambu
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	Boraginaceae	Louro-pardo
<i>Handroanthus chrysotricha</i> (Mart. ex. DC.) Standl.	Bignoniaceae	Ipê-amarelo
<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	Bignoniaceae	Ipê-roxo
<i>Inga marginata</i> Willd.	Fabaceae	Ingá-feijão
<i>Parapiptadenia rigida</i> (Benth.) Brenan	Fabaceae	Gurucaia
<i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub.	Fabaceae	Canafístula
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	Lecythidaceae	Jequitibá-
<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	Lecythidaceae	Jequitibá-rosa
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	Malvaceae	Paineira-rosa
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Meliaceae	Cedro-rosa
<i>Eugenia uniflora</i> L.	Myrtaceae	Pitanga
<i>Psidium cattleyanum</i> Sabine	Myrtaceae	Araçá-rosa
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	Primulaceae	Capororoca
<i>Genipa americana</i> L.	Rubiaceae	Jenipapeiro
<i>Esenbeckia leiocarpa</i> Engl.	Rutaceae	Guarantã

Anexo 6. Espécies madeireiras tardias plantadas em 2021 e selecionadas para compor este estudo.

* Espécies incluídas no Programa de Pesquisa e Desenvolvimento em Silvicultura de Espécies Nativas do Brasil, lançado pela Coalizão Brasil em 2021 (ROLIM *et al.*, 2019).

Nome científico	Família	Nome Comum
* <i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Anacardiaceae	Guarítá
* <i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex	Boraginaceae	Louro-pardo
<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.)	Bignoniaceae	Ipê-roxo
<i>Parapiptadenia rigida</i> (Benth.) Brenan	Fabaceae	Gurucaia
<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	Lecythidaceae	Jequitibá-branco
* <i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	Lecythidaceae	Jequitibá-rosa
* <i>Cedrela fissilis</i> Vell.	Meliaceae	Cedro-rosa
<i>Esenbeckia leiocarpa</i> Engl.	Rutaceae	Guarantã

Anexo 7. Modelos lineares generalizados (GLM) testados para comparar crescimento em altura (CR_H) e diâmetro à altura do solo (CR_{DAS}) entre plantios a pleno sol e sob sombra. Os modelos selecionados para análise estão em negrito.

12 meses				
Modelo - CR_H (cm,cm ⁻¹)	Valor-p	R ²	AIC	weight
modelo0=glm(log(CRH+1)~ESPECIES+AREA)	0,0000	0,86	847,0	<0,001
modelo1=glm(log(CRH+1)~ESPECIES*AREA)	0,0000	0,90	678,6	0,380
modelo2=glm(log(CRH+1)~ESPECIES/AREA)	0,0000	0,90	678,6	0,380
Modelo - CR_{DAS} (cm,cm ⁻¹)				
modelo0=glm(CRDAS+1~ESPECIES+AREA, family = Gamma)	0,0000	0,74	4146,2	0,130
modelo1=glm(CRDAS+1~ESPECIES*AREA, family = Gamma)	0,0000	0,74	4143,8	0,430
modelo2=glm(CRDAS+1~ESPECIES/AREA, family = Gamma)	0,0000	0,74	4143,8	0,430
19 meses				
Modelo - CR_H (cm,cm ⁻¹)				
modelo0=glm(log(CRH+1)~ESPECIES+AREA)	0,0000	0,85	1125,9	<0,001
modelo1=glm(log(CRH+1)~ESPECIES*AREA)	0,0000	0,88	954,68	0,280
modelo2=glm(log(CRH+1)~ESPECIES/AREA)	0,0000	0,88	954,68	0,280
Modelo - CR_{DAS} (cm,cm ⁻¹)				
modelo0=glm(CRDAS+1~ESPECIES+AREA, family = Gamma)	0,0000	0,75	4286,3	0,918
modelo1=glm(CRDAS+1~ESPECIES*AREA, family = Gamma)	0,0000	0,75	4292,5	0,041
modelo2=glm(CRDAS+1~ESPECIES/AREA, family = Gamma)	0,0000	0,75	4292,5	0,041

Anexo 8. Modelos lineares generalizados (GLM) testados para verificar a interação entre variáveis ambientais e variáveis de crescimento em plantio sombreado aos 12 meses. Os modelos selecionados para análise estão em negrito. CR_H: crescimento relativo em altura. CR_{DAS}: crescimento relativo do diâmetro à altura do solo. DPV: déficit de pressão de vapor. LUX: luminosidade.

12 meses				
Modelo - CR _H (cm,cm ⁻¹)	Valor-p	R ²	AIC	weight
modelo0=glm(log(CRH+1)~ DPV+LUX)	0,7700	0,00	430,30	<0,001
modelo1=glm(log(CRH+1)~ DPV/LUX)	0,7600	0,00	430,20	<0,001
modelo2=glm(log(CRH+1)~ DPV*LUX)	0,9000	0,00	232,30	<0,001
modelo3=glm(log(CRH+1)~LUX)	0,5100	0,00	428,30	<0,001
modelo4=glm(log(CRH+1)~DPV)	0,6700	0,00	428,50	<0,001
modelo5=glm(log(CRH+1)~DPV/ESPECIES)	0,0000	0,44	329,60	0,053
modelo6=glm(log(CRH+1)~DPV*ESPECIES)	0,0000	0,49	328,00	0,079
modelo7=glm(log(CRH+1)~LUX/ESPECIES)	0,0000	0,31	368,20	<0,001
modelo8=glm(log(CRH+1)~LUX*ESPECIES)	0,0000	0,51	324,00	0,868
modelo9=glm(log(CRH+1)~LUX/DPV/ESPECIES)	0,0000	0,30	375,00	<0,001
modelo10=glm(log(CRH+1)~LUX*DPV*ESPECIES)	0,0000	0,54	352,20	<0,001
modelo11=glm(log(CRH+1)~LUX*ESPECIES+DPV*ESPECIES)	0,0000	0,53	336,30	0,002
Modelo - CR _{DAS} (cm,cm ⁻¹)				
modelo0=glm(CRDAS+1~DPV+LUX, family = Gamma)	0,0600	0,05	167,7	<0,001
modelo1=glm(CRDAS+1~DPV*LUX, family = Gamma)	0,0200	0,08	166,3	<0,001
modelo2=glm(CRDAS+1~DPV/LUX, family = Gamma)	0,0500	0,05	167,3	<0,001
modelo3=glm(CRDAS+1~DPV/ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,49	118,1	0,969
modelo4=glm(CRDAS+1~DPV*ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,54	125,1	0,029
modelo5=glm(CRDAS+1~LUX/ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,26	152,4	<0,001
modelo6=glm(CRDAS+1~LUX*ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,50	131,7	0,001
modelo7=glm(CRDAS+1~LUX*DPV*ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,66	145,1	<0,001
modelo8=glm(CRDAS+1~DPV/ESPECIES+LUX/ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,52	131,2	0,001
modelo9=glm(CRDAS+1~DPV*ESPECIES+LUX*ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,58	138,1	<0,001
modelo10=glm(CRDAS+1~DPV, family = Gamma)	0,0300	0,04	166,4	<0,001
modelo11=glm(CRDAS+1~LUX, family = Gamma)	0,1900	0,01	169,8	<0,001

Anexo 9. Modelos lineares generalizados (GLM) testados para verificar a interação entre variáveis ambientais e variáveis de crescimento em plantio sombreado aos 19 meses. Os modelos selecionados para análise estão em negrito. CR_H: crescimento relativo em altura. CR_{DAS}: crescimento relativo do diâmetro à altura do solo. DPV: déficit de pressão de vapor. LUX: luminosidade.

19 meses				
Modelo - CR _H (cm,cm ⁻¹)	Valor-p	R ²	AIC	weight
modelo0=glm(log(CRH+1)~ DPV+LUX)	0,8800	0,00	460,4	<0,001
modelo1=glm(log(CRH+1)~ DPV/LUX)	0,7600	0,00	460,1	<0,001
modelo2=glm(log(CRH+1)~ DPV*LUX)	0,4200	0,01	459,9	<0,001
modelo3=glm(log(CRH+1)~LUX)	0,6100	0,00	458,3	<0,001
modelo4=glm(log(CRH+1)~DPV)	0,8500	0,00	458,6	<0,001
modelo5=glm(log(CRH+1)~DPV/ESPECIES)	0,0000	0,48	346,0	0,314
modelo6=glm(log(CRH+1)~DPV*ESPECIES)	0,0000	0,52	344,6	0,615
modelo7=glm(log(CRH+1)~LUX/ESPECIES)	0,0000	0,38	378,8	<0,001
modelo8=glm(log(CRH+1)~LUX*ESPECIES)	0,0000	0,51	349,0	0,071
modelo9=glm(log(CRH+1)~LUX/DPV/ESPECIES)	0,0000	0,36	387,1	<0,001
modelo10=glm(log(CRH+1)~LUX*DPV*ESPECIES)	0,0000	0,58	362,1	<0,001
modelo11=glm(log(CRH+1)~LUX*ESPECIES+DPV*ESPECIES)	0,0000	0,55	354,9	0,004
Modelo - CR _{DAS} (cm,cm ⁻¹)				
modelo0=glm(CRDAS+1~DPV+LUX, family = Gamma)	0,7600	0,00	191,2	<0,001
modelo1=glm(CRDAS+1~DPV*LUX, family = Gamma)	0,8200	0,01	193,0	<0,001
modelo2=glm(CRDAS+1~DPV/LUX, family = Gamma)	0,7100	0,01	191,1	<0,001
modelo3=glm(CRDAS+1~DPV/ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,37	151,0	0,069
modelo4=glm(CRDAS+1~DPV*ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,45	154,4	0,013
modelo5=glm(CRDAS+1~LUX/ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,30	162,1	<0,001
modelo6=glm(CRDAS+1~LUX*ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,49	145,8	0,905
modelo7=glm(CRDAS+1~LUX*DPV*ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,56	174,1	<0,001
modelo8=glm(CRDAS+1~DPV/ESPECIES+LUX/ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,46	154,5	0,012
modelo9=glm(CRDAS+1~DPV*ESPECIES+LUX*ESPECIES, family = Gamma)	0,0000	0,53	159,0	0,001
modelo10=glm(CRDAS+1~DPV, family = Gamma)	0,8000	0,00	189,7	<0,001
modelo11=glm(CRDAS+1~LUX, family = Gamma)	0,4500	0,00	189,2	<0,001

Anexo 10. Mortalidade geral (%) de mudas de espécies arbóreas nativas plantadas a pleno sol e sob sombreamento natural e comparação entre as áreas da proporção de mudas mortas. Valores significativos ($p < 0,05$) estão em negrito. Valores parcialmente significativos ($0,05 < p < 0,1$) estão em itálico. χ^2 : Teste chi-quadrado.

Áreas	12 meses			19 meses		
	%	χ^2	Teste-t	%	χ^2	Teste-t
Pleno sol	16,52	0,0027	<i>0,0994</i>	22,76	0,0067	<i>0,0606</i>
Sombreado	23,96			26,63		

Anexo 11. Comparação entre áreas da proporção de mudas mortas de cada espécie. Valores de p significativos ($< 0,05$) estão em negrito. Valores parcialmente significativos ($0,05 < p < 0,1$) estão em itálico. χ^2 : Teste chi-quadrado.

Espécies	χ^2	
	12 meses	19 meses
<i>Astronium graveolens</i>	0,1640	0,5172
<i>Cariniana estrellensis</i>	0,1088	0,1295
<i>Cariniana legalis</i>	0,3552	0,1020
<i>Cedrela fissilis</i>	<i>0,0987</i>	0,5287
<i>Cordia trichotoma</i>	0,1877	0,9053
<i>Esenbeckia leiocarpa</i>	0,2951	0,8266
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	0,0003	< 0,0001
<i>Parapiptadenia rigida</i>	0,6957	1