



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS GENÉTICOS VEGETAIS

Eder Favretto

Quanta diversidade funcional é necessária para acelerar o desenvolvimento inicial de agroflorestas e da restauração ecológica?

Florianópolis, 2024.

Eder Favretto

Quanta diversidade funcional é necessária para acelerar o desenvolvimento inicial de agroflorestas e da restauração ecológica?

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina.
Orientador: Dr. Ilyas Siddique
Coorientador: Dr. Fernando Joner

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Favretto, Eder

Quanta diversidade funcional é necessária para acelerar o desenvolvimento inicial de agroflorestas e da restauração ecológica? / Eder Favretto ; orientador, Ilyas Siddique, coorientador, Fernando Joner, 2024.

96 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Recursos Genéticos Vegetais. 2. Ecologia funcional. 3. Sistemas agroflorestais. 4. Complementaridade. 5. Restauração ecológica. I. Siddique, Ilyas. II. Joner, Fernando. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais. IV. Título.

Eder Favretto

Quanta diversidade funcional é necessária para acelerar o desenvolvimento inicial de agroflorestas e da restauração ecológica?

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof^a. Sandra Cristina Müller, Dra.

UFRGS

André Luiz Giles de Oliveira, Dr.

CCA/UFSC

Prof^a. Ana Catarina Conte Jakovac, Dra.

CCA/UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de doutor em Ciências.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr. Ilyas Siddique

Orientador

Florianópolis, 2024

Dedico este trabalho a quem, de alguma forma, se sentiu ou se sente parte desta caminhada agroflorestal.

AGRADECIMENTOS

Um processo que se desenvolve ao longo de vários anos é, sem dúvida, resultado da contribuição de diversas pessoas e instituições. Portanto, agradeço:

- Aos Professores Ilyas Siddique e Fernando Joner, pela valiosa orientação, apoio e parceria durante todo o doutorado.
- Aos integrantes e amigos do Laboratório de Ecologia Aplicada (LEAp – UFSC) pela ajuda no experimento, nos mutirões de implantação e manejo agroflorestal, e nas diversas discussões sobre os rumos metodológicos e analíticos dos trabalhos: Larissa A. Augusto, Larisse M. de Azevedo Cavalcante, Marinice Teleginski, Diogo Feistauer, Jhoan Sebastian Mora Rave, Rinaldo Oriano Júnior, Maraísa R. Braga, Felipe M. Corrêa, Izabela M. dos Santos, Valdeir Lima, Thomás F. Boscaine, Renata Lucas, Fabíola Martins, João Artur M. Gonzaga, e muitos outros voluntários que contribuíram com estimadas horas de trabalho. Em especial, agradeço a Djalma Roecker Junior pelas incansáveis horas de discussões científicas e elaborações textuais, além das importantes contribuições em campo desde os momentos iniciais.
- Aos professores Maurício Sedrez dos Reis, Alexandre Siminski, Diego dos Santos, Tiago Montagna, Ana Catarina Conte Jakovac, Sandra Cristina Müller, Eduardo Luís Hettwer Giehl e Adelar Mantovani, que se dedicaram a entender e propor ativamente, através de ideias e “convites” para reflexão.
- Ao professor Robson Carlos Avi e ao Horto Florestal da UNIDAVI, pelo auxílio no desafio de encontrar, identificar e propagar as dezenas de espécies utilizadas no experimento.
- Ao Programa de Excelência Acadêmica (PROEX) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para implantação e manutenção do experimento.
- Ao Instituto Federal Catarinense – Campus Rio do Sul (IFC) pelos dois anos de afastamento parcial, que se somaram a mais dois anos de afastamento integral para realização do doutorado.
- Sou profundamente grato à minha família e a todos que, de alguma forma, fizeram parte desse espaço familiar, ainda que por um breve momento. O apoio que recebi foi fundamental nos momentos de adversidade, ajudando-me a cultivar

paciência, tolerância, persistência e resiliência. Agradeço especialmente àqueles que compreenderam a complexidade de ser, simultaneamente, doutorando, pai, agricultor e servidor público. Conciliar essas diferentes funções envolve inúmeros *trade-offs*. Aceitar, entender e aprender com esses desafios foi uma experiência transformadora. Este período foi, sem dúvida, intenso e enriquecedor, marcado pela consciência de que há tanto potenciais a serem explorados quanto limites claros a serem respeitados.

- Agradeço a todos que fazem parte da minha história, pois foi caminhando que o caminho se fez, e cada um contribuiu de forma única e essencial para essa trajetória.

RESUMO

Falhas comuns e custosas durante o estabelecimento inicial de árvores de lento crescimento em pomares, plantios florestais e restauração ecológica, são em parte devidas às condições microclimáticas, edáficas, de luminosidade, herbivoria e competição com vegetação espontânea. Ainda faltam regras de montagem generalizáveis e úteis para guiar a combinação de espécies compatíveis e assim criar as condições ecológicas adequadas para árvores valiosas sensíveis, aproveitando os processos de facilitação e complementaridade, minimizando a competição. Portanto, objetivou-se estabelecer critérios generalizáveis para guiar praticantes agroflorestais na escolha de espécies de crescimento rápido e vida curta, adequadas para promover o estabelecimento de árvores tolerantes à sombra de lento crescimento e alto valor econômico e ecológico. Para testar se a diversidade de grupos funcionais universais e amplamente reconhecíveis de plantas prediz a compatibilidade de crescimento de até quatro espécies plantadas juntas em núcleos adensados de 50 cm de diâmetro, foi implementado um experimento no município de Rio do Sul (SC), na região sul do Brasil. 100 espécies de plantas com importantes funções ecológicas e/ou econômicas foram classificadas em quatro grupos funcionais simples com base em sua longevidade. Os grupos funcionais foram combinados em consórcios de duas espécies ('bicultivos') e quatro espécies ('tetracultivos') e plantados em 525 unidades experimentais ('núcleos'). Assim, o delineamento experimental representa um gradiente de diversidade funcional na longevidade (e indiretamente na altura máxima da planta), que variam ao longo do tempo à medida que as plantas anuais completam seu ciclo de vida e os grupos funcionais de vida mais longa crescem proporcionalmente em tamanho (aumentando os pesos na diversidade funcional e nas médias funcionais). Os resultados mostram que os grupos funcionais propostos são complementares e usá-los em agrofloresta ou restauração florestal acelera o crescimento inicial e, provavelmente, a sucessão ecológica. A diversidade funcional tem um efeito positivo no desenvolvimento de espécies de longa vida e crescimento lento, e o design agroflorestal pode aproveitar esse efeito para facilitar o estabelecimento dessas espécies com alto valor ecológico e potencial econômico. Há um possível *trade-off* entre a produção agrícola de curto prazo e o desenvolvimento de árvores de alto valor ecológico. O corte seletivo de biomassa (corte, desbaste, poda) é essencial para superar esse *trade-off* e maximizar o acúmulo de biomassa, o fechamento do dossel e a melhoria do microclima. Os grupos funcionais de longevidade usados por profissionais de agrofloresta têm relevância ecológica e podem ser úteis para o planejamento prático em agrofloresta e restauração.

Palavras-chave: Atributo funcional. Complementaridade. Consórcios. Facilitação. Árvores de longa-vida. Sucessão

ABSTRACT

Widespread and costly failures of valuable slow-growing trees during the initial establishment of orchards, timber plantations and ecological restoration, are partly due to microclimatic, soil, light constraints, herbivory and competition with spontaneous vegetation. We still lack generalizable assembly rules useful for practitioners to combine compatible species to create suitable ecological conditions promoting sensitive, high-value trees, by harnessing facilitation and complementarity, while minimizing competition. Therefore, my objective was to establish generalizable decision criteria to guide agroforest practitioners in selecting compatible fast-growing species with short life spans, to promote the establishment of slow-growing shade-tolerant trees with high economic and ecological value. To test whether the diversity of universal, widely recognizable functional groups of plants predicts the growth compatibility among up to four species planted densely together in nuclei of 50cm diameter, an experiment was implemented in Rio do Sul municipality (SC) in subtropical humid Southern Brazil. One hundred plant species with important ecological and/or economic functions were classified into four simple functional groups based on their longevity. The functional groups were combined into two-species ('bicultures') and four-species intercrops ('tetracultures') and planted in 525 experimental units ('nuclei'). Thus, the experimental design represents a gradient of functional diversity in longevity (and indirectly in maximum plant height), which vary over time as annuals complete their life cycle and longer-lived functional groups grow proportionally in size (increasing weights in functional diversity and functional means). The results show that the proposed functional groups are complementary and using them in agroforestry or forest restoration accelerates initial growth and likely ecological succession. Functional diversity has a positive effect on the development of long-lived, slow-growing species and agroforestry design can harness this effect to facilitate the establishment of these species with high ecological and potential economic value. There is a possible trade-off between short-term agricultural production and the development of trees of high ecological value. Selective biomass cutting (mowing, slashing, pruning) is key to overcome this trade-off and maximize biomass accrual, canopy closure and microclimate amelioration. The functional longevity groups used by agroforestry professionals have ecological relevance and may prove useful for practical planning in agroforestry and restoration.

Keywords: Functional trait. Complementarity. Intercropping. Facilitation. Long-lived trees. Succession.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Destaque de um núcleo de plantio experimental.....	9
Figura 2. Gradiente de diversidade funcional, processos e funções ecológicas a partir de combinações de grupos funcionais de plantas, sendo anual/longa vida (A), semi-perene/pioneira (B), anual/semi-perene/pioneira/longa vida (C), anual/pioneira (D), semi-perene/longa vida (E) e anual/semi-perene/pioneira/longa vida (F).	10
Figura 3. Imagem aérea do experimento com 18 meses após implantação a campo, ilustrando o gradiente topográfico dos três blocos 1, 2, 3 descendo a encosta (cada um com 1050m ²).	29
Figura 4. Representação dos 7 tratamentos funcionais (tetracultivo e bicultivos) e a distribuição dos pontos de plantio dos grupos funcionais nos núcleos de acordo com os pontos cardeais.	31
Figura 5. Ilustração do processo de preparo dos núcleos, posicionamento dos grupos funcionais e plantio.....	32
Figura 6. Coleta de dados de altura com uso de régua e de diâmetro à altura do solo com uso de paquímetro digital.	34
Figura 7. Valores do atributo funcional <i>Longevidade Máxima da Planta</i> em anos por grupo funcional (O número abaixo de cada grupo funcional indica a quantidade de espécies que continham valores desse atributo na literatura).....	35
Figura 8. Distribuição das espécies em função do atributo funcional <i>Altura Máxima da Planta</i> em metros por grupo funcional.....	36
Figura 9. Taxa de crescimento relativo de todas as espécies por grupo funcional dos 30 aos 90 dias (A) e dos 180 aos 450 dias (B) após transplante a campo. Os pontos representam os valores de cada espécie no núcleo e as linhas representam a distribuição dos pontos, onde a largura do “violino” representa a densidade de dados.	40
Figura 10. Área basal ao nível do solo por espécie no núcleo por grupo funcional aos 30 dias (A); aos 90 dias (B); aos 180 dias (C) e aos 450 dias (D). A partir dos 180 dias não há mais a presença das anuais e, portanto, nos gráficos C e D somente os grupos S, P e L estão representados. O ponto amarelo representa a média do grupo funcional.	42

Figura 11. Soma da área basal no nível do solo de todos os indivíduos plantados no núcleo por tratamento funcional aos 30 dias (A); 90 dias (B); 180 dias (C) e 450 dias (D). Os pontos pretos representam a média em cada tratamento funcional.	45
Figura 12. Média funcional (MF) da longevidade categórica em anos aos 90 dias (A); aos 180 dias (B) e aos 450 dias (C); e da altura máxima em metros aos 90 dias (D); aos 180 dias (E) e aos 450 dias (F) pela média funcional planejada. As cores representam os tratamentos funcionais.	48
Figura 13. Diversidade funcional (DF) da longevidade categórica aos 90 dias (A); aos 180 dias (B) e aos 450 dias (C); e da altura máxima aos 90 dias (D); aos 180 dias (E) e aos 450 dias (F) pela diversidade funcional planejada. As cores representam os tratamentos funcionais.	50
Figura 14. Taxa de crescimento relativo da longa vida dos 30 aos 180 dias em função dos diferentes tratamentos funcionais. (ASPL) tetracultivo, (AL) bicultivo de anual e longa vida, (SL) bicultivo de semi-perene e longa vida, (PL) bicultivo de pioneira e longa vida. Na cor amarela a média.	57
Figura 15. Taxa de crescimento relativo da longa vida dos 30 aos 450 dias em função dos diferentes tratamentos funcionais. (ASPL) tetracultivo, (AL) bicultivo de anual e longa vida, (SL) bicultivo de semi-perene e longa vida, (PL) bicultivo de pioneira e longa vida. Na cor amarela a média.	58
Figura 16. Taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias em função da diversidade funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.	59
Figura 17. Taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias em função da diversidade funcional (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.	60
Figura 18. Taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias em função da média funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.	61

Figura 19. Taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias em função da média funcional aos 30 dias (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.....	61
Figura 20. Área basal das espécies longa vida aos 450 dias em função da diversidade funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.	62
Figura 21. Área basal das espécies longa vida aos 450 dias em função da diversidade funcional (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.....	63
Figura 22. Área basal das espécies longa vida aos 450 dias em função da média funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.	63
Figura 23. Área basal das espécies longa vida aos 450 dias em função da média funcional (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Variáveis utilizadas	39
--------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DF – Diversidade Funcional

FD – Functional Diversity

FM – Functional mean

LEAp – Laboratório de Ecologia Aplicada da UFSC

MF – Média funcional

SAFs – Sistemas agroflorestais

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	9
2 GLOSSÁRIO	12
3 INTRODUÇÃO GERAL	13
4 REFERENCIAL TEÓRICO	16
4.1 BIODIVERSIDADE: USO E CONSERVAÇÃO	16
4.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS	18
4.3 RESTAURAÇÃO ATRAVÉS DE AGROFLORESTAS.....	20
4.4 ECOLOGIA FUNCIONAL.....	21
4.5 ATRIBUTOS FUNCIONAIS.....	22
4.6 ATRIBUTOS USUAIS E POTENCIAIS EM AGROECOSSISTEMAS	23
4.6.1 Longevidade.....	24
4.6.2 Altura	25
4.6.3 Taxa de crescimento relativo.....	25
4.7 COMPETIÇÃO, COMPLEMENTARIDADE E FACILITAÇÃO	26
5 OBJETIVOS	27
5.1 OBJETIVO GERAL	27
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
6 HIPÓTESES.....	28
7 MATERIAL E MÉTODOS	28
7.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA	28
7.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	30
7.3 IMPLANTAÇÃO E MANEJO EXPERIMENTAL.....	31
7.4 COLETA E OBTENÇÃO DE DADOS	33
7.5 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CRESCIMENTO RELATIVO (TCR), DA MÉDIA FUNCIONAL (MF), DIVERSIDADE FUNCIONAL (DF) E ÍNDICE DE TAMANHO (ESTIMADOR DE BIOMASSA).....	36
7.6 ANÁLISES DE DADOS	38
8 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
8.1 CAPÍTULO 1. UM OLHAR SOBRE AS DIVERSAS COMUNIDADES, GRUPOS E TRATAMENTOS FUNCIONAIS	39
8.1.1 Resultados	40
8.1.2 Discussão.....	51
8.1.3 Conclusão	55

8.2 CAPÍTULO 2. O EFEITO DA DIVERSIDADE FUNCIONAL E DA MÉDIA FUNCIONAL NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DE ESPÉCIES DE LONGA VIDA EM SAFS SUCESSIONAIS BIODIVERSOS	56
8.2.1 Resultados	56
8.2.2 Discussão	64
8.2.3 Conclusão	66
9 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68

1 APRESENTAÇÃO

Esta tese foi desenvolvida como parte de um experimento amplo, planejado para atender um conjunto de projetos de pesquisa, promovidos pelo Laboratório de Ecologia Aplicada (LEAp) da UFSC. O experimento foi implantado num estabelecimento rural no município de Rio do Sul (SC) no ano de 2019. Foram utilizadas 100 espécies de plantas em um sistema agroflorestal organizado em núcleos de plantio (Figura 1).



Figura 1. Destaque de um núcleo de plantio experimental.

O propósito principal da pesquisa foi explorar critérios generalizáveis para pautar a escolha de combinações de espécies facilitadoras e facilitadas, visando reduzir custos de implantação e manutenção de SAFs e, simultaneamente, favorecer o desenvolvimento inicial de árvores de alto valor econômico e/ou ecológico (Figura 2).

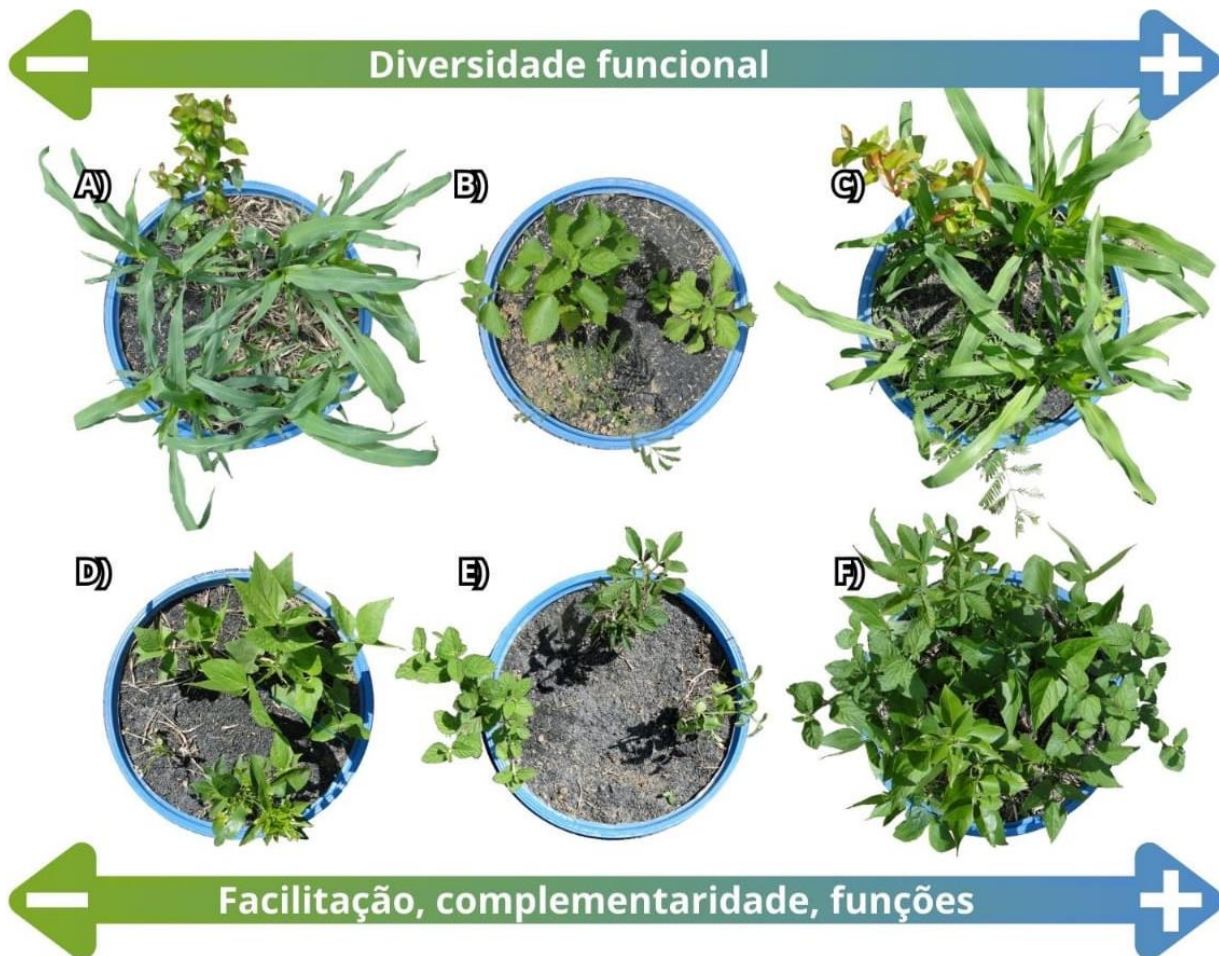


Figura 2. Gradiente de diversidade funcional, processos e funções ecológicas a partir de combinações de grupos funcionais de plantas, sendo anual/longa vida (A), semi-perene/pioneira (B), anual/semi-perene/pioneira/longa vida (C), anual/pioneira (D), semi-perene/longa vida (E) e anual/semi-perene/pioneira/longa vida (F).

A partir desse contexto, buscou-se explorar o processo de sucessão secundária a partir do uso de grupos funcionais, avaliando os efeitos da diversidade funcional no desenvolvimento das plantas. Essas espécies foram consorciadas em núcleos de plantio experimentais distribuídos numa área de pastagem degradada originalmente coberta por floresta ombrófila densa do bioma Mata Atlântica.

Adotou-se a abordagem da ecologia funcional para entender as relações entre plantas com diferentes longevidades (atributo funcional principal) consorciadas em um mesmo núcleo de plantio. O atributo altura máxima da planta também compõe o conjunto de dados para construção de índices de diversidade funcional. Os dados foram analisados através de modelos lineares de efeitos mistos que possibilitam compreender e dimensionar melhor os efeitos principais envolvidos na dinâmica ecológica de SAFs planejados a partir de atributos funcionais. Além desta tese, o

experimento forneceu dados para o desenvolvimento de duas dissertações de mestrado.

1) João Artur Moisés Gonzaga: Início em 2020 e término em 2022. O Ponto de Compensação de Luz da Planta Inteira para estimar a tolerância à sombra de plantas na restauração agroflorestal. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) - Universidade Federal de Santa Catarina.

2) Rinaldo Oriano Junior: Início em 2020 e término em 2023. Atributos funcionais de plantas indicam preferências alimentares de ovinos no estabelecimento de sistemas agroflorestais biodiversos? Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina.

A presente tese está composta por um glossário, introdução geral, referencial teórico, objetivos, hipóteses, material e métodos, resultados e discussão e considerações finais. Os resultados e discussão estão organizados em dois capítulos. O primeiro capítulo explora o desenvolvimento do SAF considerando os grupos funcionais, os tratamentos funcionais que combinam os grupos nos núcleos, a média e diversidade funcional planejada. No segundo capítulo, o foco principal está na avaliação do efeito da diversidade funcional e da média funcional no desenvolvimento inicial de espécies longa vida em SAFs.

2 GLOSSÁRIO

Agrofloresteiros: aquele que possuem os saberes de manejo na relação com a agrofloresta (Siddique; Dionísio; Simões-Ramos, 2017), ou seja, a práxis agroflorestal (Neto et al., 2016).

Atributo funcional: qualquer característica morfológica, fisiológica ou fenológica, mensurável em nível de indivíduo, que tem efeito sobre a adaptabilidade do indivíduo (Violle et al., 2007), podendo afetar também processos ecossistêmicos (Díaz; Cabido, 2001; Lavorel, S.; Garnier, 2002). Longevidade da planta, altura da planta, densidade específica do caule, área foliar e massa da semente, são alguns exemplos de atributos funcionais (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

Contribuições da Natureza para as Pessoas: são os benefícios fornecidos pelos ecossistemas que contribuem para tornar a vida humana possível e digna de ser vivida (Díaz et al., 2015a; Díaz; Cabido, 2001).

Diversidade funcional planejada: diversidade funcional calculada a partir da longevidade categórica ponderada pelo número de pontos de plantio no núcleo, reflete a diversidade funcional no momento do plantio.

Grupo funcional: conjunto de espécies com características funcionais semelhantes. No contexto desse trabalho, espécies organizadas numa mesma categoria, a partir da longevidade da planta espera em manejo agroflorestal.

Média funcional planejada: média funcional calculada a partir da longevidade categórica ponderada pelo número de pontos de plantio no núcleo, reflete a média funcional no momento do plantio.

Taxa de crescimento relativo (TCR): taxa de incremento da biomassa por unidade de biomassa existente, usada como proxy não destrutivo para biomassa vegetal inteira, proporcionando uma medida padronizada da produtividade de uma planta independente de seu tamanho inicial (Baltzer; Thomas, 2007).

Trade-offs: demandas conflitantes, processos em que quando um aspecto é afetado positivamente, outro é afetado negativamente. Condição onde dois ou mais fatores ou recursos não podem ser maximizados simultaneamente.

Tratamento funcional: combinação de espécies em bicultivos ou tetracultivos, sendo uma de cada grupo funcional.

3 INTRODUÇÃO GERAL

Os ecossistemas naturais vêm sendo transformados em agroecossistemas há milênios. Paisagens e populações foram e continuam sendo domesticadas em diferentes níveis e intensidades, nos mais variados ambientes (Clement; Borém; Lopes, 2009; Harlan, 1992; Mazoyer; Roudart, 2010). Nesse processo, algumas espécies de plantas, devido as suas características, receberam mais atenção que outras. Aproximadamente, 91% dos 1,5 bilhões de hectares de terras cultivadas no mundo estão ocupados por monocultivos anuais, com ênfase em cinco espécies: algodão, arroz, milho, trigo e soja (Altieri; Nicholls, 2010). Nas américas, processos de domesticação permitiram a manutenção de florestas abundantes em plantas perenes e simultaneamente contribuíam para o aumento da produção de alimentos e da segurança alimentar no território. Contudo, desde a chegada dos europeus, esses processos foram negligenciados e suprimidos para a implantação de extensas áreas de monocultivos (Clement et al., 2015; Levis et al., 2017, 2018).

Apesar das vantagens potenciais no uso de sistemas diversificados, a pesquisa agrônômica dominante concentrou-se amplamente em sistemas de monocultura, favorecendo espécies heliófitas, demonstrando pouco interesse em interações ecológicas entre espécies em sistemas mistos (Malézieux et al., 2009). Essa intensificação dos monocultivos nas últimas décadas gerou efeitos significativos em escala planetária. As perdas de biodiversidade e, conseqüentemente, de várias Contribuições da Natureza para Pessoas – CNP (Díaz et al., 2015a), tais como fertilidade do solo, ciclagem de nutrientes, qualidade da água, polinização e regulação climática, comprometeram a resiliência de muitos sistemas agrícolas e a segurança alimentar global (Isbell et al., 2017; Tilman et al., 2002, 2011).

Nos processos de perda de biodiversidade decorrentes da transformação e uso dos ecossistemas, as espécies vegetais que enfrentam maior declínio são aquelas mais adaptadas ao interior de florestas e associadas a ambientes florestais mais maduros (Filgueiras et al., 2021). Esse grupo é, de maneira geral, composto por espécies mais longevas, mais adaptadas à sombra e de crescimento lento (de Lima et al., 2020). À medida que habitats naturais são substituídos por paisagens mais homogêneas, excluindo plantas desse grupo, eles se tornam incapazes de suportar a diversidade de espécies, atributos e funções ecológicas que antes possuíam (de Lima et al., 2020; Hautier et al., 2015; Tilman et al., 2011). Portanto, pode-se considerar que espécies com essas características possuem alto valor ecológico, sendo prioritárias

para esforços de conservação. Além disso, essas espécies possuem alto valor econômico, tendo grande importância atual e/ou potencial, podendo ser utilizadas como fontes de renda alternativa em sistemas agrícolas (Coradin; Siminski; Reis, 2011).

Os agricultores são os principais administradores das terras utilizáveis globalmente e moldarão, talvez de forma irreversível, a superfície da Terra nas próximas décadas. Novos incentivos e políticas para garantir a sustentabilidade da agricultura e das contribuições da natureza para as pessoas são cruciais (Tilman et al., 2011). Essas propostas deverão considerar o mosaico de campos que estruturam a paisagem e sua evolução em uma escala de tempo mais longa que a do agricultor, incluindo os agroecossistemas como ferramentas para a conservação (Malézieux et al., 2009). Só assim será possível incorporar a conservação da biodiversidade e as Contribuições da Natureza para as Pessoas como parte essencial na cultura da sociedade moderna (Díaz et al., 2018).

Dentre os agroecossistemas que podem ser utilizados para conservação, destacam-se os Sistemas Agroflorestais (SAFs), que intencionalmente integram espécies arbóreas com cultivos agrícolas, pastagens ou animais (May; Trovatto; Deitenbach, 2008; Rosa-Schleich et al., 2019). Esses sistemas têm demonstrado potencial para reforçar sinergias de relevantes funções ecológicas, econômicas e sociais (Tschardt et al., 2011). SAFs são eficientes para integrar essas funções pois incluem os humanos de forma ativa e direcionada no processo (Miccolis et al., 2016).

Por sua multifuncionalidade, esses agroecossistemas apresentam potencial para manter a produtividade agrícola e, simultaneamente, reduzir os riscos ambientais gerados pelo modelo agrícola predominante. Dentre os diferentes tipos de SAFs, destacam-se os SAFs sucessionais biodiversos que aplicam teorias e conceitos ecológicos em seu manejo, se aproximando mais dos ecossistemas naturais e otimizando a relação entre produção e conservação (dos Santos et al., 2021; Finney; Kaye, 2017; Wood et al., 2015). Essas características permitem que estes SAFs tenham grande plasticidade de uso, podendo ser aplicados para processos de restauração ecológica quando planejados com grande diversidade (FAO, 2017; Miccolis et al., 2019).

O aumento da diversidade de plantas em sistemas de cultivo melhora os rendimentos em vários aspectos, inclusive em serviços reguladores e de suporte dos agroecossistemas (Isbell et al., 2017). Contudo, um aumento apenas no número de

espécies pode gerar um pequeno impacto nas funções e serviços do agroecossistema, quando comparado ao aumento da diversidade funcional (Finney; Kaye, 2017), que permite ganhos mais diretos nos efeitos de complementaridade e facilitação (Tobner et al., 2014; Zhu et al., 2022). Esses efeitos positivos da diversidade funcional são evidenciados em comunidades arbóreas, independentemente da riqueza de espécies (Tobner et al., 2016).

Essa abordagem funcional está mais intimamente relacionada com a dinâmica dos ecossistemas, permitindo a melhoria da capacidade de compreender e prever (Díaz et al., 2015a; Díaz; Cabido, 2001; Garnier; Navas, 2012; Reich, 2014), possibilitando novas conexões que extrapolam os limites explicativos dos agrupamentos taxonômicos (Cornwell et al., 2014).

A diversidade funcional, ou seja, diversidade de um ou mais atributos funcionais, pode ser mensurada através de um índice, permitindo que seja diretamente utilizada em estudos ecológicos (Rao, 1982; Violle et al., 2007). Para que o uso desta abordagem seja mais relevante para a compreensão dos processos ecológicos em questão é necessário utilizar atributos que estejam mais diretamente relacionados com esses processos, em outras palavras, um subconjunto de características que ajude a entender melhor, quantificar e modelar os principais efeitos nos processos ecológicos considerados em diferentes escalas (Cadotte, 2017; Pillar et al., 2013; Reich, 2014). Cientistas estão testando, aprimorando e disponibilizando uma enorme gama de atributos funcionais que podem ser usados de forma comparativa para classificar as espécies em grupos funcionais (Cornelissen et al., 2003; Kattge et al., 2011; Pérez-Harguindeguy et al., 2013; Wigley et al., 2020) e vários destes são largamente utilizados na práxis agroflorestal (May; Trovatto; Deitenbach, 2008; Miccolis et al., 2016; Neto et al., 2016).

Um dos atributos relevantes e amplamente utilizados no planejamento de SAFs é a longevidade da planta. Grupos funcionais ou categóricos são criados para facilitar a compreensão e o uso desse atributo, tanto por cientistas quanto por agricultores agroflorestais. Cultivar espécies com variações de ciclos anuais, bianuais ou perenes, por exemplo, em comunidades complexas pode permitir a complementaridade no uso de recursos de forma temporal e espacial (Díaz; Cabido, 2001). Outros atributos também são bastante úteis no planejamento de SAFs, como altura da planta, tolerância a sombra e taxa de crescimento (Neto et al., 2016). A escolha de espécies baseada em atributos desempenhará um papel central para o

desenvolvimento de agroecossistemas modernos e produtivos (Abalos et al., 2019), com menores “*trade-offs*” entre produção e conservação (Power, 2010).

Assim, esta pesquisa buscou contribuir com o entendimento ecológico da combinação de grupos funcionais construídos a partir de atributos funcionais simples, como longevidade e altura, necessários para acelerar o desenvolvimento e estabelecimento de um dossel arbóreo, processo chave para resiliência de ecossistemas. Além disso, compreender os efeitos da diversidade funcional no estabelecimento e desenvolvimento inicial de plantas de longa vida com alto valor econômico e ecológico. Por fim, adaptar esse conhecimento ao manejo sustentável em diversas áreas como: a fruticultura, a silvicultura, a restauração ecológica e os sistemas agroflorestais.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 BIODIVERSIDADE: USO E CONSERVAÇÃO

A transformação de ecossistemas naturais em agroecossistemas movimentou a ideia de um processo de transição das populações humanas de caçadores/coletores para agricultores, ainda que isso seja bastante complexo e controverso (Diamond; Bellwood, 2003). A antropização do planeta segue a passos largos de tal forma que não temos mais a opção de deixar de manejar ativamente o planeta (Mazoyer; Roudart, 2010).

O manejo das espécies e das paisagens, pode ser bastante variado historicamente e geograficamente. Segundo (Clement; Borém; Lopes, 2009), além de paisagens pristinas, podemos identificar classes contínuas de domesticação: promovidas, manejadas ou cultivadas, e ainda, populações de plantas que também se distribuem em diferentes gradientes de domesticação. Dentro destes conjuntos, paisagens e populações (Clement et al., 2010), cabe ressaltar que, em geral, espécies arbóreas têm recebido menor atenção no que se refere as consequências do processo de domesticação das populações, tendo em vista a dicotomia histórica entre espécies selvagens e domésticas (Wiersum, 1997).

Recentemente, emergiram fortes evidências da domesticação de extensas áreas florestais através de um conjunto de práticas culturais (Levis et al., 2018). Essas práticas incluem o enriquecimento da floresta com mais de 130 espécies domesticadas (McMichael et al., 2017), dentre elas frutíferas, lenhosas e arbustivas (Clement et al., 2010). Isso mostra que a vasta floresta, outrora considerada uma selva

virgem vulnerável às forças climáticas e hostil às culturas indígenas, mais se parece com um habitat humano muito influenciado por milhares de anos de ocupação (Roosevelt, 2013). Aparentemente, a floresta Atlântica também tem seus exemplos da influência humana na paisagem. Além das condições climáticas favoráveis no final do Holoceno, a dispersão antrópica pode ter sido causa significativa da rápida expansão das florestas com araucária no sul do Brasil (Sedrez dos Reis; Ladio; Peroni, 2014) (Bitencourt; Krauspenhar, 2006).

As sociedades humanas, construídas sobre a biodiversidade (Díaz et al., 2006), estão criando sistemas agrícolas intensivos com impactos claramente negativos na qualidade do solo e da água e na conservação da biodiversidade (Malézieux et al., 2009). Um processo que está promovendo uma redução e perda acelerada, de uma enorme diversidade que sequer conhecemos (Cardinale et al., 2012; Tilman et al., 2011). O ritmo do desmatamento em todo o mundo exige o desenvolvimento de estratégias que restaurem a cobertura florestal de forma rápida e eficiente (Corbin; Holl, 2012). Também está incluso nesta perspectiva, a perda dos recursos genéticos que derivam do esforço milenar de populações humanas na seleção e domesticação de muitas espécies úteis (Jackson et al., 2005; Levis et al., 2018). O impacto da perda de biodiversidade sobre o funcionamento dos ecossistemas e sua capacidade de fornecer contribuições para as pessoas tornou-se uma questão central na ecologia nas últimas décadas (Loreau; Hector, 2001).

Existem mais de 380 mil espécies de plantas aceitas no (WFO, 2023) e milhares que ainda não conhecemos e/ou descrevemos taxonomicamente. Contudo, estudos focados em espécies e processos individuais de forma isolada, subestimarão os níveis de biodiversidade necessários para manter ecossistemas multifuncionais (Hector; Bagchi, 2007). Evitar uma dramática degradação da biodiversidade e a subsequente perda de funções ecossistêmicas ainda é possível por meio de esforços intensificados de conservação (Ceballos et al., 2015). Segundo Gibson et al., (2011), quando se trata de manter a biodiversidade tropical, pode não haver substituto para as florestas primárias.

Qual a melhor abordagem para reconciliar a conservação da biodiversidade e a agricultura é uma questão não respondida satisfatoriamente, onde ecologistas conservacionistas e cientistas agrícolas precisam buscar soluções viáveis tanto para a produção agrícola quanto para a conservação (Baudron et al., 2021). Considerando a dicotomia entre poupar ou compartilhar as terras agrícolas é útil compreender as

estratégias para promover contribuições da natureza para as pessoas e garantir uma diversidade funcional que permita a estabilidade e resiliência de ecossistemas (Balmford; Green; Phalan, 2015; Cannon et al., 2019). Poupar ou compartilhar terras agrícolas não são abordagens mutuamente exclusivas, pois ambas são necessárias para equilibrar o gerenciamento da multifuncionalidade das paisagens agrícolas. O compartilhamento de terras promove contribuições da natureza para as pessoas em ambientes agrícolas e as terras poupadas, convertidas em áreas protegidas, atuam na conservação das espécies incompatíveis com a agricultura (Grass et al., 2019; Valente et al., 2022).

Para tanto, é necessário aumentar a conectividade das paisagens (Grass et al., 2019). Diversificar e intensificar os sistemas de produção, aumentar a resiliência e entender melhor os *trade-off* são ações para futuros sistemas agrícolas, que precisarão entregar mais com menor impacto ambiental (Foley et al., 2011; Isbell et al., 2017; Power, 2010).

4.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS

Sistemas Agroflorestais (SAFs), integram intencionalmente espécies arbóreas com cultivos agrícolas, pastagens ou animais na mesma unidade de manejo (Malézieux et al., 2009; May; Trovatto; Deitenbach, 2008; Rosa-Schleich et al., 2019). Em diversas regiões florestais espalhadas pelo mundo, vários povos desenvolveram sistemas complexos (Diamond, 2009) que se acomodam neste escopo conceitual. Alguns sistemas incluíam de forma mais intensa uma grande diversidade de espécies arbóreas e arbustivas consorciadas com espécies de ciclo curto (Clement et al., 2015; Levis et al., 2018; Maezumi et al., 2018). Estas agroflorestas de um passado milenar ainda persistem, compondo grandes comunidades arbóreas na floresta tropical brasileira, domesticada pelos povos amazônicos (Levis et al., 2017).

As florestas foram e continuam sendo devastadas, dando espaço aos cultivos anuais que ocupam a maior parte das terras no mundo (Altieri; Nicholls, 2010). Vários processos socio-ambientais foram negligenciados nessa transformação. Muita diversidade está sendo extinta sem ao menos ser conhecida (Cardinale et al., 2012), e assim perdemos floresta e agrofloresta. Contudo, a cobertura arbórea aparentemente está aumentando como uma característica comum em terras agrícolas em todo o mundo (Zomer et al., 2014) e conservar ou criar uma camada diversificada

de árvores de sombra multiuso que podem ser podadas é muito relevante para um manejo agroflorestal sustentável (Tscharntke et al., 2011).

Existe uma enorme diversidade de sistemas de policultivos e SAFs na agricultura mundial (Malézieux et al., 2009). Estes sistemas oportunizam a conservação *in situ on farm* (Nodari; Guerra, 2015), e além de conservar, podem aumentar a variabilidade genética (Donazzolo et al., 2020). Revisões apontam para estes sistemas como oportunidades potenciais para a intensificação de práticas agrícolas sustentáveis (Himmelstein et al., 2017; Li et al., 2020). O aumento da diversidade de plantas aumenta a produção de grãos, forragem, madeira, os polinizadores e atua na supressão de doenças, pragas e plantas daninhas (Isbell et al., 2017; Pumariño et al., 2015). SAFs tem demonstrado amplo potencial para reforçar sinergias de relevantes funções ecológicas, econômicas e sociais (Tscharntke et al., 2011), reduzindo a erosão e restauração da produtividade do solo, melhorando os meios de subsistência e contribuindo na geração de renda (FAO, 2017).

Os SAFs podem ser muito diversos, variando em função de muitos fatores. A quantidade e composição de espécies cultivadas e manejadas, do adensamento horizontal, da ocupação vertical dos estratos, da finalidade pela qual é elaborado e outros mais. Baseado na estrutura e função temos SAFs silvipastoris, agrossilvipastoris, agrossilviculturais (Nair, 1993) e outros que integram noções de sistema, de agroecologia, de floresta e de agricultura, como os SAFs agroecológicos (Siddique; Dionísio; Simões-Ramos, 2017).

Este trabalho se aproxima do conceito de SAFs sucessionais (SAFS) biodiversos e adensados (Miccolis et al., 2016). Estes sistemas se assemelham aos ecossistemas florestais naturais, caracterizados por alta diversidade de espécies e aplicam teorias e conceitos ecológicos em seu manejo (Vieira; Holl; Peneireiro, 2009) incluindo, de forma estratégica, o uso de grupos sucessionais conhecidos pelos agrofloresteiros (Miccolis et al., 2016). Neste tipo de SAFs, espécies pouco longevas e de rápido crescimento são combinadas com espécies longevas de lento crescimento, mas que em geral, necessitam ou toleram níveis de sombreamento. Isso permite o consórcio de cultivos anuais e perenes em um gradiente de complexidade de 2 a n espécies (Malézieux et al., 2009). Assim, pode-se acelerar o processo da sucessão ecológica a partir da implantação das comunidades de plantas com diversidade de ciclo de vida, permitindo maior multifuncionalidade e consonância entre

serviços de provisão e regulação (dos Santos et al., 2021; Finney; Kaye, 2017; Wood et al., 2015).

Esse conjunto de características de sistemas complexos, permite que SAFs com maior diversidade sejam adequados para processos de restauração ecológica (Miccolis et al., 2019; Vieira; Holl; Peneireiro, 2009) inclusive para recomposição de áreas de Reserva Legal intercalando espécies nativas com exóticas (BRASIL, 2012).

A plasticidade dos sistemas agroflorestais em estrutura e função, permite sua aplicação em um amplo gradiente de finalidades. Por exemplo, SAFs com ênfase em restauração podem ser produtivos (serviços de provisão) em menor proporção ou por um determinado período e, noutro extremo do gradiente, SAFs com ênfase em produção podem ser menos relevantes para restauração, e ainda assim promoverem contribuições da natureza para as pessoas satisfatoriamente. Dependendo da finalidade do SAF, os atributos a serem considerados para o planejamento podem variar bastante. Estes são alguns dos desafios da pesquisa agrícola, entender e integrar o complexo funcionamento e desenvolver uma caixa de ferramentas adequada para verificar e garantir seu desenvolvimento tecnológico (Malézieux et al., 2009).

4.3 RESTAURAÇÃO ATRAVÉS DE AGROFLORESTAS

A restauração ecológica é o processo de auxílio ao restabelecimento de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído (SER, 2004). Não é um conceito simples, porque integra elementos de transformação no tempo e espaço. Isto pode ser bastante variado, de acordo com o observador e o conjunto observado. De forma simples, é possível entender a restauração como uma atividade que inicia ou acelera a recuperação de um ecossistema com respeito à sua saúde, integridade e sustentabilidade (SER, 2004).

Os SAFs podem ser utilizados para a restauração, promovendo funções ecológicas como a conservação, restauração da fertilidade e estrutura do solo, sombra e criação de microclimas, corredores ecológicos, melhoria da qualidade da água, mitigação e adaptação a mudanças climáticas (Miccolis et al., 2016). Neste sentido, a adequação do tipo de SAF não deve anular a constante progressão rumo a sistemas cada vez mais similares aos ecossistemas naturais (Martins; Ranieri, 2014).

Tanto em estudos na Mata Atlântica, (Martins et al., 2019) quanto na Amazônia Legal (de Paula et al., 2019), SAFs podem ser indicados para proprietários

rurais familiares no intuito de aliar a restauração florestal, aos seus interesses agrícolas. Martins e Ranieri (2014), reforçam que esses sistemas devem ser promovidos a fim de restaurar ecossistemas, e assim tornar o processo de restauração mais rápido e eficaz. Sais e Oliveira (2018) acreditam que as recentes alterações na legislação, aliada a outros fatores de restauração e conservação florestal, conduzirão ao aumento significativo dos SAFs em algumas regiões do país.

Dois princípios gerais para conciliar objetivos sociais e ambientais nos SAFs são propostos por (Miccolis et al., 2016): conservação dos recursos hídricos, do solo e da biodiversidade e a manutenção dos modos de vida dos agricultores. Nesta perspectiva, os SAFs talvez possam conciliar os processos de produção e restauração.

4.4 ECOLOGIA FUNCIONAL

A grande questão que desafia a Ecologia diz respeito a quais tipos de diversidade são mais significativos para o funcionamento dos ecossistemas (Walker et al., 2016). O uso da riqueza de espécies como métrica se mostrou insuficiente para explicar a relação entre a biodiversidade e as contribuições da natureza para as pessoas, nesse contexto, outras abordagens ecológicas foram propostas para elucidar essa relação (Finney; Kaye, 2017; Mori; Furukawa; Sasaki, 2013; Rosenfield e Müller, 2020).

Apesar de seus conceitos básicos terem raízes em estudos antigos, uma perspectiva emergente, é a ecologia funcional, que incorpora os efeitos e respostas da diversidade funcional (Díaz et al., 2007). Um olhar bastante peculiar baseado em um conjunto de conceitos que considera características que vão desde o nível de organismos até o de ecossistemas: os atributos funcionais (Violle et al., 2007).

Esta área do saber, propõe que a diversidade de forma e função mensurada pelos atributos pode elaborar melhores e mais simples preditores sobre o funcionamento do ecossistema que a riqueza de espécies (Isbell et al., 2017; Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Dois importantes preditores são a diversidade funcional e a média funcional (Ricotta; Moretti, 2011).

A diversidade funcional é a diversidade dos atributos funcionais dos organismos presentes em um determinado ecossistema. Ela pode ser medida com um ou mais atributos funcionais pela Entropia Quadrática de Rao (Rao, 1982), que é um índice que mede de maneira efetiva as diferenças nos valores dos atributos

ponderados pela sua abundância no ecossistema (Botta-Dukát, 2005). A diversidade funcional é uma das dimensões da biodiversidade mais diretamente relacionadas ao funcionamento dos ecossistemas (Díaz; Cabido, 2001).

A média funcional (*Community Weighted Mean – CWM*) determina o valor médio de um atributo ponderado pela sua abundância na comunidade, considerando todas as espécies presentes (Ricotta; Moretti, 2011). Esse índice é baseado na hipótese da razão de massas, que define que a abundância de um atributo determina a sua importância nos processos ecossistêmicos (efeito de seleção) (Grime, 1998; Tobner et al., 2016).

O uso desses índices a partir de diversos atributos em pesquisas tem apontado resultados que orientam a seleção de espécies que diferem funcionalmente umas das outras em vários eixos de características como estratégica para a restauração e outros processos que incluem o uso da biodiversidade (Cadotte, 2017; Tobner et al., 2016). Os agroecossistemas podem se beneficiar diretamente desta abordagem e alguns estudos apontam que projetar policulturas que maximizem a diversidade funcional pode levar a agroecossistemas com maior multifuncionalidade (dos Santos et al., 2021; Finney; Kaye, 2017; Gaba et al., 2014).

4.5 ATRIBUTOS FUNCIONAIS

Atributo funcional é qualquer característica morfológica, fisiológica ou fenológica, mensurável em nível de indivíduo, que tenha efeito na sua adaptabilidade ao ambiente (Violle et al., 2007), podendo afetar processos ecossistêmicos (Díaz; Cabido, 2001; Lavorel; Garnier, 2002). Forma de crescimento, área foliar, área foliar específica, altura da planta, longevidade da planta, densidade específica do caule, massa da semente, capacidade de rebrote, são alguns exemplos de atributos funcionais (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Eles oferecem pistas sobre como e porque uma planta pode se comportar como faz, onde cresce e onde isso não acontece, como ele interage com outras plantas e como influencia o ambiente abiótico e biótico em torno dele (Reich, 2014). Os valores dos atributos são obtidos no nível do indivíduo, contudo, expressos em nível populacional, através de médias dos valores individuais (Cornelissen et al., 2003; Violle et al., 2007).

Foram sintetizados, no ano de 2003, um conjunto de 28 atributos para grupos de espécies que compartilham um funcionamento semelhante ao nível de organismo. Esses atributos foram sugeridos por apresentarem relevância para lidar com questões

ecológicas em grande escala (Cornelissen et al., 2003). Esse conjunto de atributos continua sendo ampliado, equilibrando melhor as características de plantas inteira, foliares, de raízes e caule, regenerativas e características preditivas para compreensão do efeito das espécies sobre propriedades-chaves do ecossistema (Pérez-Harguindeguy et al., 2013), listando filtros ambientais e separando os atributos para os diferentes estágios de vida das plântulas, jovens e adultos (Wigley et al., 2020). Na última década, vários trabalhos foram apresentados com base nessa área do conhecimento ecológico (Díaz et al., 2015b; Falster; Duursma; Fitzjohn, 2018; Souza et al., 2017; Visser et al., 2016) e ampliados para as ciências agrárias (Abalos et al., 2019; Cadotte, 2017; dos Santos et al., 2021; Gaba et al., 2014; Isbell et al., 2017). Na medida em que tenhamos melhores evidências de atributos funcionais de espécies cultivadas, podemos combinar características e analisar melhor o impacto da diversidade funcional sobre o agroecossistema (Garnier; Navas, 2012).

4.6 ATRIBUTOS USUAIS E POTENCIAIS EM AGROECOSSISTEMAS

O uso de características simples das plantas para compor os sistemas agroflorestais é prática comum. Para cultivar SAFs com maior eficiência é necessário utilizar espécies que compartilham espaço ao longo do tempo e que possam produzir tanto quanto ou mais estando juntas que em monocultivos. Portanto, a prática agroflorestal faz uso de características como: altura, ciclo de vida (longevidade), capacidade de rebrote, velocidade de crescimento e tolerância a sombra que têm seus efeitos ecológicos bem compreendidos por agricultores e agrofloresteiros (May; Trovatto; Deitenbach, 2008; Miccolis et al., 2016; Neto et al., 2016).

Os trabalhos científicos ampliam o leque de atributos que podem ser úteis em agroecossistemas à medida que são evidenciadas suas respostas nos processos ecológicos. Atributos como a longevidade foliar e características radiculares, por exemplo, podem ser importantes para determinar interações negativas e/ou positivas em consórcios de árvores jovens (Tobner et al., 2016). Outras características como índice de área foliar, teor de matéria seca foliar, massa de sementes, área foliar específica e taxa de crescimento relativo são importantes para determinar processos ecológicos em consórcios de plantas de cobertura (Damour et al., 2015). Relação C/N, conteúdo de N foliar, profundidade de raízes, teor de matéria seca foliar são atributos determinantes para a ciclagem e para o desenho de agroecossistemas mais eficientes no uso de nitrogênio (Abalos et al., 2019).

Além disso, a diversidade funcional baseada em alguns desses atributos se mostrou determinante para melhorar a multifuncionalidade de agroecossistemas (dos Santos et al., 2021; Finney; Kaye, 2017), enquanto a riqueza de espécies nem sempre apresenta efeitos, reforçando a importância do uso de atributos funcionais no desenho e pesquisa de agroecossistemas (Finney; Kaye, 2017).

Para fins dessa pesquisa, os atributos funcionais mais importantes são longevidade máxima da planta, altura máxima e taxa de crescimento relativo. Outros atributos de fácil obtenção como massa do propágulo, área basal do caule e índice de área foliar são utilizados para ajudar a explicar alguns processos ecológicos.

4.6.1 Longevidade

Conhecer qual a longevidade de determinada espécie é uma informação relevante para o planejamento de SAFs. Espécies com ciclos de vida similares formam grupos sucessionais úteis para o planejamento dos sistemas (Miccolis et al., 2016). Esses grupos, organizados a partir da longevidade da planta podem ser entendidos como grupos funcionais. Cultivar espécies com variações de ciclos anuais, bianuais ou perenes em comunidades complexas pode permitir complementaridade no uso de recursos de forma temporal e espacial (Díaz; Cabido, 2001).

A longevidade das plantas (geralmente medida em anos) se define como o período desde seu estabelecimento até que não haja partes vivas deste indivíduo. A longevidade máxima está forte e positivamente associada com os regimes de estresse ambiental, por exemplo baixas temperaturas e baixa disponibilidade de nutrientes, que retardam o crescimento. Se considera que pode haver uma relação entre a longevidade máxima e a dispersão no tempo e no espaço. A princípio, as espécies mais longevas possuem bancos de sementes de curta duração e produzem sementes ou frutos com baixo potencial de dispersão. Em contraste, as espécies efêmeras a princípio possuem bancos de sementes muito persistentes e/ou alto potencial de dispersão (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

Botosso; Póvoa de Mattos (2002), argumentando a importância de avançar no conhecimento deste atributo para o manejo e a conservação das florestas, apontaram que poucas eram as informações confiáveis sobre a idade de árvores em condições naturais no Brasil. Trabalhos mais recentes de dendrocronologia com espécies de árvores nativas da Mata Atlântica estão restritos a um pequeno número de espécies, dentre elas a *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis* e *Ocotea porosa*

(Filho et al., 2017). Portanto, obter informações confiáveis sobre esse atributo para espécies mais longevas exige um esforço maior que para espécies de ciclo curto, as quais em geral, são bem estudadas e divulgadas em circulares técnicos de instituições de pesquisa e extensão.

4.6.2 Altura

A altura da planta está relacionada ao espaço que aquela espécie pode ocupar no sistema, em relação as outras plantas e a necessidade que a espécie tem de receber luz quando adulta (Díaz et al., 2016). Essa característica influencia diretamente as possibilidades nos manejos de poda, a disponibilidade de folhas para alimentação animal, a disponibilidade de luz para o sistema (sombreamento) e a outros fatores (Miccolis et al., 2016; Neto et al., 2016).

A altura da planta é a distância mais curta entre o limite mais alto dos tecidos fotossintéticos principais dessa planta (excluindo as inflorescências) e o nível do solo, expressada em metros. A altura máxima é a máxima estatura de um indivíduo maduro típico que uma espécie possui em um hábitat determinado. Está associada com a forma de crescimento, a posição da espécie no gradiente vertical de luz da vegetação, o vigor competitivo, o tamanho reprodutivo, a fecundidade da planta, a longevidade média e se a espécie é capaz de estabelecer e alcançar um tamanho reprodutivo entre os eventos de distúrbio (fogo, pastoreio, ventos, aração, etc) (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

4.6.3 Taxa de crescimento relativo

A taxa de crescimento relativo (TCR) é um indicador importante da estratégia da planta em relação a produtividade e os regimes de distúrbio do ambiente. A TCR é o incremento em tamanho ou biomassa de uma planta em um determinado período. Pode ser comparada entre espécies e indivíduos que diferem amplamente em tamanho (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). A TCR pode ser medida por métodos não destrutivos, utilizando o incremento em altura e diâmetro (Baltzer; Thomas, 2007).

Esse atributo influencia diretamente a ocupação de espaço e a produção de biomassa no tempo, processos determinantes para o manejo agroflorestal. A taxa de crescimento vegetal é um atributo fortemente associado e influenciado por diversos outros atributos funcionais e, por isso, é proposto para ser usado como atributo “guia”, onde “*ser rápido ou lento*” é entendido como uma característica geral (Reich, 2014).

Por isso, a TCR se apresenta como um bom atributo resposta para pesquisas que procuram entender processos ecológicos.

4.7 COMPETIÇÃO, COMPLEMENTARIDADE E FACILITAÇÃO

Definir competição de maneira precisa é difícil em função dos diversos contextos nos quais o termo é utilizado (Grace; Tilman, 1990). Em processos ecológicos envolvendo plantas, Vandermeer (1989), define competição como um processo em que duas plantas ou populações interagem de maneira que pelo menos uma exerça um efeito negativo sobre a outra.

Desde Darwin a competição vem sendo considerada como um dos principais mecanismos que definem a história de vida, estrutura e dinâmica de comunidades de plantas (Grace; Tilman, 1990). E essa ideia tem sido central nas pesquisas tanto na Ecologia quanto na Agronomia (Malézieux et al., 2009). No entanto, a competição não é o único mecanismo pelos quais os processos ecológicos ocorrem, plantas em uma comunidade podem ser complementares e até mesmo facilitar o desenvolvimento de outras. Esses processos não são excludentes e provavelmente ocorrem de maneira simultânea em diferentes intensidades (Mokany; Ash; Roxburgh, 2008).

A hipótese da complementaridade, diz que a maior diversidade de atributos funcionais, resultante de muitas espécies, provêm o acesso mais fácil a recursos limitados (Malézieux et al., 2009) e é importante para um melhor desempenho da comunidade (Loreau; Hector, 2001). Isso ocorre porque a variação e a amplitude de atributos estão relacionadas à ocupação de nichos ecológicos. Comunidades mais diversas utilizam recursos de maneira complementar, reduzindo os efeitos de competição, ou seja, maiores valores de diversidade funcional indicam comunidades que utilizam os recursos disponíveis de maneira mais eficiente (Díaz; Cabido, 2001; Lavorel, S.; Garnier, 2002).

Para as comunidades de plantas, a complementaridade é um dos motores mais comumente invocados por trás do funcionamento do ecossistema com o aumento da biodiversidade (Barry et al., 2019), e seu efeito é considerado globalmente positivo, apoiando a hipótese de que a diversidade de plantas influencia a produção primária (Loreau; Hector, 2001). Para Fornara e Tilman (2008), a complementaridade é uma razão chave pela qual uma maior diversidade de plantas leva a um acúmulo até 6 vezes maior de C e N no solo em consórcios com alta diversidade do que em monocultivos das mesmas espécies.

Assim, a complementaridade acaba sendo uma explicação comum para relações positivas entre a biodiversidade e o funcionamento do ecossistema (Barry et al., 2019). Porém outros processos podem explicar melhores desempenhos de comunidades biodiversas, por exemplo quando uma planta ou população é capaz de melhorar ou facilitar o crescimento, sobrevivência ou reprodução de outra, caracterizando um processo de facilitação (Callaway, 2007; Malézieux et al., 2009). Complementaridade e facilitação frequentemente se misturam e segundo Wright et al. (2017), isso faz com que o papel da facilitação seja negligenciado ou agrupado em outros processos definidos de forma menos explícita.

Existem diferentes exemplos de interações facilitadoras nos ecossistemas (Holmgren; Scheffer; Huston, 1997; Zhu et al., 2022) com efeitos do processo de facilitação: modificação do microclima e do solo, suporte físico, transferência de nutrientes, efeitos competitivos indiretos, guildas de defesa de plantas, dispersores e polinizadores, microrganismos da rizosfera (Hunter; Aarssen, 1988). As condições ambientais parecem alterar a intensidade do processo de facilitação (Zhu et al., 2022). Quanto maior a temperatura e irradiância em áreas abertas, mais importante pode ser a proteção dos arbustos para um bom equilíbrio hídrico e térmico das mudas e, portanto, mais forte será o efeito facilitador na sua sobrevivência e crescimento inicial. (Gómez-Aparicio et al., 2004) reforçam que, na região Mediterrânea, arbustos pioneiros facilitam o estabelecimento de mudas de espécies lenhosas e sucessionais tardias, mais nos anos secos do que em anos chuvosos.

A facilitação entre plantas pode ser empregada como uma estratégia eficaz para o restabelecimento da vegetação nativa, reativando o processo de sucessão dinâmica (Gómez-Ruiz; Lindig-Cisneros; Vargas-Ríos, 2013). A compreensão melhorada dos processos de facilitação, tem relevância direta para o desenvolvimento de ferramentas para a restauração do ecossistema e para melhorar a nossa compreensão da resposta das espécies de plantas e comunidades aos motores das mudanças ambientais (Brooker et al., 2008).

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GERAL

Explorar critérios simplificados e generalizáveis para escolher combinações de espécies complementares com suficiente diversidade funcional para implantação de sistemas agroflorestais com árvores de alto valor econômico e/ou ecológico.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Definir espécies de plantas de uso atual ou potencial para compor SAFs na região do Alto Vale do Itajaí-SC;

Caracterizar grupos funcionais de espécies de plantas a partir de atributos simples e usuais em SAFs.

Medir o desenvolvimento inicial de espécies de plantas de diferentes grupos funcionais e da comunidade em núcleos de plantio.

Avaliar o efeito dos grupos funcionais no desenvolvimento inicial de comunidades de plantas e de espécies de longa vida em SAFs.

Avaliar o efeito da diversidade e média funcional no desenvolvimento inicial de comunidades de plantas e de espécies de longa vida em SAFs.

6 HIPÓTESES

H1: O crescimento das espécies longa vida depende dos tratamentos funcionais, e estes são mais determinantes do que as espécies individualmente no desenvolvimento da comunidade nos núcleos de plantio.

H2: A diversidade funcional de longevidade categórica tem efeitos na taxa de crescimento relativo similares à diversidade funcional calculada de altura máxima da planta.

H3: Consórcios com maior diversidade funcional e menor longevidade e altura aceleram o crescimento de espécies de longa vida.

7 MATERIAL E MÉTODOS

7.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA

Um experimento de campo foi conduzido na propriedade rural Alto da Serra, localizada no município de Rio do Sul - SC, com coordenadas SC (27° 10' 59,42"S; 49°39'35,58"O), com altitude variando entre 660 e 680 metros. Segundo a classificação climática de Köppen, a área experimental situa-se numa região de clima sub-tropical constantemente úmido, sem estação seca, com verão quente - Cfa. Temperatura média anual de 19,3°C, com precipitação média anual de 1529 mm. O solo na área experimental é classificado como Cambissolo (Embrapa, 2006). A formação florestal é considerada ombrófila densa montana em zona de ecótono com a formação florestal ombrófila mista (IBGE, 2012).

Nas últimas três décadas a área permaneceu ocupada com rebrotes de eucalipto e um sub-bosque caracterizado pela presença de samambaia (*Pteridium sp.*). Há três anos foi realizado o corte dos eucaliptos e a destoca dos cepos. Em seguida, foram introduzidas na área três espécies de Poaceae (*Hemarthria sp.*, *Axonopus jesuiticus*, *Axonopus compressus*) e três espécies de Fabaceae (*Arachis pintoii*, *Trifolium repens*, *Trifolium pratense*), as quais se desenvolveram juntamente com várias plantas espontâneas (*Cyrtocymura scorpioides*, *Coniza bonariensis*, *Senna occidentalis*, *Croton glandulosus*, *Pteridium arachnoideum*).

O experimento consiste em um sistema agroflorestal implantado no final do ano de 2019, numa área de 3150 m² (Figura 3). A área experimental foi caracterizada considerando os seguintes elementos: condições edáficas, topográficas, histórico e fisionomia da vegetação.



Figura 3. Imagem aérea do experimento com 18 meses após implantação a campo, ilustrando o gradiente topográfico dos três blocos 1, 2, 3 descendo a encosta (cada um com 1050m²).

7.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O sistema agroflorestal experimental foi implantado em Blocos Completos Casualizados com um total de 100 espécies vegetais (Apêndice A) utilizadas em consórcios de modo a gerar gradientes de médias e diversidades funcionais. Para o planejamento dos consórcios, o principal gradiente considerado foi baseado em 4 grupos funcionais, de acordo com a longevidade esperada em manejo agroflorestal, seguindo práticas usuais e teorias ecológicas que classificam espécies em grupos sucessionais. Os 4 grupos funcionais são: espécies **anuais (A)** (<1 ano); espécies **semi-perenes (S)** (entre 1 e 3 anos); espécies **pioneiras (P)** (>3 anos); e, espécies de **longa vida (L)** (>20 anos) (Apêndice A). Para relacionar esses grupos com atributos funcionais, buscou-se na literatura dados de longevidade máxima das espécies utilizadas. Devido à escassez de dados para esse atributo, utilizou-se também o atributo altura máxima (Figura 8, Apêndice B), por ser de fácil medição, foram encontrados na literatura dados desse atributo para todas as espécies do experimento.

As 100 espécies de plantas foram categorizadas, sendo que cada grupo funcional foi composto por 25 espécies. Combinando uma espécie representante de cada grupo funcional foram organizadas 25 composições (tetracultivos) (Apêndice A). A partir de cada composição de tetracultivo foram compostos 6 bicultivos combinando todos os grupos funcionais entre si, totalizando 7 consórcios, chamados de tratamentos funcionais. Portanto, os tratamentos funcionais são anual/semi-perene (AS), anual/pioneira (AP), anual/longa vida (AL), semi-perene/pioneira (SP), semi-perene/longa vida (SL), pioneira/longa vida (PL) e tetracultivo (ASPL) (Figura 4). Para compor cada combinação foi considerada, além do grupo funcional, a forma de plantio no experimento: duas espécies plantadas por mudas (em geral, pioneiras e longa vida), uma por semente (em geral, anuais) e uma vegetativamente (em geral, semi-perene).

Cada tratamento funcional possui 25 variações de espécies, derivadas da composição (tetracultivo). Por exemplo, em um tetracultivo (ASPL) composto por trigo-mourisco (A), guandu (S), sabugueiro (P) e gabirola-crespa (L), o tratamento funcional anual/longa vida (AL) é composto por trigo-mourisco (A) e gabirola-crespa (L), o tratamento funcional semi-perene/pioneira (SP) é composto por guandu (S) e sabugueiro (P) e assim sucessivamente. A partir das outras composições

(tetracultivos) foram compostos os demais 24 representantes de cada tratamento funcional.

Os 7 tratamentos funcionais de cada uma das 25 combinações (tetracultivos) compuseram 175 núcleos de plantio com composição de espécies única (unidades experimentais), repetidos em 3 blocos. Os núcleos de plantio com 50 cm de diâmetro foram organizados com as plantas dispostas em uma circunferência concêntrica afastada a 10 cm da borda do núcleo. Nesta circunferência, as plantas de cada grupo funcional foram distribuídas em pontos de plantio de acordo com os pontos cardeais e colaterais da seguinte forma: anuais (A) nos 4 pontos colaterais, semi-perenes (S) em dois pontos - Leste e Oeste, pioneiras (P) no Norte e longa vida (L) no Sul (Figura 4).

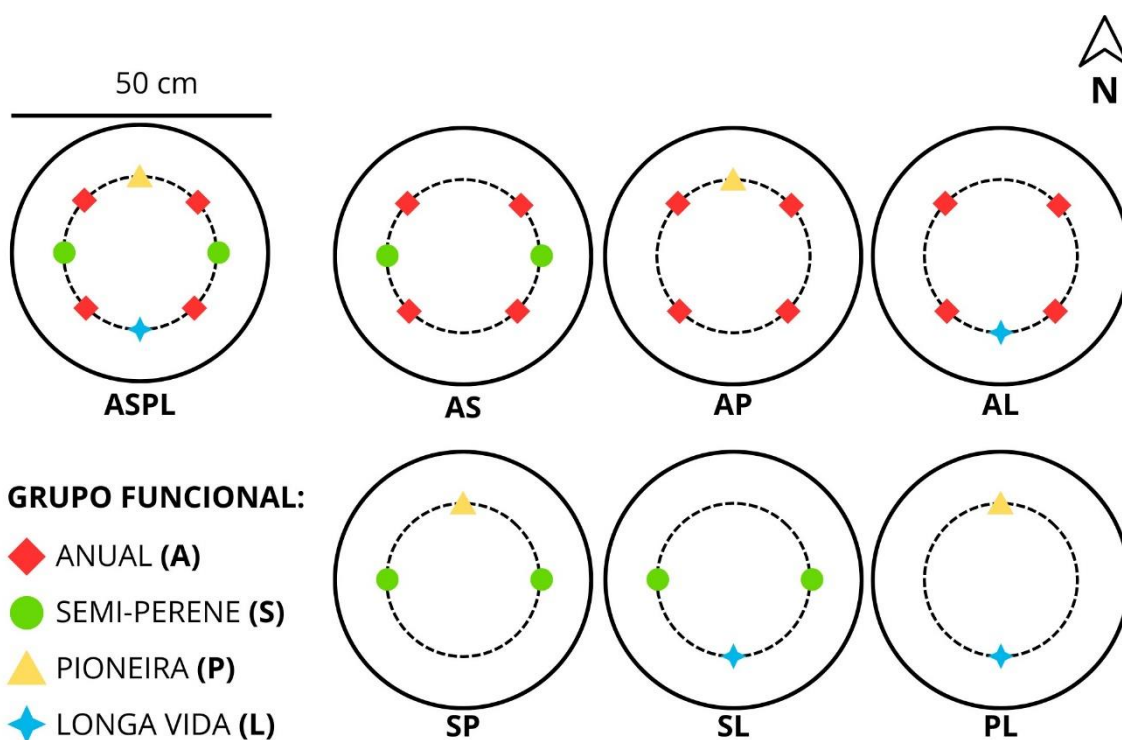


Figura 4. Representação dos 7 tratamentos funcionais (tetracultivo e bicultivos) e a distribuição dos pontos de plantio dos grupos funcionais nos núcleos de acordo com os pontos cardeais.

7.3 IMPLANTAÇÃO E MANEJO EXPERIMENTAL

As dimensões do núcleo de plantio e o preparo da área experimental foram similares ao utilizado no plantio de espécies arbóreas e arbustivas na fruticultura em

geral. Iniciou-se com roçada geral da área (roçadeira lateral), demarcação das unidades experimentais com espaçamento entre núcleos de 3 x 2 m, ocupando uma área de 6 m²/núcleo. Realizou-se capina da vegetação espontânea em um raio de 30 cm a partir do centro de cada unidade demarcada. A abertura dos núcleos de 50 cm de diâmetro e 30 cm de profundidade foi realizada com trado acoplado a um trator e cavadeira manual articulada, seguida de raspagem do espelhamento nas paredes internas.

O preparo do solo dos núcleos foi realizado com a adição de 15 litros de composto orgânico, 200 gramas de cinza de caldeira industrial e 200 gramas calcário ao solo removido, em seguida a mistura foi devolvida ao núcleo, preenchendo-o. Após 10 dias, para estabilização do solo, foram implantados os tratamentos com a introdução das espécies a campo. Como cobertura do solo nos núcleos foram utilizados 10 L de casca de arroz carbonizada por núcleo (Figura 5).



Figura 5. Ilustração do processo de preparo dos núcleos, posicionamento dos grupos funcionais e plantio

No primeiro ano do experimento, foram realizadas 3 capinas manuais nos núcleos e 3 roçadas da vegetação espontânea nas entrelinhas. Considerando o final

do ciclo de vida das espécies anuais, no sexto mês de desenvolvimento do experimento esse grupo funcional (25 sp.) foi removido dos núcleos.

7.4 COLETA E OBTENÇÃO DE DADOS

Foram coletados dados dos atributos funcionais massa do propágulo, altura da planta e diâmetro à altura do solo. Em relação aos atributos longevidade máxima e altura máxima da planta, os valores foram obtidos de diversas fontes técnico/científicas (Apêndice B). Estas fontes, incluem artigos científicos, livros, boletins, circulares e manuais técnicos, além de bancos de dados online nacionais e internacionais como o Plant Trait Database – TRY, que disponibiliza dados públicos sobre a biodiversidade global.

A massa do propágulo de cada espécie utilizada foi obtida através de amostragem aleatória de 5 unidades de propagação (sementes, estacas ou mudas). Para obtenção da massa seca, as amostras foram secas em estufa a 70 °C por 72h ou até atingir peso constante (Pérez-Harguindeguy et al., 2013).

A área basal foi calculada a partir do diâmetro à altura do solo medido com paquímetro digital. A altura das plantas foi medida considerando a menor distância entre o nível do solo e a mais alta estrutura fotossinteticamente ativa, excluindo inflorescências (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). Esses atributos foram medidos em todos os indivíduos do experimento (Figura 6), com coletas aos 30, 90, 180 e 450 dias após o plantio.



Figura 6. Coleta de dados de altura com uso de régua e de diâmetro à altura do solo com uso de paquímetro digital.

Os dados referentes ao atributo longevidade máxima foram de difícil obtenção na literatura e, portanto, são parciais para todos os grupos funcionais. Os grupos funcionais com menor longevidade categórica, como anual e semi-perene foram os que continham um maior número de dados referentes a longevidade máxima das espécies. Em geral, espécies cultivadas possuem maior quantidade de referências em relação a este atributo funcional. Entretanto, quanto maior a longevidade das espécies, mais escassas são as informações. O grupo longa vida, por exemplo, composto por muitas espécies centenárias, foi o que apresentou maior restrição de informações. Somente três espécies, Araucária, Cedro e Goiaba-serrana, continham dados referentes a longevidade, sejam eles a partir de estudos dendrocronológicos, ou de outras formas de estimar a idade das plantas.

A longevidade das plantas é um atributo funcional que influencia uma variedade de processos ecológicos, incluindo a dinâmica populacional, a estratégia reprodutiva e a resposta às mudanças ambientais. No entanto, estudos abrangentes sobre a longevidade das plantas são notavelmente menos comuns em comparação com aqueles que investigam características mais tangíveis, como altura e massa. Esta lacuna de dados é atribuída, em parte, à complexidade inerente à determinação da longevidade das plantas, a natureza multifacetada e à dificuldade de realizar estudos de longo prazo em escala suficiente para abordar essa questão de forma abrangente. Esses fatores tornam a determinação de valores precisos e universalmente aplicáveis

uma tarefa desafiadora. A variação e a amplitude dos dados do atributo longevidade máxima da planta por grupo funcional obtidos está representada na Figura 7.

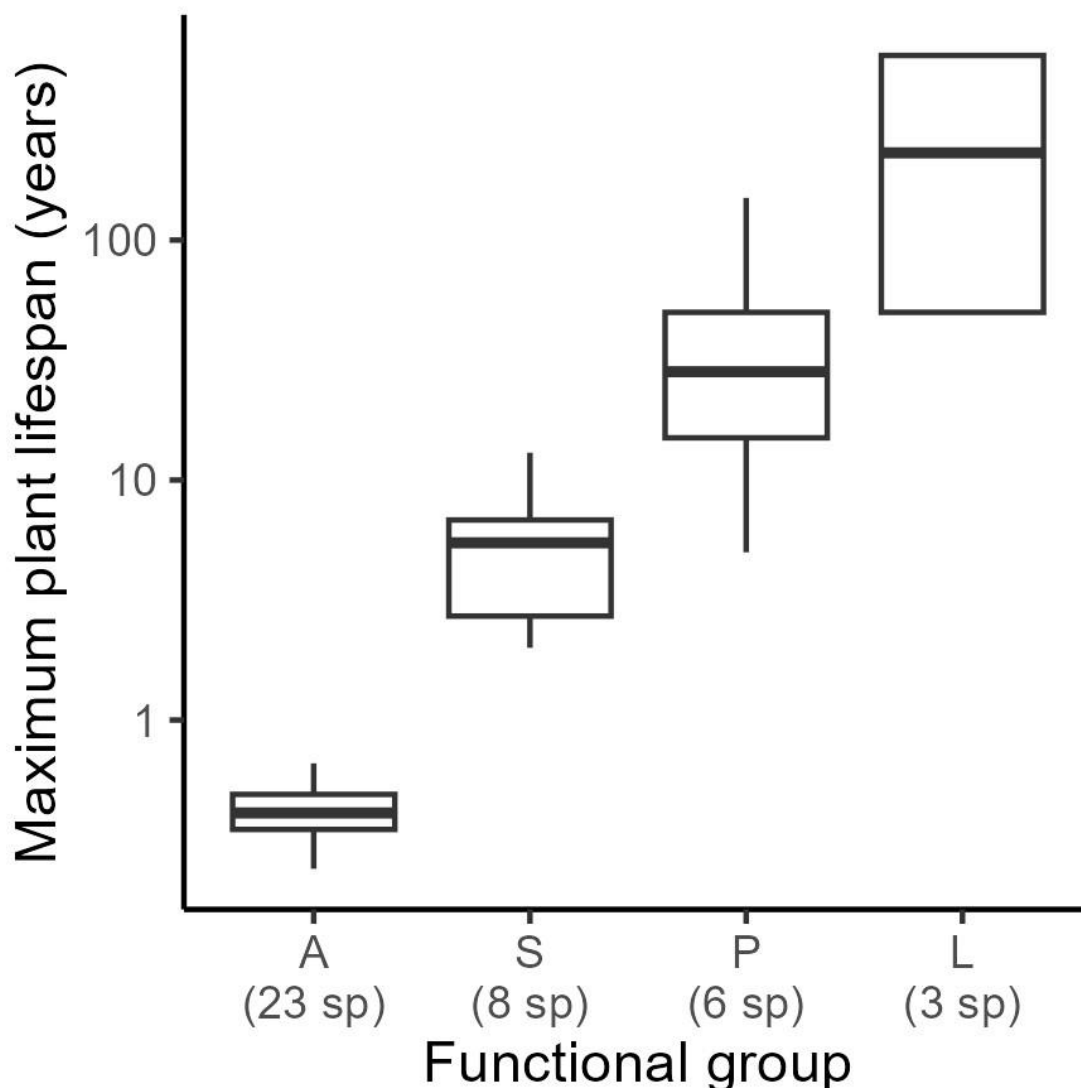


Figura 7. Valores do atributo funcional *Longevidade Máxima da Planta* em anos por grupo funcional (O número abaixo de cada grupo funcional indica a quantidade de espécies que continham valores desse atributo na literatura).

O atributo funcional altura máxima da planta foi obtido para todas as espécies utilizadas no experimento (Figura 8). Isso foi possível devido à disponibilidade de numerosos estudos, bancos de dados e recursos online dedicados à catalogação de informações sobre as características físicas das plantas. A relevância desse atributo se estende por diversas áreas práticas e teóricas. Disciplinas como botânica, agronomia, silvicultura e ecologia fazem uso dessas informações para compreender a estrutura das plantas, sua função ecológica, processos associados e aplicações

econômicas. Agroecossistemas como SAFs necessitam considerar a altura como elemento fundamental de planejamento do sistema.

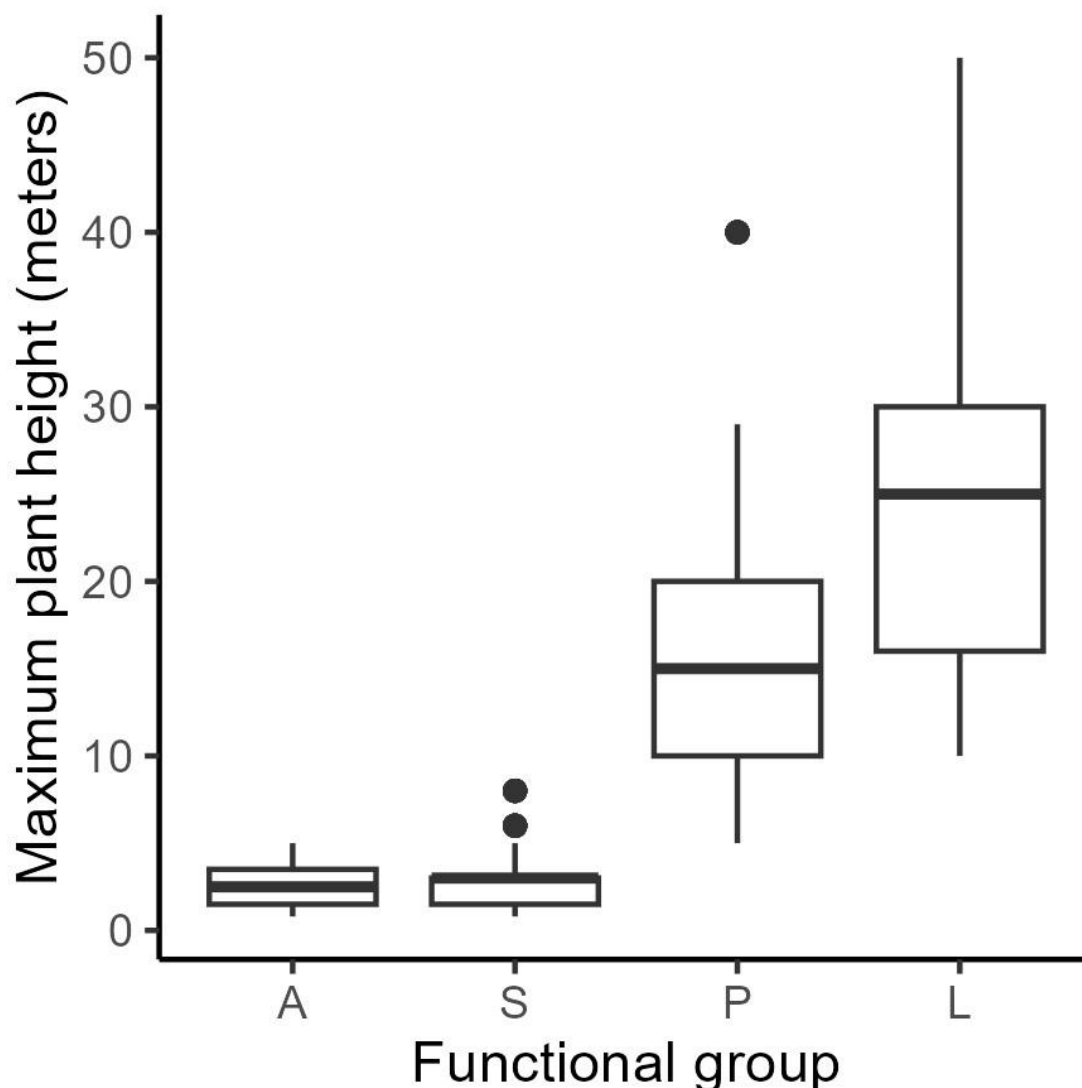


Figura 8. Distribuição das espécies em função do atributo funcional *Altura Máxima da Planta* em metros por grupo funcional.

7.5 DETERMINAÇÃO DA TAXA DE CRESCIMENTO RELATIVO (TCR), DA MÉDIA FUNCIONAL (MF), DIVERSIDADE FUNCIONAL (DF) E ÍNDICE DE TAMANHO (ESTIMADOR DE BIOMASSA)

Devido à inviabilidade de medir diretamente a biomassa no experimento sem destruir as plantas, foi calculado um índice de tamanho para cada indivíduo e comunidade nos núcleos. Esse índice é um estimador de biomassa e foi obtido multiplicando altura e área basal, já que esses atributos estão altamente correlacionados com a biomassa (Binotto; Lúcio; Lopes, 2010).

A taxa de crescimento relativo (TCR) foi calculada para diferentes intervalos de tempo. Foram utilizados os intervalos de tempo 30-90, 180-450 e 30-450 dias após o plantio. Além do intervalo temporal, foram utilizados os atributos diâmetro à altura do solo e altura da planta para este cálculo. Segundo Baltzer; Thomas (2007), esses parâmetros fornecem uma medida de taxa de crescimento mais robusta, na ausência de equações alométricas específicas. A TCR foi calculada a partir da seguinte equação:

$$RGR_{d^2h} = \frac{\ln(d_2^2 h_2) - \ln(d_1^2 h_1)}{(t_2 - t_1)}$$

Onde d^2h são o produto do diâmetro à altura do solo ao quadrado pela altura no início (t_1) e no final (t_2) do período de medição, respectivamente (Baltzer; Thomas, 2007).

As médias funcionais (MF) foram calculadas com base na hipótese da razão de massas (Grime, 1998) utilizando o pacote “FD” (Laliberté; Legendre, 2010) utilizando o Community Weighted Mean (CWM) seguindo a equação:

$$CWM = \sum_{i=1}^n p_i \times t_i$$

Onde p_i e t_i são, respectivamente, a abundância relativa e o valor do atributo para a espécie i em uma comunidade com um total de n espécies.

A diversidade funcional (DF) foi calculada utilizando a entropia quadrática de Rao (Rao, 1982) considerada uma medida adequada para esse componente da biodiversidade (Botta-Dukát, 2005; Pillar et al., 2013) utilizando o pacote “SYNCSA” (Debastiani; Pillar, 2012):

$$FD = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s d_{ij} p_i p_j$$

Onde d_{ij} é a diferença, de 0 a 1, entre espécies i e j baseada em um ou mais atributos funcionais definidos e p_i e p_j são, respectivamente, as abundâncias relativas

das espécies i e j em relação a uma comunidade com s espécies no núcleo experimental.

Para cálculo da DF e MF foram utilizados dois atributos separadamente, altura máxima e longevidade categórica, ponderados pela área basal, gerando dois índices para análise (MF e DF) para cada tempo de coleta (90, 180 e 450 dias). O atributo longevidade categórica, é um valor, em anos, atribuído para cada grupo funcional considerando a estimativa de tempo que as plantas são utilizadas no manejo agroflorestal, os valores utilizados foram 0,5 ano para anuais (A), 3 anos para semi-perenes (S), 20 anos para pioneiras (P) e 50 anos para longa vida (L). A longevidade categórica também foi utilizada, ponderada pela densidade de pontos de plantio no núcleo, para calcular DF e MF planejadas, que representam os valores de média e diversidade funcionais no momento do plantio.

7.6 ANÁLISES DE DADOS

Os dados obtidos foram submetidos a uma análise exploratória com uso de gráficos de dispersão e gráficos violino permitindo melhor descrição e visualização dos dados, identificação de outliers, observação de tendências e comparações entre grupos e tratamentos funcionais (Zuur; Ieno; Elphick, 2010). Essa análise permitiu acompanhar o desenvolvimento do sistema agroflorestal, seus atributos, média e diversidade funcionais a nível de comunidade e indivíduo.

Após a análise exploratória, os dados foram utilizados para ajustar modelos lineares de efeito misto (Zuur et al., 2009) que permitem correlacionar atributos funcionais e outras variáveis com indicadores de processos do funcionamento de ecossistemas. O desenho experimental permite ortogonalidade dos efeitos aleatórios em relação às principais variáveis preditoras utilizadas, de modo que as análises sejam potentes para detectar até mesmo efeitos sutis, possibilitando inferências generalizáveis sobre o desenvolvimento inicial de sistemas agroflorestais sucessionais. Foram testados modelos para todas as variáveis resposta utilizando todas as preditoras e covariáveis (Quadro 1). Foram selecionados e ajustados os modelos estatisticamente válidos e com relações significativas. Essas análises foram realizadas utilizando o pacote 'nlme' no software estatístico R (R Core Team, 2021).

Quadro 1: Variáveis utilizadas

VARIÁVEIS	
RESPOSTA	Área basal Índice de tamanho Taxa de crescimento relativo - TCR
PREDITORAS	Diversidade funcional Média funcional Tratamento funcional
COVARIÁVEIS	Massa do propágulo Densidade de pontos de plantio no núcleo

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.1 CAPÍTULO 1. UM OLHAR SOBRE AS DIVERSAS COMUNIDADES, GRUPOS E TRATAMENTOS FUNCIONAIS

Neste capítulo, são apresentados, explorados e discutidos os dados gerais do experimento. Para isso, são considerados diferentes abordagens que incluem os grupos funcionais, os tratamentos funcionais utilizados e a média e diversidade funcional planejada para o SAF experimental. Analisando os resultados foi possível observar que os grupos funcionais utilizados são complementares, que cada grupo tem um papel importante no desenvolvimento dos SAFs e que, com manejo adequado, é possível plantar simultaneamente espécies de diferentes grupos e acelerar a sucessão ecológica.

8.1.1 Resultados

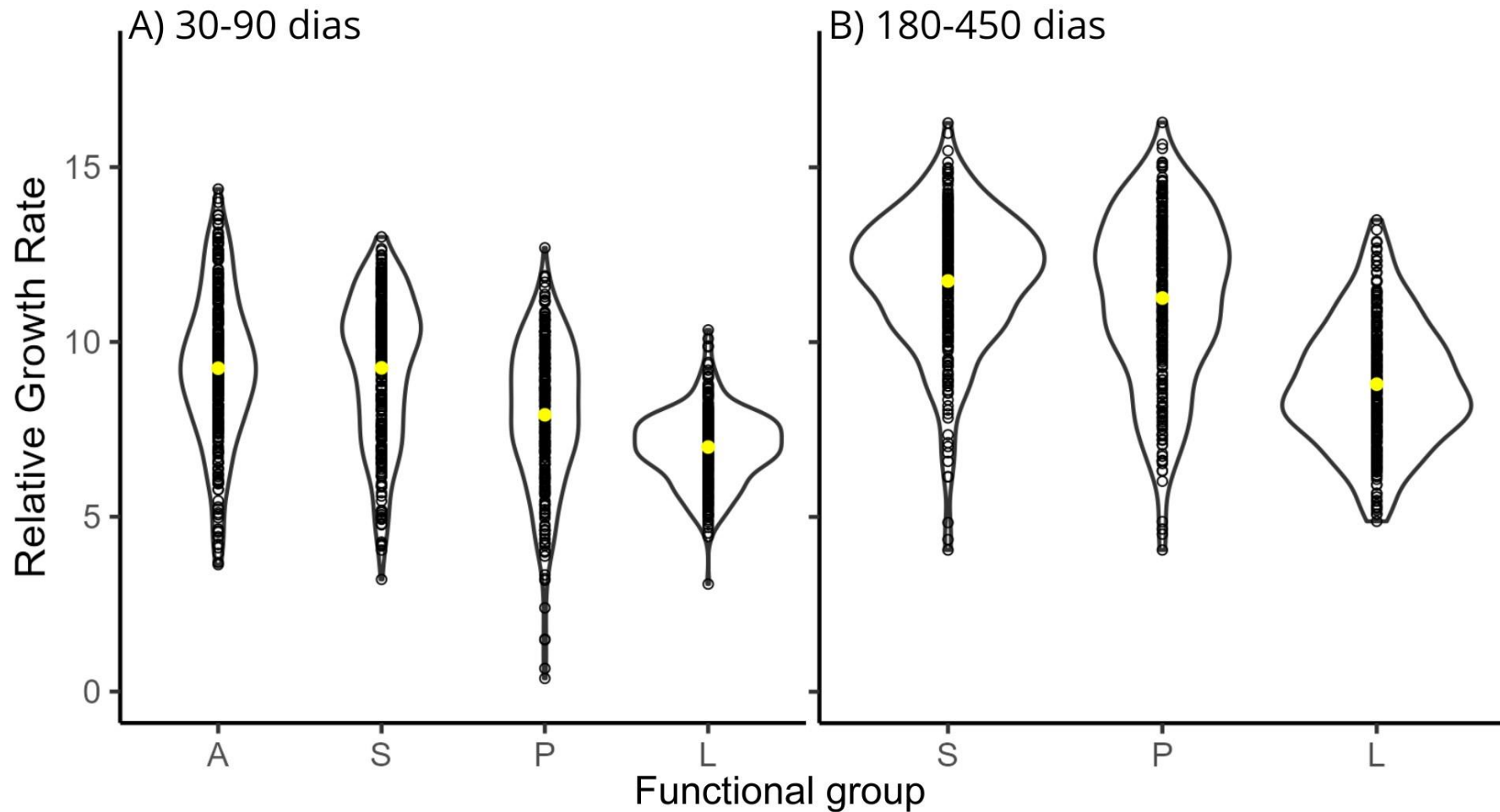


Figura 9. Taxa de crescimento relativo de todas as espécies por grupo funcional dos 30 aos 90 dias (A) e dos 180 aos 450 dias (B) após transplante a campo. Os pontos representam os valores de cada espécie no núcleo e as linhas representam a distribuição dos pontos, onde a largura do “violino” representa a densidade de dados.

A TCR média para as anuais 9,25 dos 30 aos 90 dias. Após esse período esse grupo foi retirado do sistema. As semi-perenes tiveram TCR média de 9,26 no intervalo de 30 a 90 dias e de 11,75 de 180 a 450 dias. As pioneiras apresentaram TCR média de 7,91 dos 30 aos 90 dias e dos 180 aos 450 dias de 11,26. As espécies de longa vida apresentaram a menor TCR média, sendo de 6,99 dos 30 aos 90 dias e 8,80 dos 180 aos 450 dias (Figura 9).

Todos os grupos funcionais apresentaram aumento na TCR ao longo do tempo, com destaque para as pioneiras, que apresentaram o maior aumento de TCR entre os períodos. As espécies de longa vida apresentaram a menor média e dispersão na TCR, o que é esperado considerando que são espécies de crescimento lento, mais altas e longevas, que crescem mais lentamente (Díaz et al., 2016). Vários fatores, que incluem as características de crescimento da espécie, a ontogenia e as condições ambientais, podem influenciar a taxa de crescimento relativo das plantas ao longo do tempo de vida.

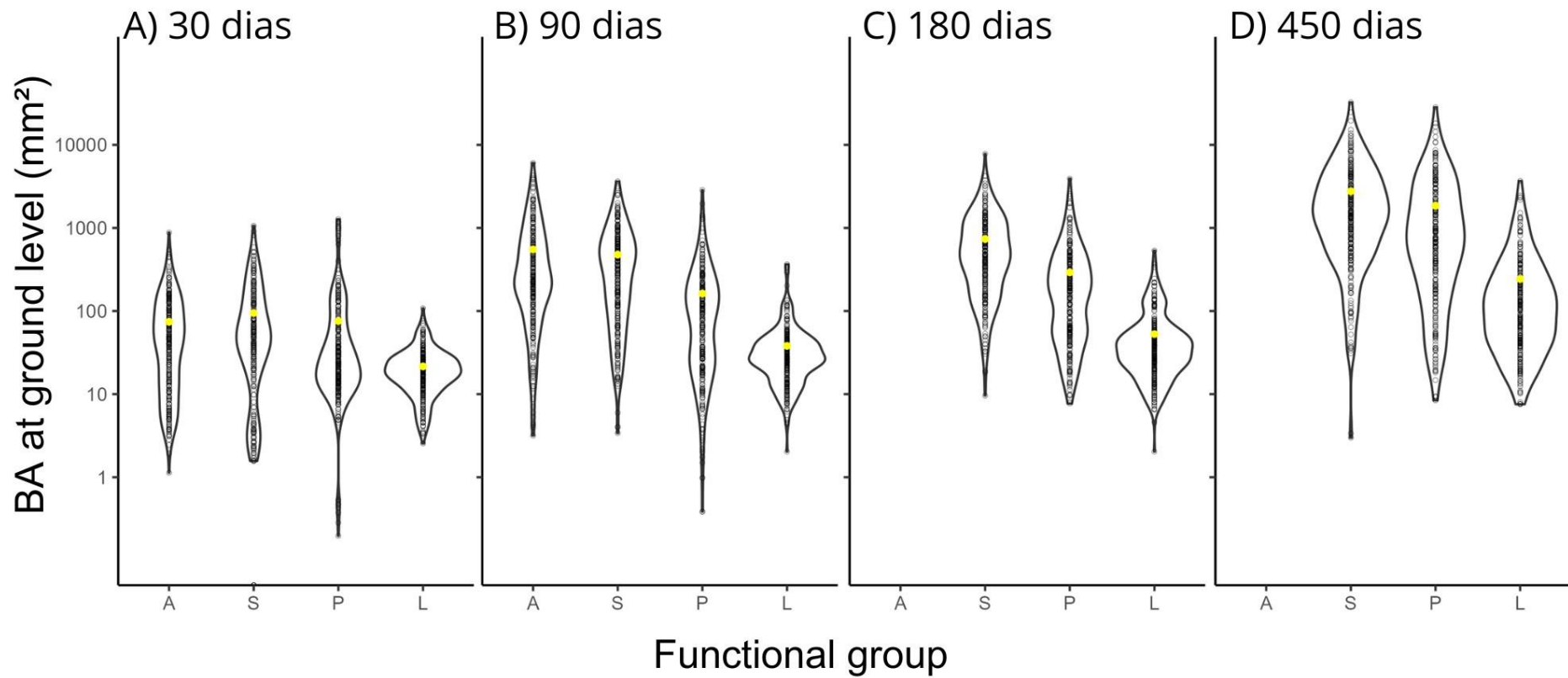


Figura 10. Área basal ao nível do solo por espécie no núcleo por grupo funcional aos 30 dias (A); aos 90 dias (B); aos 180 dias (C) e aos 450 dias (D). A partir dos 180 dias não há mais a presença das anuais e, portanto, nos gráficos C e D somente os grupos S, P e L estão representados. O ponto amarelo representa a média do grupo funcional.

As anuais apresentaram área basal média de 74,15 mm² aos 30 dias e de 551,70 mm² aos 90 dias, o que representa um aumento de 744% (Figura 10). Isso sugere um rápido crescimento e desenvolvimento inicial das espécies anuais, refletindo seu ciclo de vida curto e rápida maturação.

As semi-perenes apresentaram área basal média aos 30 dias de 94,68 mm² e aos 90 dias de 477,32 mm², um aumento de 504,14%. Aos 180 dias de desenvolvimento, a área basal média foi 735,72 mm² e aos 450 dias de 2763,59 mm², aumentando 375,6% nesse período (Figura 10). Esse grupo funcional inclui uma gama de espécies com crescimento rápido, boa capacidade de propagação por estacas e alta tolerância a podas para a obtenção de biomassa em sistemas agroflorestais e em outras práticas agrícolas.

Para as pioneiras a área basal média aos 30 dias foi 75,66 mm² e de 162,26 mm² aos 90 dias. Aos 180 dias a área basal média foi 291,78 mm² e aos 450 dias de 1851,64 mm². A área basal das pioneiras teve um aumento mais moderado no início, de 214,4% dos 30 aos 90 dias e mais acelerado no período final de avaliação, de 634,6% dos 180 aos 450 dias (Figura 10). Isso indica um crescimento inicial mais lento e um crescimento acelerado no segundo período avaliado. Esse comportamento é esperado para esse grupo que é constituído de espécies arbóreas que são capazes de colonizar áreas perturbadas ou degradadas e, à medida que se estabelecem, seu crescimento tende a acelerar.

A área basal média das espécies de longa vida aos 30 dias foi 21,57 mm² e aos 90 dias foi de 38,07 mm². Aos 180 dias de desenvolvimento, a área basal média foi 52,78 mm², enquanto aos 450 dias foi de 242,92 mm². A área basal média dessas espécies mostra um aumento lento nos primeiros 6 meses, de apenas 244,7% dos 30 aos 180 dias. Já o percentual de aumento para o intervalo de 180 a 450 dias foi de 460,2%, indicando um crescimento mais expressivo nesse período (Figura 10). As espécies de longa vida exibem a menor área basal média em comparação com os outros grupos ao longo de todos os períodos.

Esse crescimento mais lento se deve a essas espécies investirem mais recursos em estruturas robustas de sustentação e sistemas radiculares profundos e extensos que promovem sua longevidade, resistência e competitividade a longo prazo. Isso contrasta com as espécies anuais que colonizam rapidamente e exploram recursos disponíveis antes que outras plantas possam se estabelecer e têm estruturas

menos duráveis e menores. Nesse sentido, dentre as plantas utilizadas no experimento, as anuais e as longa vida estão em lados opostos do espectro de crescimento proposto por (Díaz et al., 2016), e as semi-perenes e pioneiras no meio do gradiente.

Apesar dos grupos funcionais seguirem essas tendências gerais, a amplitude das áreas basais em todos os grupos demonstra que existe uma grande variação entre as espécies. Além disso, os fatores experimentais e um grande número de outros fatores que não podem ser controlados em trabalhos ecológicos de campo também contribuem para essa variação.

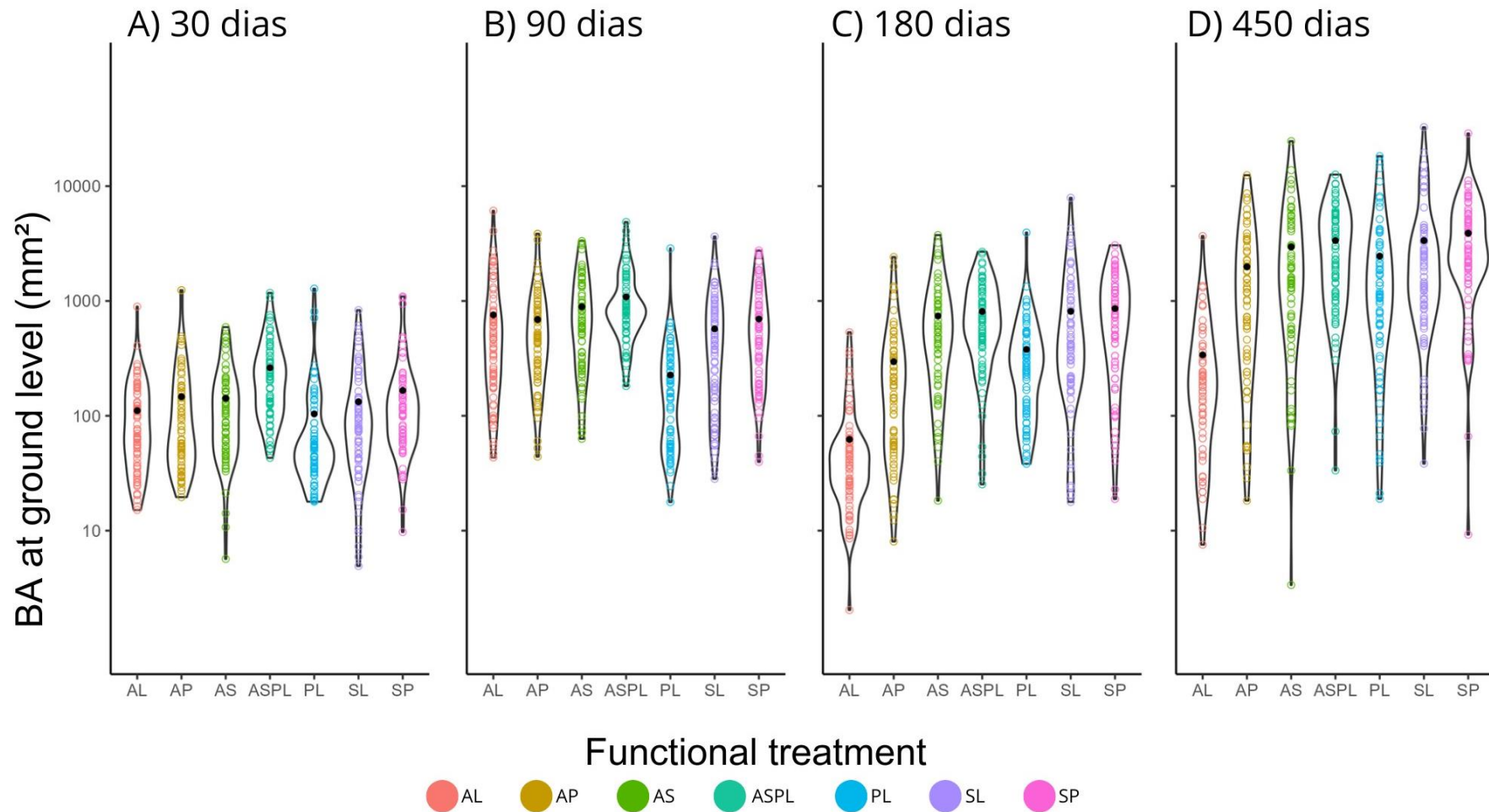


Figura 11. Soma da área basal no nível do solo de todos os indivíduos plantados no núcleo por tratamento funcional aos 30 dias (A); 90 dias (B); 180 dias (C) e 450 dias (D). Os pontos pretos representam a média em cada tratamento funcional.

O bicultivo de anual e longa vida (AL), apresentou área basal média aos 30 dias de 110,85 mm² e de 756,90 mm² aos 90 dias, um aumento de 683%. Aos 180 dias de desenvolvimento da comunidade, com a saída das anuais, a área basal média foi 62,29 mm², que representa uma redução de 92%. Aos 450 dias a área basal média foi de 339,22 mm², aumentando em 555,6% na área basal média em relação ao período anterior (Figura 11).

A combinação de anual e pioneira (AP), teve área basal média aos 30 dias de 146,59 mm² e aos 90 dias de 689,99 mm², um aumento de 471%. Aos 180 dias de desenvolvimento da comunidade, a área basal média da comunidade foi 296,08 mm², com uma redução de 57% e aos 450 dias a área basal foi de 1984,39 mm², com um aumento de 670% em relação ao período anterior (Figura 11).

O tratamento funcional com anual e semi-perene (AS), teve área basal média da comunidade aos 30 dias foi 141,96 e aos 90 dias o valor médio foi de 890,06 mm², um aumento de 627%. Aos 180 dias de desenvolvimento da comunidade, a área basal média foi 739,88 mm², reduzindo 17% e aos 450 dias teve 2957,02 mm² de área basal média, representando um aumento de 400% (Figura 11).

No tetracultivo (ASPL), a área basal média aos 30 dias foi 262,06 mm² e aos 90 dias o valor médio foi de 1084,10 mm², um aumento de 414%. Aos 180 dias a área basal média da comunidade foi 810,25 mm², uma redução de 25% e aos 450 dias teve um valor médio de 3357,57 mm², um aumento de 414% (Figura 11).

Para pioneiras e longa vidas (PL), a área basal média da comunidade aos 30 dias foi 103,91 mm² e aos 90 dias o valor médio foi de 226,69 mm², com aumento de 218%. Aos 180 dias de desenvolvimento da comunidade, a área basal média da comunidade foi 378,53 mm², com aumento de 167% e aos 450 dias teve um valor médio de 2458,73 mm², com aumento de 646% (Figura 11).

O bicultivo de semi-perene e longa vida (SL) teve área basal média aos 30 dias de 132,49 mm² e de 572,06 mm² aos 90 dias, um aumento de 432%. Aos 180 dias, a área basal média da comunidade foi 813,17 mm², aumentando 142% e aos 450 dias teve um valor médio de 3356,98 mm², o que representa um acréscimo de 413% (Figura 11).

Para o tratamento funcional de semi-perene e pioneira (SP), a área basal média da comunidade aos 30 dias foi 166,35 mm² e aos 90 dias o valor médio foi de 697,60 mm² com aumento de 419%. Aos 180 dias de desenvolvimento da

comunidade, a área basal média da comunidade foi 858,67 mm², representa aumento de 123% e aos 450 dias teve um valor médio de 3896,50 mm², representando um aumento de 454% (Figura 11).

Todas as comunidades que contém anuais (AL, AP, AS e ASPL) apresentaram uma redução na área basal média aos 180 dias. A saída desse grupo acarreta uma grande perda de biomassa, o que pode ter impactos importantes no desenvolvimento subsequente desses tratamentos funcionais.

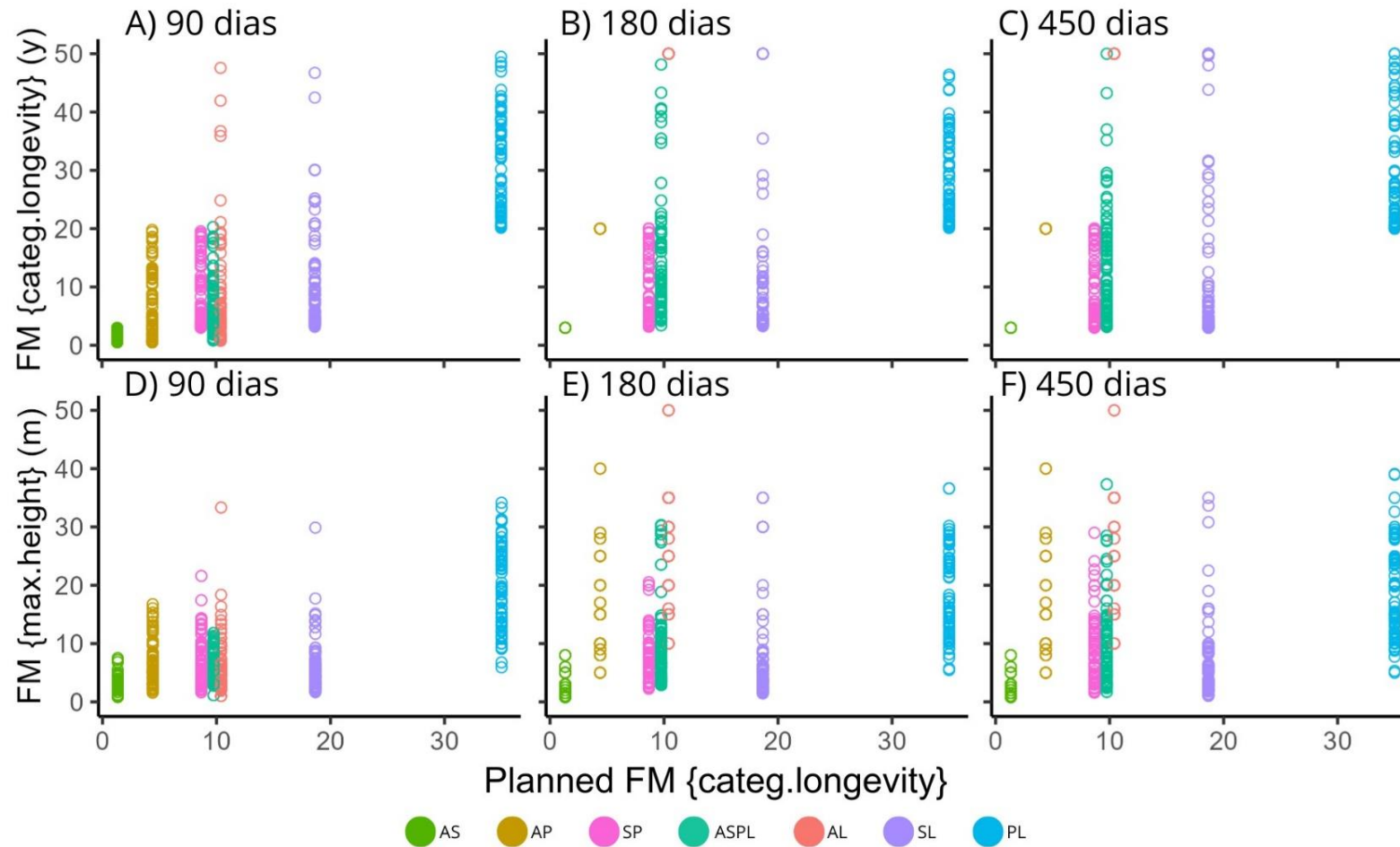


Figura 12. Média funcional (MF) da longevidade categórica em anos aos 90 dias (A); aos 180 dias (B) e aos 450 dias (C); e da altura máxima em metros aos 90 dias (D); aos 180 dias (E) e aos 450 dias (F) pela média funcional planejada. As cores representam os tratamentos funcionais.

As médias funcionais planejadas, calculadas a partir da longevidade categórica ponderada pelo número de pontos de plantio, foram de 1,33 anos para o tratamento funcional AS; 4,40 anos para o AP; 8,67 anos para o SP; 9,75 anos para o ASPL; 10,40 anos para o AL; 18,67 anos para o SL; e 35 anos para o PL (Figura 12). Para todos os tratamentos funcionais as médias funcionais ao longo do tempo apresentaram grande dispersão, estando pouco relacionadas às médias planejadas.

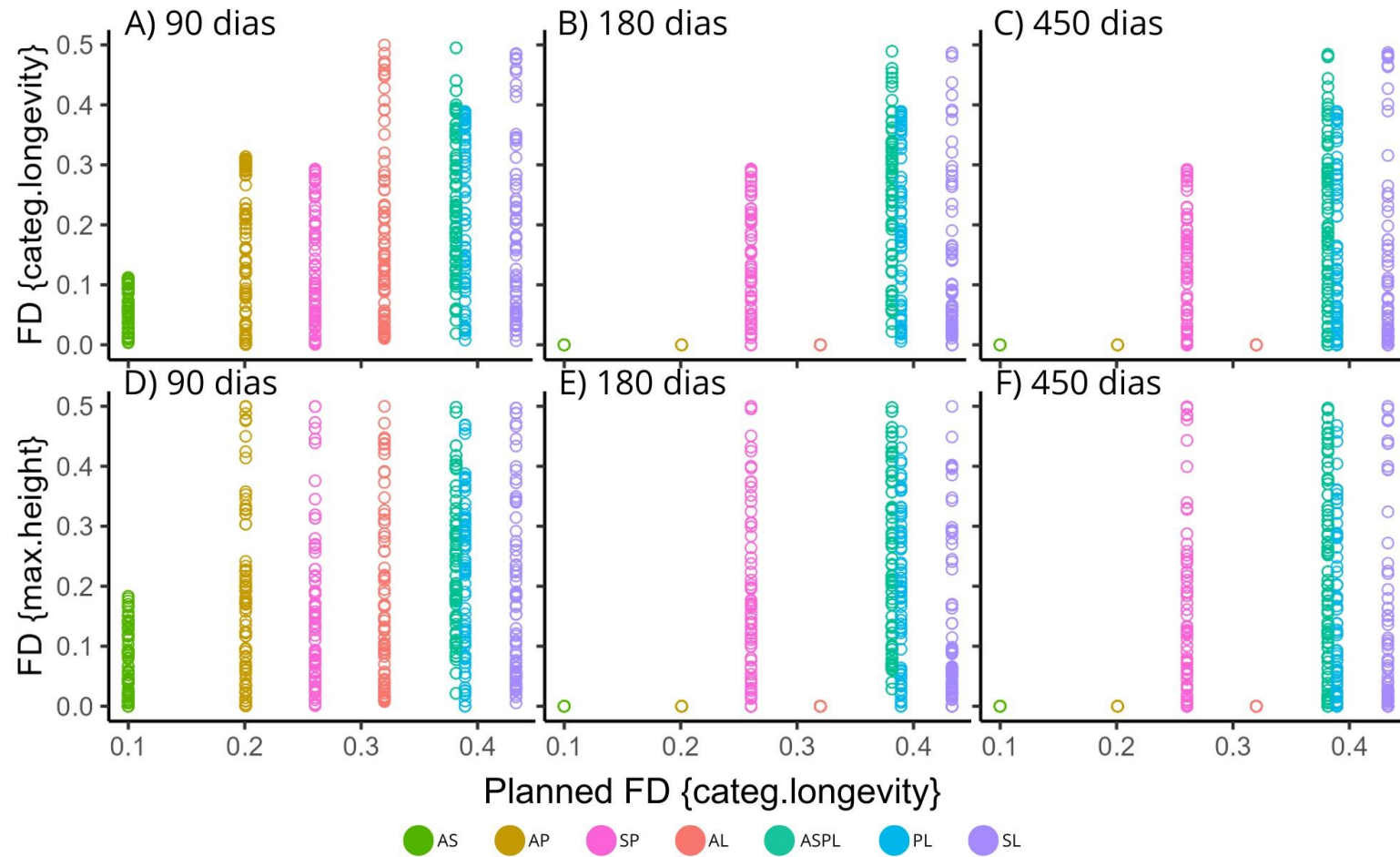


Figura 13. Diversidade funcional (DF) da longevidade categórica aos 90 dias (A); aos 180 dias (B) e aos 450 dias (C); e da altura máxima aos 90 dias (D); aos 180 dias (E) e aos 450 dias (F) pela diversidade funcional planejada. As cores representam os tratamentos funcionais.

As diversidades funcionais planejadas, calculadas a partir da longevidade categórica ponderada pelo número de pontos de plantio, foram de 0,10 para o tratamento funcional AS; 0,20 para o AP; 0,26 para o SP; 0,32 para o AL; 0,38 para o ASPL; 0,39 para o PL; e 0,43 para o SL (Figura 13).

Devido à retirada das plantas anuais, nos tratamentos funcionais com a presença de anuais em bicultivos (AS, AP e AL), apenas uma espécie permaneceu. Por conta disso, a partir dos 180 dias, a diversidade funcional é igual a zero e as médias funcionais são iguais aos valores do atributo da espécie remanescente.

As semelhanças das médias e diversidades funcionais entre a longevidade categórica e altura máxima (Figuras 12 e 13) mostram que, para essas medidas, os grupos funcionais categóricos utilizados no desenho experimental são adequados para planejar a média ou diversidade funcional de SAFs. Apesar disso, a grande dispersão dos dados em relação às médias e diversidades planejadas mostra que existe muito ruído nesses parâmetros funcionais, o que indica que é difícil controlar a média e diversidade funcional apenas através do plantio, sendo necessárias outras práticas de manejo durante o desenvolvimento dos SAFs para esse fim.

8.1.2 Discussão

Os resultados indicam que, em sistemas agroflorestais, condições favoráveis à sucessão ecológica podem ser criadas de maneira rápida, através de consórcios com espécies anuais e semi-perenes. Essas espécies têm crescimento inicial acelerado e ocupam rapidamente o espaço, estabelecendo mais biomassa nos primeiros meses quando comparadas às árvores pioneiras (Figuras 9 e 10). Esses fatores fazem com que os SAFs sejam potenciais facilitadores da sucessão ecológica, podendo ser importantes na restauração.

A sucessão ecológica não conduzida também pode levar à restauração, mas depende de condições favoráveis, como a existência na paisagem de remanescentes florestais secundários médios e tardios capazes de fornecer sementes, por exemplo (Jakovac et al., 2021; Siminski et al., 2021). No entanto, em outras condições a sucessão secundária pode ser dominada por poucas espécies pioneiras de idades próximas e longevidades parecidas, resultando em florestas pouco diversas por muitos anos, retardando o desenvolvimento de espécies de longa vida (Finegan, 1996; Martínez-Garza; Howe, 2003).

Na ausência de condições adequadas para a regeneração natural, são necessárias técnicas ativas de restauração, como plantio de árvores, por exemplo (Jakovac et al., 2021). Nesse contexto, o estabelecimento rápido de espécies de longa vida e dispersas por animais, típicas de estágios sucessionais avançados, pode favorecer e acelerar a regeneração dos ecossistemas florestais (Bello et al., 2024; Li et al., 2018; Martínez-Garza; Bongers; Poorter, 2013; Martínez-Garza; Howe, 2003).

O estabelecimento e desenvolvimento inicial de mudas de árvores de estágios sucessionais avançados é um dos maiores limitantes de processos de restauração ativa (Holl et al., 2020). Em florestas tropicais, o recrutamento dessas espécies é muito difícil em áreas abertas de pastagens ou plantações abandonadas (Martínez-Garza; Bongers; Poorter, 2013; Martínez-Garza; Howe, 2003). Em geral, espécies arbóreas de longa vida dependem de sombra e umidade para germinar e se estabelecer, condições criadas por outros grupos de plantas (Lienard; Florescu; Strigul, 2015; Walters; Reich, 1996). Em SAFs essas condições podem ser criadas por espécies de crescimento rápido.

Nesse sentido, considerando SAFs com a finalidade de restauração, utilizar diferentes grupos funcionais de plantas pode ser estratégico (Carlucci et al., 2020). Os resultados sugerem que utilizar grupos de diferentes longevidades pode ser promissor. Uma sucessão entre os grupos funcionais propostos pode ser observada ao analisar as mudanças nas suas áreas basais ao longo do tempo (Figura 10), sugerindo que esses grupos ocupam nichos distintos, sendo complementares. As plantas anuais estabelecem biomassa rapidamente e, juntamente com as semi-perenes, apresentam as maiores áreas basais até os 90 dias. Aos 180 dias, as anuais já saíram do sistema e as semi-perenes mantêm uma área basal importante e crescimento acelerado. As pioneiras apresentam um aumento expressivo na velocidade de crescimento a partir dos 180 dias e, aos 450 dias, já se aproximam das semi-perenes em área basal e espera-se que pouco tempo após esse período passem a representar a maior parte da biomassa da comunidade (Figuras 9 e 10). Essa ocupação de nichos temporais diferentes pode indicar um efeito de complementaridade, otimizando o funcionamento dos ecossistemas (Naeem et al., 1994).

Espécies de longa vida, quando consorciadas em núcleos com espécies de rápido crescimento próximas, podem encontrar condições adequadas para o

estabelecimento e desenvolvimento inicial. Os dados mostram que essas espécies se desenvolveram ao longo de todo período avaliado, demonstrando aumento expressivo de suas áreas basais aos 450 dias (Figura 10). Isso evidencia o sucesso dos SAFs como potenciais facilitadores da sucessão ecológica.

A sucessão agroflorestal proposta nesse trabalho demonstra que cada grupo funcional tem um papel importante. Isso pode ser evidenciado no experimento, analisando as áreas basais das combinações de grupos funcionais ao longo do tempo (Figura 11). Os tratamentos funcionais que combinam espécies anuais e arbóreas, sejam elas pioneiras ou de longa vida (AP e AL), apresentam um grande declínio de área basal dos 90 aos 180 dias, causado pela saída das plantas anuais, que eram dominantes nesses bicultivos (Figuras 10 e 11). Esse colapso simultâneo da maior parte da biomassa pode reverter a sucessão (quase) ao início, impondo novamente os filtros ambientais severos de ambientes abertos. Comunidades vegetais dominadas por plantas com idades próximas (plantadas no mesmo período) e longevidades parecidas (mesmo grupo funcional) estão sujeitas a esses processos porque espera-se que as plantas dominantes senesçam no mesmo período. Esse efeito assemelha-se ao do ‘desertos de pioneiras’ proposto por Martínez-Garza; Howe (2003).

Esse declínio de biomassa não é observado nos tratamentos funcionais que combinam anuais e semi-perenes (AS e ASPL) (Figura 11). Apesar de terem longevidade maior, a taxa de crescimento relativo das semi-perenes se aproxima a das anuais (Figura 9), isso demonstra a importância desse grupo para manter a biomassa em SAFs. As pioneiras, por sua vez, não foram capazes de manter a área basal do sistema aos 180 dias em bicultivo com anuais (AP) (Figura 11). Por serem espécies arbóreas, é esperado que seu crescimento seja mais lento (Figura 9), por outro lado, também se espera que a médio prazo esse grupo represente a maioria da biomassa da comunidade (Martínez-Garza; Bongers; Poorter, 2013). Além disso, por ser o primeiro grupo arbóreo a se estabelecer, as pioneiras possibilitam diversos processos ecológicos típicos de ambientes florestais (Urgoiti et al., 2022).

Manter SAFs com alta biomassa é importante porque a quantidade de biomassa é um dos principais impulsores de processos ecossistêmicos, especialmente na sucessão em florestas tropicais (Lohbeck et al., 2015). Nesse contexto, os grupos funcionais de menor longevidade (anuais e semi-perenes) são responsáveis pela produção rápida e manutenção da biomassa do sistema ao longo

dos primeiros meses de desenvolvimento (Figura 10), promovendo ciclagem de nutrientes, cobertura do solo e criação de novos nichos ecológicos (Díaz et al., 2016; Martínez-Garza; Bongers; Poorter, 2013).

Além da quantidade, é importante considerar a proporção em que cada grupo funcional contribui para a biomassa da comunidade, ou seja, sua abundância relativa. Nesse sentido, manejar as abundâncias deve refletir diretamente nas médias funcionais (Figura 12) e nas diversidades funcionais (Figura 13) medidas, já que ambas são ponderadas pela abundância relativa (Botta-Dukát, 2005, Pillar et al, 2013, Tobner 2016, Garnier e Navas, 2012, Ricota e Moretti, 2010). Controlar esses parâmetros somente através do plantio pode ser difícil, considerando a grande dispersão desses índices nos dados. Desta forma, propõe-se que o manejo direto das abundâncias, realizado através de plantios ou podas, por exemplo, pode ser eficiente para direcionar processos ecológicos em SAFs. Considerando o proposto pela teoria da razão de massas, que as plantas mais abundantes determinam os processos ecológicos em uma comunidade (Grime, 1998; Rosenfield; Müller, 2020), a média funcional é importante porque podemos conduzir, através do manejo, diversos processos como a competição intra e interespecífica, a complementaridade entre grupos e até mesmo processos de facilitação. A diversidade funcional, por sua vez, é importante porque plantas com características diferentes tendem a ocupar nichos distintos e utilizar recursos de forma diferente (Lavorel; Garnier, 2002; Loreau, 2000), portanto comunidades dominadas por apenas um grupo funcional podem ser menos eficientes em utilizar recursos (Díaz; Cabido, 2001). Esses aspectos reforçam a importância de manejar a abundância dos diferentes grupos funcionais ao longo do tempo e a necessidade de plantar diversidade suficiente para que esses manejos sejam eficientes na condução de processos ecológicos.

Além de facilitar a sucessão ecológica, o manejo em SAFs tem outras sinergias com processos de restauração, dentre elas estão ampliação do período de manejo, compensação de custos e geração de renda, maior segurança alimentar e incentivo para que agricultores familiares conduzam a restauração ecológica (Vieira; Holl; Peneireiro, 2009).

Nesse contexto, os grupos funcionais propostos nesse trabalho ganham uma nova dimensão de importância, a de prover diretamente para as pessoas. Os grupos anual e semi-perene são muito importantes por seus serviços de provisão direta já

que, em sistemas agroflorestais, são normalmente compostos por plantas que produzem alimentos. Além disso, ao encerrarem seus ciclos produtivos, boa parte de sua biomassa é incorporada ao solo. As semi-perenes e pioneiras, em geral, possuem boa capacidade de rebrote, podendo ser podadas, incorporadas ao solo e voltar a produzir biomassa sem necessidade de replantios. Esses dois grupos também podem fornecer fibras e lenha. Espécies de longa vida, além de serem chaves para a restauração, podem fornecer madeira e frutos a médio ou longo prazo.

Em um planeta onde boa parte da terra é manejada por agricultores, é lógico pensar que a manutenção da biodiversidade depende desses atores (Tilman et al., 2011). Portanto, se faz necessário adotar um modelo de sucessão que reconhece que as pessoas e o contexto social direcionam a sucessão ecológica e que a restauração tem mais sucesso quando é feita por e para pessoas (Poorter et al., 2023). Assim, SAFs sucessionais são capazes de conciliar a restauração ecológica e a provisão para as pessoas, incentivando sua adoção pelos agricultores.

8.1.3 Conclusão

A compreensão dos processos de sucessão secundária e a utilização de grupos funcionais são fundamentais para otimizar o manejo desses sistemas. Assim, podemos conduzir processos ecológicos que acelerem a sucessão, incluindo, já no momento inicial de plantio, espécies de alto valor ecológico e/ou econômico e favorecendo seu desenvolvimento através de consórcios planejados. Esses processos permitem a manutenção das diferentes formas de diversidade, viabilizando a produção contínua de biomassa, maximizando as interações benéficas entre plantas, otimizando a utilização de recursos e aumentando a capacidade do sistema de suportar perturbações. Nesse sentido, a longevidade categórica se mostrou uma característica útil e promissora para o planejamento de SAFs sucessionais.

Além disso, a participação ativa das comunidades humanas proporciona benefícios socioeconômicos e ecológicos. Integrar esses elementos pode estimular a restauração e transformar a agricultura, promovendo agroecossistemas mais saudáveis e comunidades mais resilientes.

8.2 CAPÍTULO 2. O EFEITO DA DIVERSIDADE FUNCIONAL E DA MÉDIA FUNCIONAL NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DE ESPÉCIES DE LONGA VIDA EM SAFS SUCESSIONAIS BIODIVERSOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os efeitos da diversidade e média funcional no desenvolvimento de espécies arbóreas de longa vida. Para isso, são utilizados modelos de efeitos mistos que incluem como preditores a diversidade funcional, a média funcional, os tratamentos funcionais, a densidade de pontos de plantio no núcleo e a massa do propágulo. Analisando os resultados foi possível constatar a capacidade de SAFs para facilitar o desenvolvimento de espécies arbóreas de alto valor ecológico e econômico, propor *trade-offs* entre processos ecológicos e manejos para otimizá-los.

8.2.1 Resultados

Os modelos ajustados permitiram a visualização de efeitos de diversas variáveis sobre o desenvolvimento inicial das espécies de longa vida. Para permitir melhor comparação entre os tamanhos dos efeitos das diferentes variáveis preditoras eles serão apresentados como valores padronizados.

A taxa de crescimento relativo (TCR) das espécies de longa vida foi diferente entre os tratamentos funcionais, tanto no período até os 180 dias (Figura 14) quanto até os 450 dias (Figura 15). As espécies de longa vida apresentaram maiores TCRs nos tratamentos funcionais AL e PL (efeito positivo de 2,04 e 2,27, respectivamente, $p=0,04$ e $p=0,02$), quando comparados ao tetracultivo (ASPL) aos 180 dias. Aos 450 dias os efeitos foram semelhantes, sendo de 4,08 para o AL ($p<0,001$) e 3,33 para o PL ($p=0,001$). O tratamento SL não diferiu do tetracultivo nos dois períodos analisados.

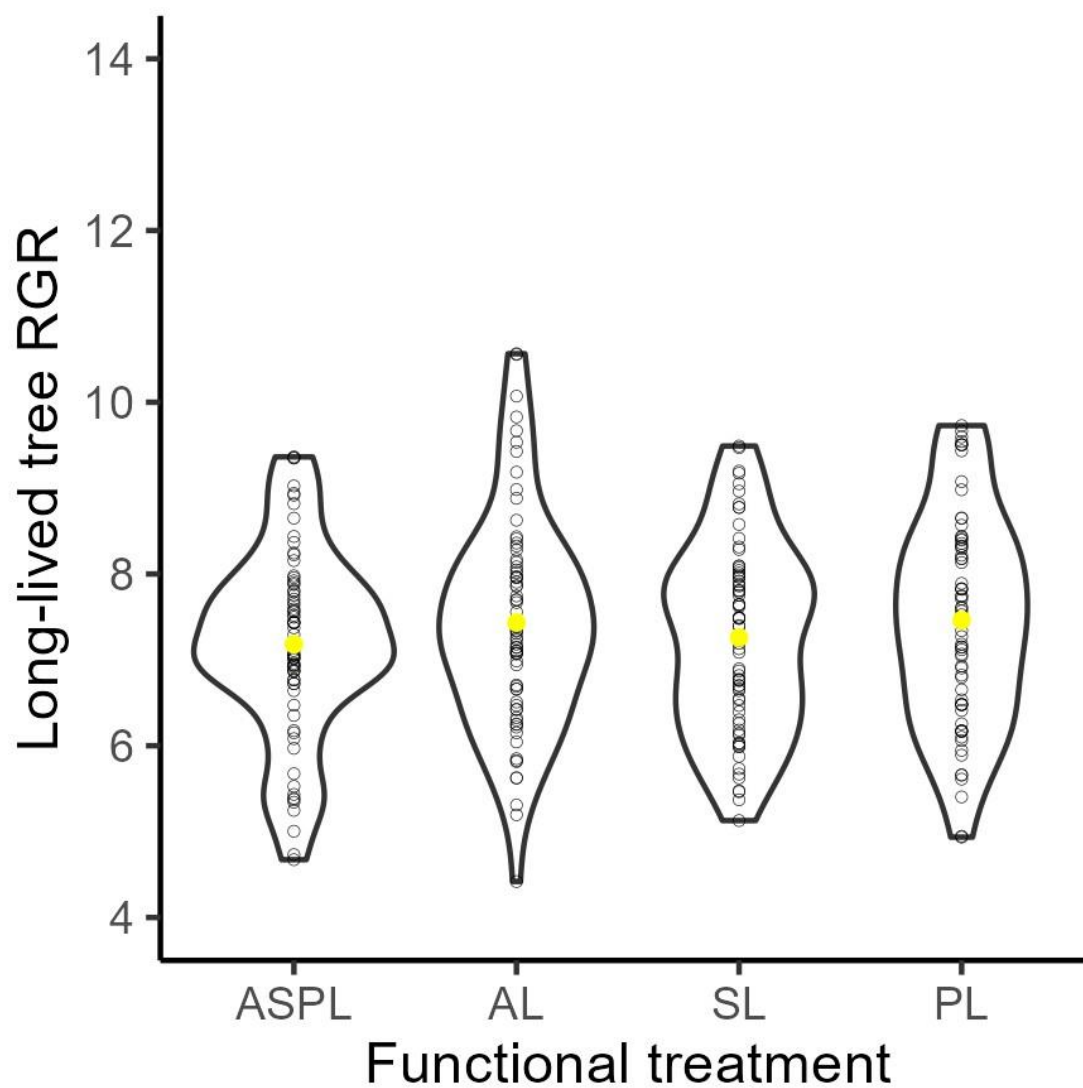


Figura 14. Taxa de crescimento relativo da longa vida dos 30 aos 180 dias em função dos diferentes tratamentos funcionais. (ASPL) tetracultivo, (AL) bicultivo de anual e longa vida, (SL) bicultivo de semi-perene e longa vida, (PL) bicultivo de pioneira e longa vida. Na cor amarela a média.

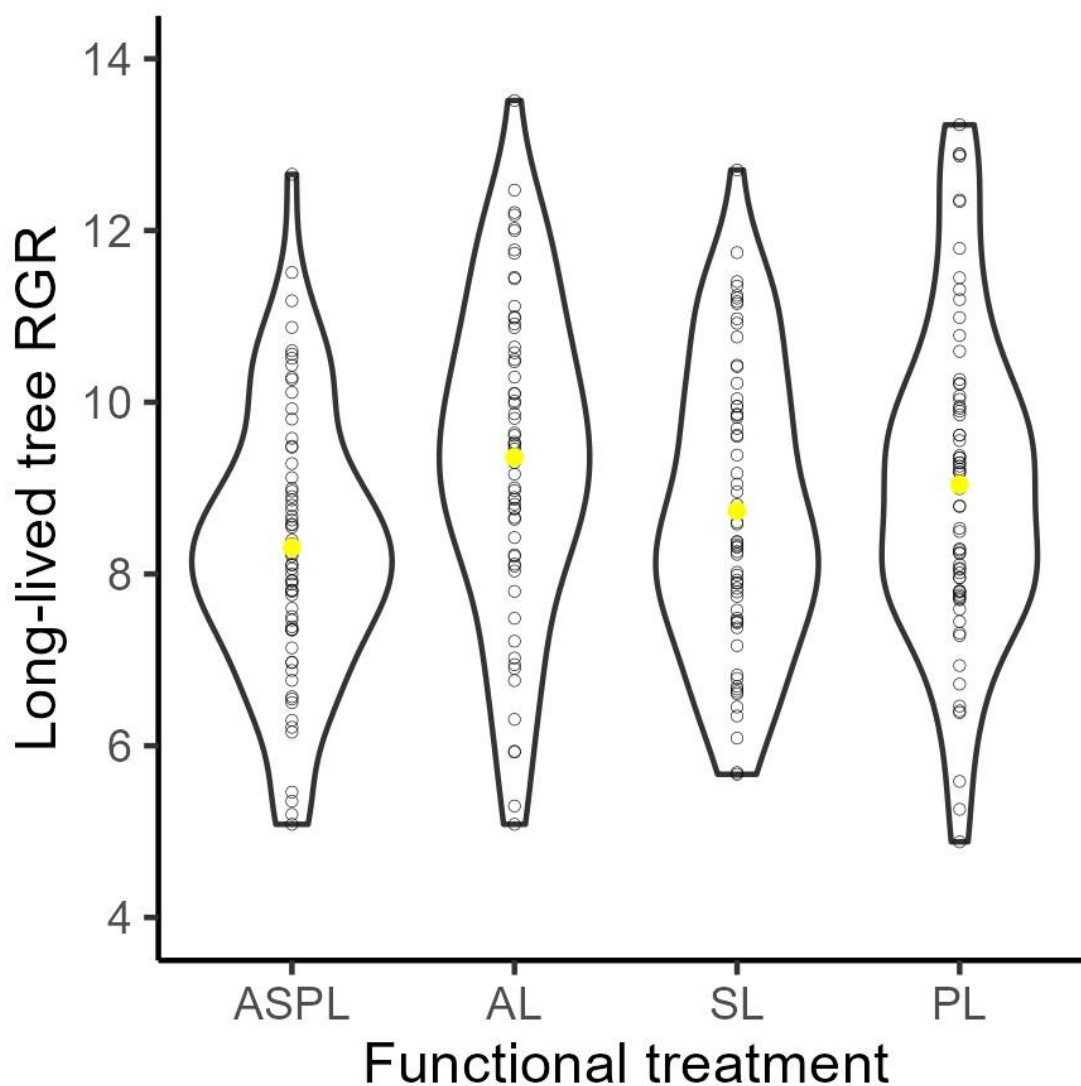


Figura 15. Taxa de crescimento relativo da longa vida dos 30 aos 450 dias em função dos diferentes tratamentos funcionais. (ASPL) tetracultivo, (AL) bicultivo de anual e longa vida, (SL) bicultivo de semi-perene e longa vida, (PL) bicultivo de pioneira e longa vida. Na cor amarela a média.

A diversidade funcional das comunidades aos 90 dias, calculada a partir das longevidades categóricas (anuais = 0,5 ano, semi-perenes = 3 anos, pioneiras = 20 anos e longa vidas = 50 anos), teve efeito positivo (3,17 com $p=0,0018$) sobre a taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias (Figura 16). A TCR das espécies longa vida respondeu de forma semelhante à diversidade funcional aos 90 dias calculada a partir do atributo altura máxima, com efeito positivo de 3,20 ($p=0,0016$) (Figura 17). A massa do propágulo teve efeito positivo de 4,94 ($p<0,001$) na TCR das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias (Figuras 16 e 17). Além disso, a

densidade de pontos de plantio teve efeito negativo de $-2,73$ ($p=0,007$) na TCR das longa vida.

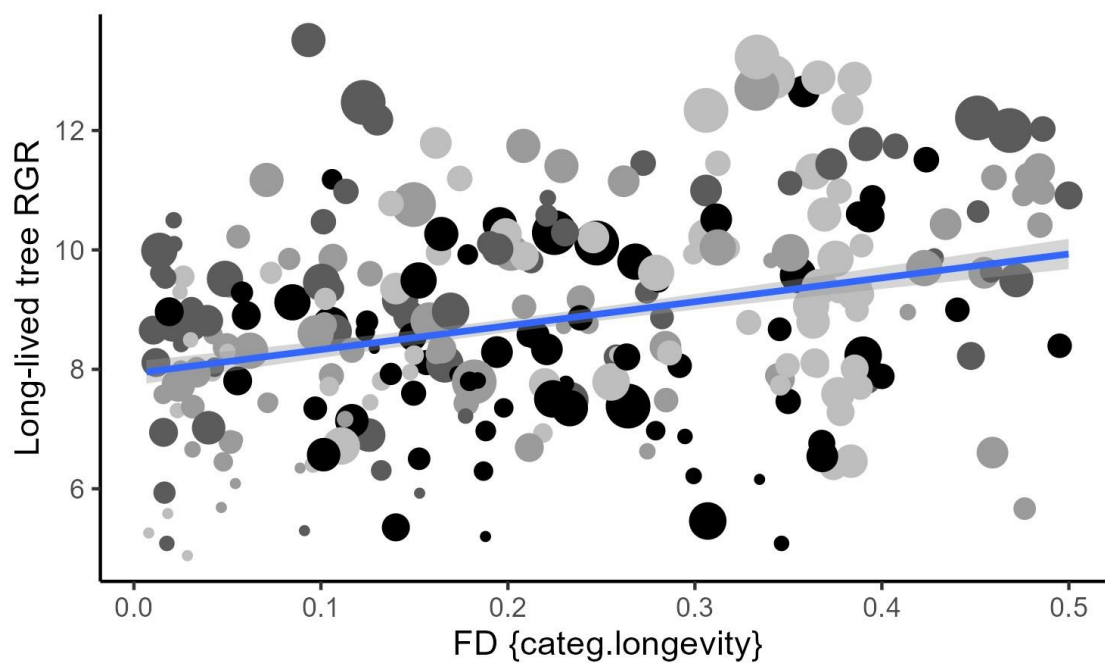


Figura 16. Taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias em função da diversidade funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.

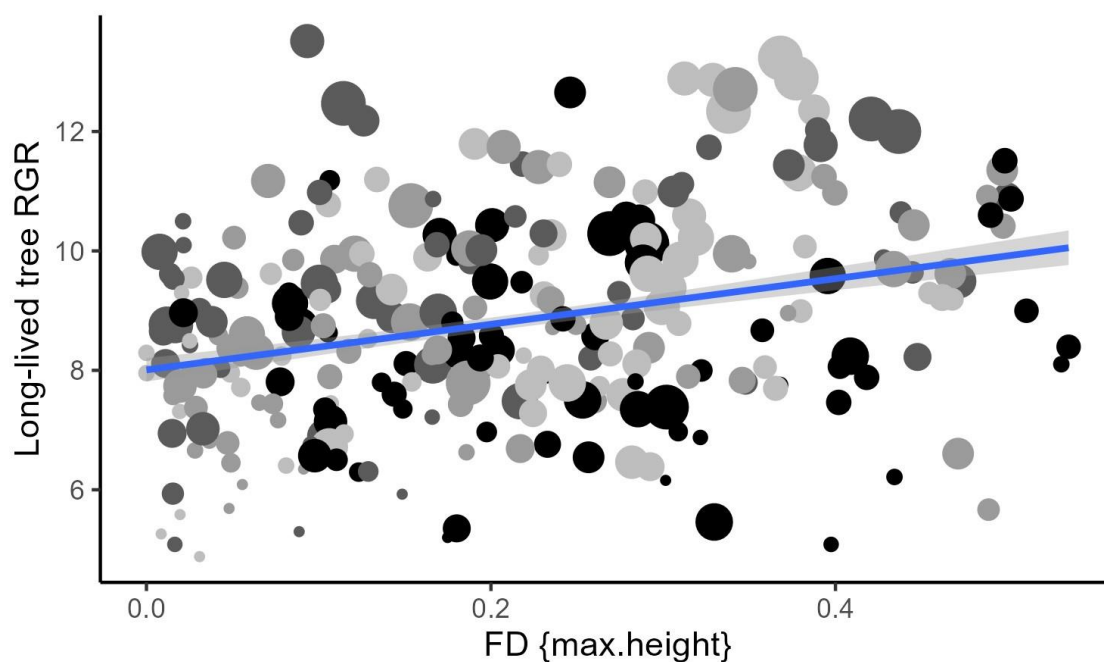


Figura 17. Taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias em função da diversidade funcional (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.

A taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias também respondeu positivamente à média funcional da longevidade categórica aos 90 dias, com efeito de 3,93 ($p < 0,001$) (Figura 18). A resposta foi semelhante quando utilizadas médias funcionais de altura máxima, com efeito positivo de 2,94 ($p = 0,004$) (Figura 19).

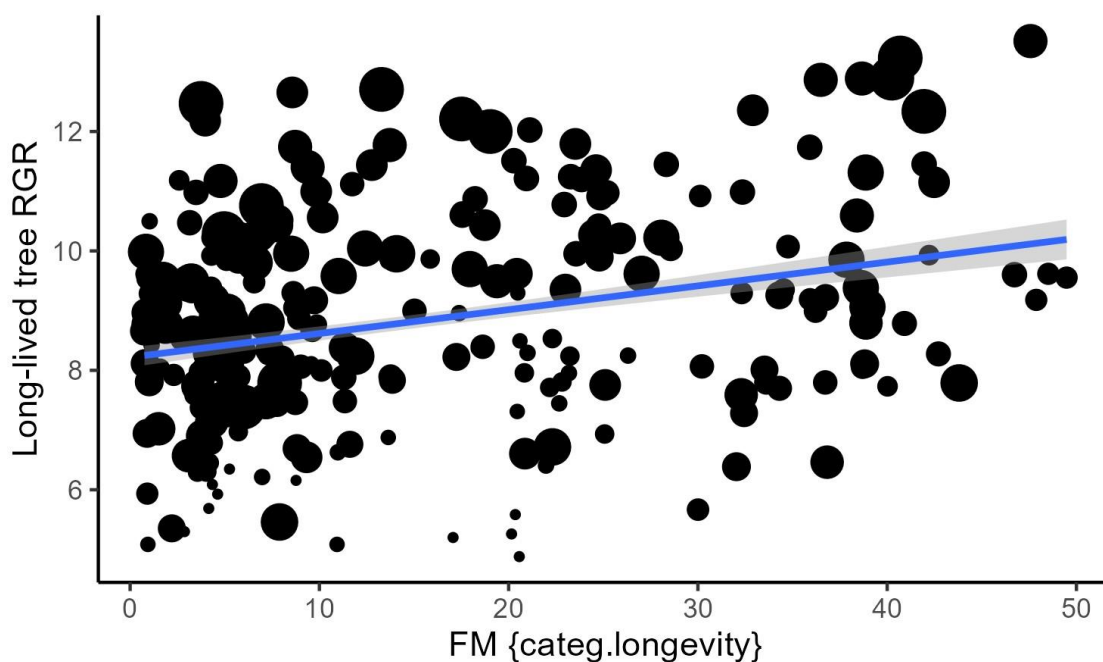


Figura 18. Taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias em função da média funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.

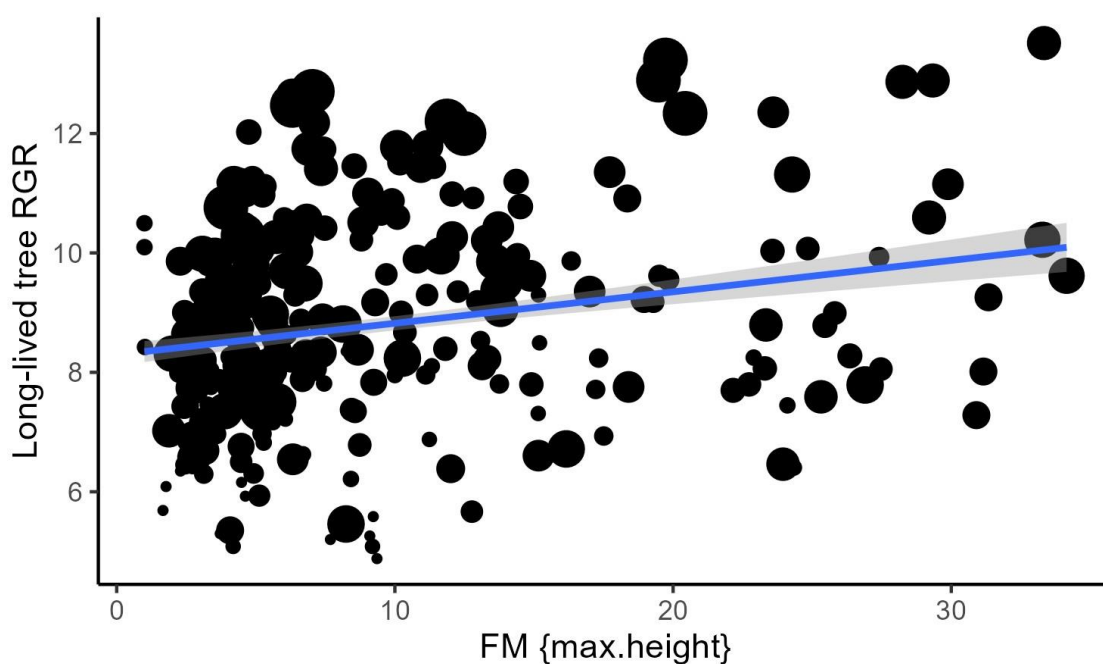


Figura 19. Taxa de crescimento relativo das espécies longa vida dos 30 aos 450 dias em função da média funcional aos 30 dias (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.

As áreas basais das espécies longa vida aos 450 dias responderam positivamente à diversidade funcional aos 90 dias e à média funcional aos 90 dias

calculadas com as longevidades categóricas. Os efeitos foram de 3,24 ($p=0,001$) e 4,26 ($p<0,001$), respectivamente. A massa do propágulo também teve efeito positivo na área basal das espécies longa vida aos 450 dias (5,73 com $p<0,001$) (Figuras 20 e 22). Para o atributo altura máxima, as áreas basais das longa vida aos 450 dias responderam positivamente à diversidade funcional (3,02; $p=0,003$) e à média funcional (5,05; $p<0,001$) (Figuras 21 e 23). Além disso, como covariável da DF, a densidade de pontos de plantio teve efeito negativo de -3,31 ($p=0,001$) nas áreas basais das longa vida (Figuras 20 e 21).

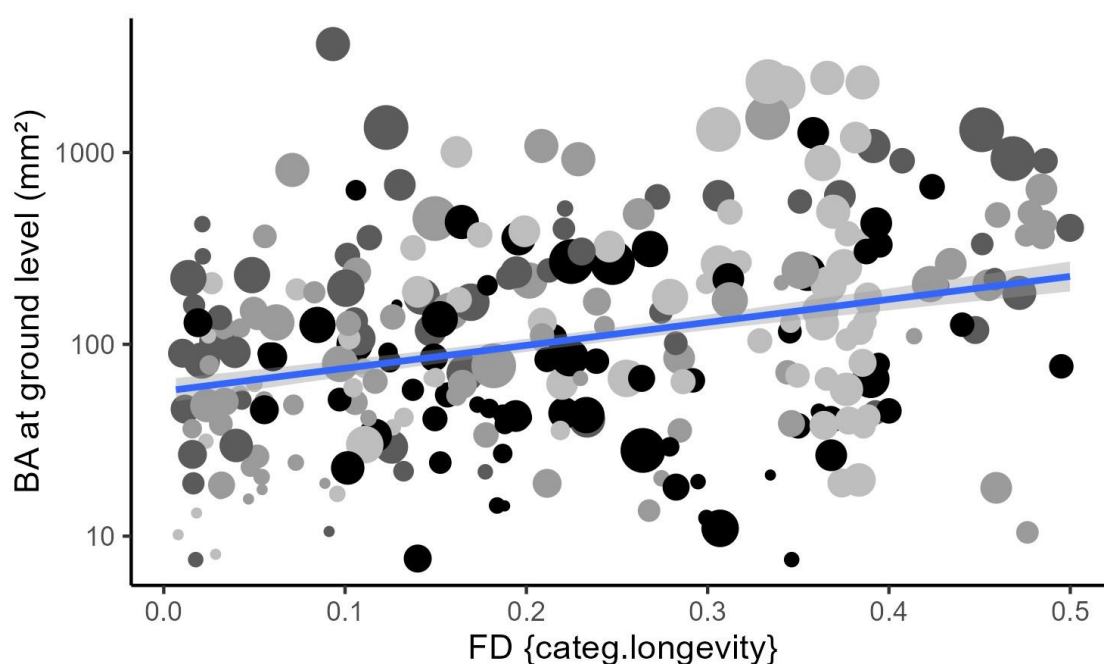


Figura 20. Área basal das espécies longa vida aos 450 dias em função da diversidade funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.

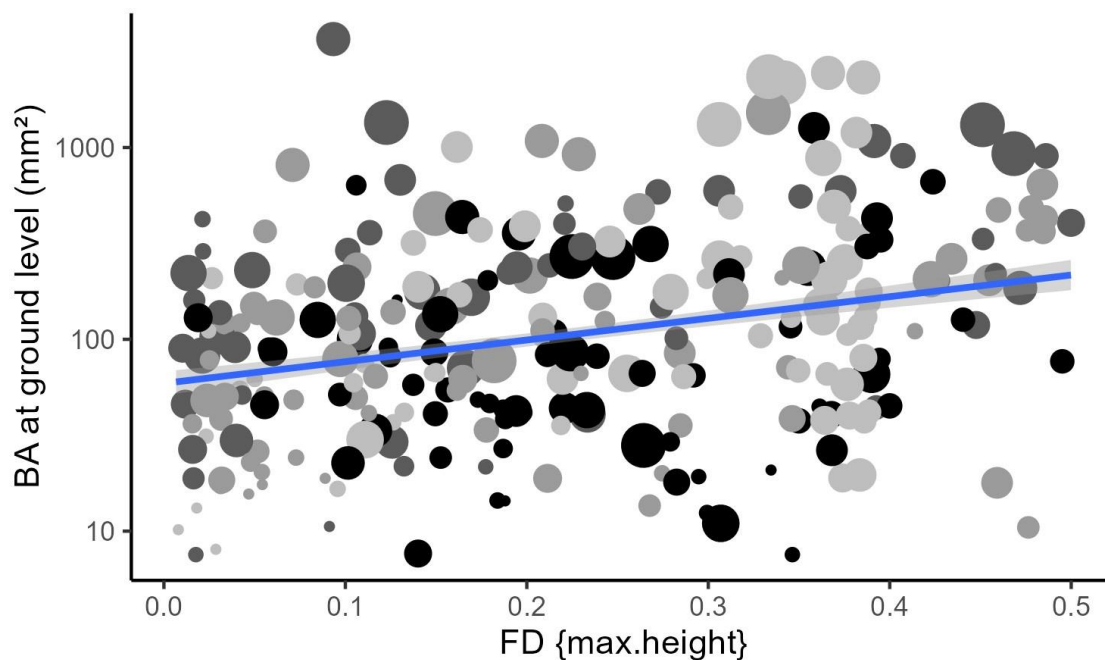


Figura 21. Área basal das espécies longa vida aos 450 dias em função da diversidade funcional (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.

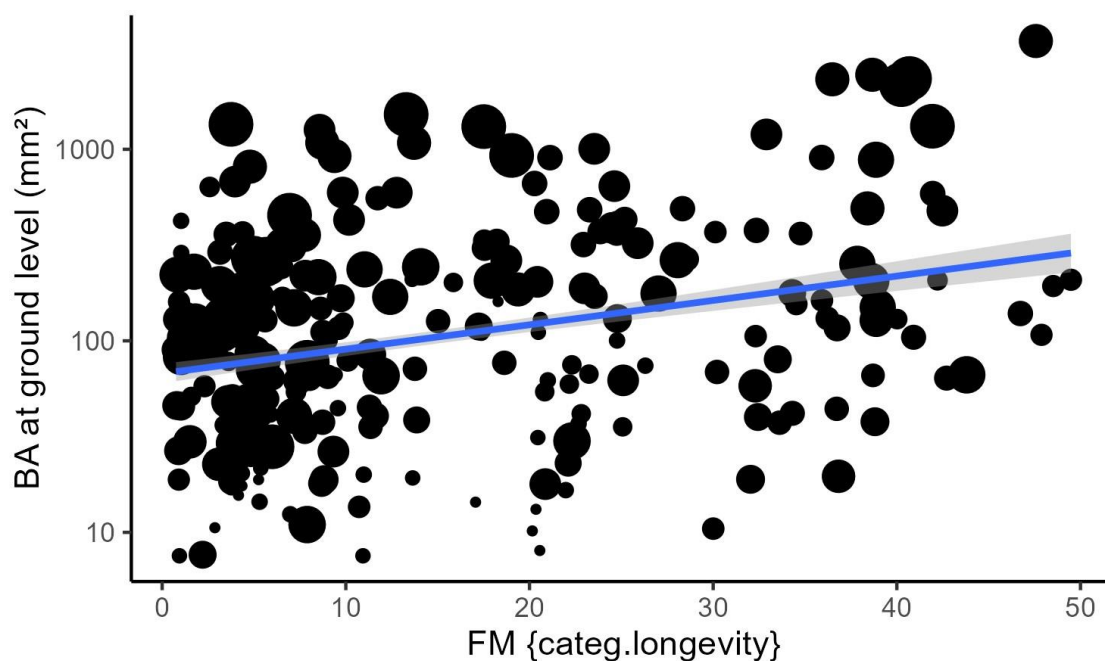


Figura 22. Área basal das espécies longa vida aos 450 dias em função da média funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.

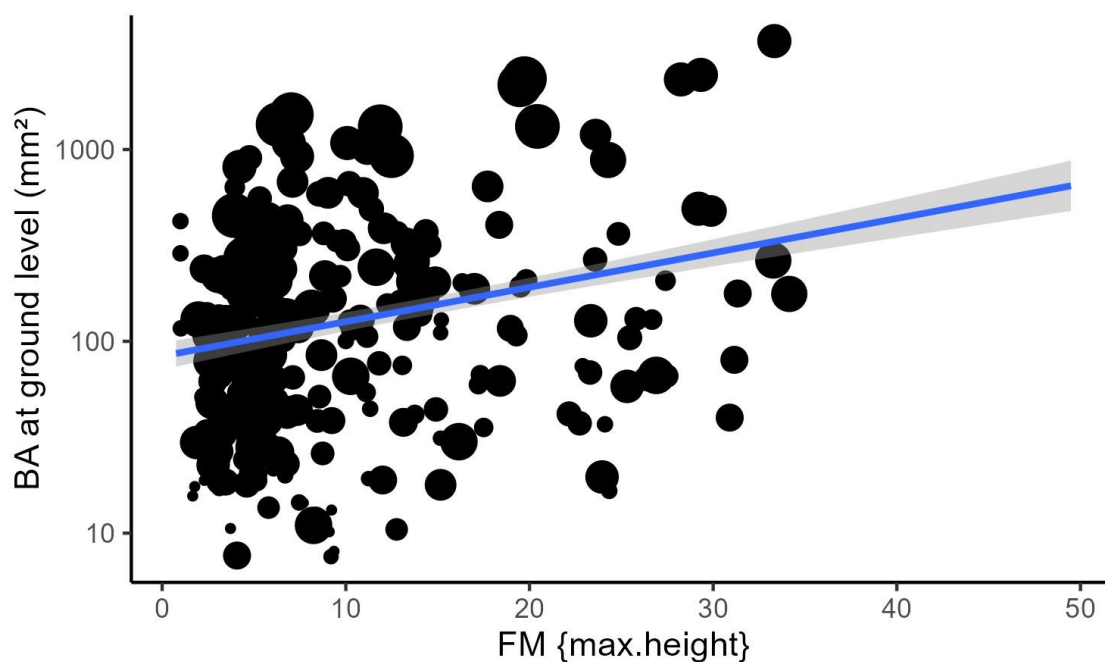


Figura 23. Área basal das espécies longa vida aos 450 dias em função da média funcional (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.

8.2.2 Discussão

O efeito positivo da diversidade funcional no desenvolvimento de espécies de longa vida (Figuras 16, 17, 20 e 21) converge com nossa hipótese inicial. Comunidades mais diversas crescem mais rápido e, portanto, têm maiores áreas basais, o que possivelmente cria condições favoráveis para o crescimento dessas espécies, como sombra e retenção de umidade. Essas evidências apontam para um efeito positivo da complementaridade entre os grupos funcionais cultivados, assim como evidenciado por dos Santos et al (2021) em trabalhos agroflorestais. Além da complementaridade, ao analisar o desenvolvimento de espécies de longa vida, os resultados sugerem também a ocorrência de processos de facilitação, ainda que seja difícil separar esses dois efeitos (Wright et al., 2017).

Em comunidades florestais, os efeitos positivos da complementaridade e da diversidade tendem a aumentar ao longo do tempo (Urigoiti et al., 2022). Considerando que a complementaridade está relacionada à diversidade funcional (Díaz; Cabido, 2001), isso pode explicar por que aos 30 dias, a diversidade funcional não teve efeito sobre as variáveis testadas (modelos não apresentados por não serem significativos) e aos 90 dias, a diversidade funcional apresentou efeito positivo em todas as variáveis

das espécies de longa vida. Esses efeitos ao longo do tempo foram consistentes tanto para a DF da longevidade categórica quanto da altura máxima.

Além disso, é necessário considerar a importância das abundâncias das espécies nesses processos ecológicos e como a estratégia de plantio das espécies influenciou as abundâncias iniciais. Espera-se que nos primeiros dias a abundância das plantas anuais seja pouco representativa porque essas foram plantadas por sementes, o que diminui a diversidade funcional. Com o desenvolvimento das anuais as comunidades se tornam mais diversas (maior DF) e há uma melhor ocupação de nichos (Naeem et al., 1994; Díaz; Cabido, 2001; Lavorel; Garnier, 2002), fazendo com que o efeito da complementaridade passe a ser mais importante para o desenvolvimento das espécies longa vida.

Por outro lado, os efeitos positivos das médias funcionais nas espécies de longa vida (Figuras 18, 19, 22 e 23), que divergem da nossa hipótese inicial, podem indicar um *trade-off* do rápido estabelecimento das plantas anuais e semi-perenes em SAFs. Na medida que elas são importantes para criar condições para processos de facilitação e complementaridade (Urgoiti et al., 2022), explícitos pelo efeito positivo da DF, e produzir biomassa que é chave para impulsionar processos ecológicos (Lohbeck et al., 2015), os modelos indicam um potencial efeito de competição desses grupos com árvores de alto valor ecológico, já que comunidades com maiores MFs favoreceram o desenvolvimento desse grupo (Figuras 18, 19, 22 e 23). Em parte, esse efeito positivo da MF pode ser explicado porque as plantas anuais foram propagadas de sementes, ou seja, consórcios com a presença de anuais (com menores MF) tiveram menor tamanho nos primeiros dias, fazendo com que as espécies de longa vida ficassem expostas ao sol pleno no período de estabelecimento das mudas.

No entanto, o efeito de competição das espécies de rápido crescimento sobre as de longa vida pode ser reforçado ao analisar outras duas variáveis, a densidade de pontos de plantio no núcleo, que tem efeito negativo sobre o desenvolvimento das espécies de longa vida (Figuras 16, 17, 20 e 21), indicando um processo de competição por espaço, e os efeitos dos tratamentos funcionais, onde espécies de longa vida combinadas com semi-perenes (SL e ASPL) tiveram menor taxa de crescimento (Figuras 14 e 15). Esse efeito deve ser especialmente notado nas semi-perenes porque, ao contrário das anuais, elas permanecem ao longo de todo o período avaliado, prolongando o efeito da competição. Essa competição pode ocorrer por luz,

espaço, água e nutrientes (Malézieux et al., 2009) e pode ser resultante da grande diferença de estratégias entre esses grupos de plantas e as de longa vida, sendo as anuais e semi-perenes muito mais aquisitivas, utilizando recursos de forma muito mais rápida (Díaz et al., 2016). Esse efeito pode ser mais relevante no período inicial de SAFs quando a abundância relativa dos grupos de rápido crescimento é grande e, na medida em que as espécies arbóreas se desenvolvem, ocupam o dossel e aumentam sua abundância relativa, o efeito das plantas anuais e semi-perenes tende a ser atenuado (Grime, 1998).

Na prática agroflorestal, esse efeito competitivo das anuais e semi-perenes pode representar um *trade-off* entre produção agrícola de curto prazo e desenvolvimento de espécies de longa vida (Power, 2010). Várias espécies anuais como milho, soja, trigo-mourisco, arroz e feijão (Apêndice A) são importantes componentes da produção de alimentos e geração de renda. Por sua vez, muitas espécies semi-perenes como cana-de-açúcar, guandu, mamona, pafia e rami (Apêndice A) são de grande relevância por suas características como rápido crescimento e capacidade de rebrote, sendo utilizadas para produção de biomassa nesses sistemas (Miccolis et al., 2016; Neto et al., 2016).

Analisando o *trade-off* entre os efeitos positivos da diversidade e o possível efeito de competição das plantas de rápido crescimento, sugere-se que o período do auge de desenvolvimento das espécies anuais (90 dias no experimento) pode ser um ponto chave para o manejo de SAFs para potencializar os efeitos positivos da complementaridade no desenvolvimento das espécies de longa vida. O manejo de poda ou raleio das plantas anuais e semi-perenes nesse período pode diminuir o efeito de competição, manter os efeitos positivos da diversidade e incorporar biomassa ao solo, otimizando o desenvolvimento das espécies arbóreas de alto valor ecológico e econômico (Power, 2010).

8.2.3 Conclusão

Comunidades mais diversas favorecem o desenvolvimento de espécies arbóreas de alto valor ecológico e/ou econômico, resultando em árvores de longa vida maiores aos 450 dias e com crescimento mais rápido.

Comunidades com maior média funcional de longevidade categórica e altura máxima favorecem o desenvolvimento de árvores de longa vida, indicando um

possível efeito de competição nesse grupo das plantas de menor longevidade (anuais e semi-perenes). Esse processo pode ser mais significativo nas semi-perenes, e os tratamentos funcionais que continham esse grupo tiveram menor velocidade de crescimento das espécies de longa vida.

Mesmo com esse *trade-off* entre os efeitos de competição e complementaridade dos grupos de rápido crescimento, os SAFs foram efetivos em facilitar o desenvolvimento inicial de árvores de alto valor ecológico e econômico. Esse *trade-off* pode ser atenuado com manejo, otimizando ainda mais o desenvolvimento dessas espécies. Esse manejo pode ter outras sinergias, já que o material podado pode ser incorporado ao solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes.

Uma outra implicação importante dos resultados é a similaridade entre os efeitos dos índices ecológicos (DF e MF) construídos com a longevidade categórica e o atributo altura máxima. Isso evidencia que os grupos utilizados na prática de sistemas agroflorestais sucessionais possuem relevância para processos ecológicos.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas agroflorestais (SAFs) sucessionais e biodiversos representam uma abordagem integrada e flexível que permite priorizar produzir ou conservar sem prejudicar objetivos não priorizados, reduzindo assim os *trade-offs* amplamente observados nos conflitos pelo uso do solo no Brasil e no mundo. Para tanto, diretrizes e regras de montagem práticas, simples e universais são chaves para multiplicar os sistemas agroflorestais nas áreas degradadas, tanto para acelerar e viabilizar a restauração ecológica ou para conservação através da produção ecológica contínua.

A diversidade funcional baseada na longevidade é um critério promissor na elaboração de regras de montagem práticas, simples e universais para que consórcios agroflorestais acelerem o desenvolvimento inicial de espécies de longa vida com alto valor econômico e/ou ecológico. Os resultados obtidos apontam que planejar SAFS com alta diversidade funcional, baseada em atributos simples, pode ser eficiente para promover a multifuncionalidade, conciliando processos produtivos e de restauração ecológica, principalmente para o desenvolvimento de espécies chaves no ecossistema.

O potencial dos SAFs para conciliar produção e restauração é dependente das pessoas para manejá-los. O manejo contínuo desses sistemas é essencial para potencializar processos ecológicos e para a redução dos *trade-offs* entre as diferentes contribuições da natureza para as pessoas. Portanto, além de acelerar a sucessão e facilitar a restauração, SAFs são ferramentas importantes para incluir as pessoas nesses processos, despertando consciência ecológica e promovendo uma visão positiva das populações rurais sobre a restauração.

O desenho experimental, que utiliza muitas espécies para representar um grupo funcional, permite generalizar os efeitos encontrados e sugerir, de forma ampla, práticas para otimizar processos de restauração através de SAFs. Além disso, os resultados obtidos apontam para a relevância ecológica dos grupos funcionais comumente utilizados por agrofloresteiros, reforçando a capacidade de SAFs sucessionais de conduzir processos ecológicos.

A diversidade necessária para acelerar o estabelecimento e desenvolvimento inicial de SAFs e da restauração ecológica é, no mínimo, a suficiente para ocupar os nichos temporais, otimizando a utilização dos recursos disponíveis ao longo do tempo.

Nesse sentido, os 4 grupos funcionais propostos foram efetivos e podem servir como base geral para o planejamento de SAFs e da restauração.

Ainda, é recomendável que pesquisas futuras aprofundem o olhar sobre a importância dos SAFs como ferramenta de restauração. Nesse sentido, considera-se que são importantes: 1) avaliações prolongadas, que permitam acompanhar o desenvolvimento das espécies de longa vida até a fase reprodutiva; 2) testar outros atributos funcionais e olhares para outros processos ecológicos; 3) medir diretamente os efeitos ecológicos dos manejos das abundâncias, como podas, raleios e plantios de enriquecimento; 4) estudar, ao longo do tempo, os efeitos dos SAFs em outros componentes da biodiversidade, como fauna e microbiota, por exemplo e 5) medir diretamente os impactos sociais e econômicos que SAFs podem gerar em processos de restauração ecológica.

Espera-se que os resultados dessa tese possam aproximar as áreas do saber ecológico e agrônomo, integrando princípios da ecologia funcional às práticas agrárias, permitindo o desenvolvimento de conceitos, ferramentas e técnicas que auxiliem na conservação e uso sustentável da biodiversidade e das funções dos ecossistemas.

REFERÊNCIAS

- ABALOS, D. *et al.* Plant trait-based approaches to improve nitrogen cycling in agroecosystems. **Journal of Applied Ecology**, Blackwell Publishing Ltd, 2019.
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. **Diseños agroecologicos para incrementar la biodiversidad de entomofauna benefica en agroecosistemas**. [S. l.: s. n.], 2010.
- BALMFORD, A.; GREEN, R.; PHALAN, B. Land for food & land for nature? **Daedalus**, [s. l.], v. 144, n. 4, p. 57–75, 2015.
- BALTZER, J. L.; THOMAS, S. C. Determinants of whole-plant light requirements in Bornean rain forest tree saplings. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 95, n. 6, p. 1208–1221, 2007.
- BARRY, K. E. *et al.* The Future of Complementarity: Disentangling Causes from Consequences. **Trends in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 167–180, 2019.
- BAUDRON, F. *et al.* Sparing or sharing land? Views from agricultural scientists. **Biological Conservation**, Elsevier Ltd, 2021.
- BELLO, C. *et al.* Frugivores enhance potential carbon recovery in fragmented landscapes. **Nature Climate Change**, [s. l.], 2024.
- BINOTTO, A. F.; LÚCIO, A. D. C.; LOPES, S. J. Correlations between growth variables and the Dickson quality index in forest seedlings. **Cerne, Lavras**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 457–464, 2010.
- BITENCOURT, A. L. V.; KRAUSPENHAR, P. M. Possible prehistoric anthropogenic effect on. **Revista Brasileira de Paleontologia**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 109–116, 2006.
- BOTOSSO, P. C.; PÓVOA DE MATTOS, P. **Documentos 75 Conhecer a Idade das Árvores: Importância e Aplicação**. [S. l.: s. n.], 2002.
- BOTTA-DUKÁT, Z. Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. **Journal of Vegetation Science**. [S. l.: s. n.], 2005.
- BRASIL. **Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. [S. l.: s. n.], 2012.
- BROOKER, R. W. *et al.* Facilitation in plant communities: The past, the present, and the future. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 96, n. 1, p. 18–34, 2008.
- CADOTTE, M. W. Functional traits explain ecosystem function through opposing mechanisms. **Ecology Letters**, Blackwell Publishing Ltd, 2017.
- CALLAWAY, R. M. **Positive interactions and interdependence in plant communities**. Springer, Nova Iorque, 2007.
- CANNON, P. G. *et al.* Land-sparing agriculture sustains higher levels of avian functional diversity than land sharing. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 25, n. 5, p. 1576–1590, 2019.

- CARDINALE, B. J. *et al.* Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, Nature Publishing Group, 2012.
- CARLUCCI, M. B. *et al.* Functional traits and ecosystem services in ecological restoration. **Restoration Ecology**, Blackwell Publishing Inc., 2020.
- CEBALLOS, G. *et al.* Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. **Environmental Sciences**. Full. [s. l.], n. June, p. 1–5, 2015.
- CLEMENT, C. R. *et al.* Origin and domestication of native Amazonian crops. **Diversity**, [s. n.], 2010-. ISSN 14242818.v. 2
- CLEMENT, C. R. *et al.* The domestication of amazonia before european conquest. **Proceedings B**, Royal Society of London, 2015.
- CLEMENT, C. R.; BORÉM, A.; LOPES, M. T. G. Da Domesticação ao Melhoramento das Plantas. **Domesticação e Melhoramento: Espécies Amazônicas**, [s. l.], p. 11–38, 2009.
- CORADIN, L.; SIMINSKI, A.; REIS, A. **Espécies Nativas da Flora Brasileira de Valor Econômico Atual ou Potencial: Plantas para o Futuro - Região Sul**. [S. l.: s. n.], 2011.
- CORBIN, J. D.; HOLL, K. D. Applied nucleation as a forest restoration strategy. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 265, p. 37–46, 2012.
- CORNELISSEN, J. H. C. *et al.* A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, CSIRO, v. 51, n. 4, p. 335–380, 2003.
- CORNWELL, W. K. *et al.* Functional distinctiveness of major plant lineages. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 102, n. 2, p. 345–356, 2014.
- DAMOUR, G. *et al.* Using Functional Traits to Assess the Services Provided by Cover Plants: A Review of Potentialities in Banana Cropping Systems. **Advances in Agronomy**, [s. l.], v. 134, p. 81–133, 2015.
- DE LIMA, R. A. F. *et al.* The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. **Nature Communications**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2020.
- DE PAULA, R. P. *et al.* Agroforestry systems in the rural landscape in Terra Nova do Norte-MT: Space metrics in aiding environmental conservation policies in family production areas. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 52, p. 175–193, 2019.
- DEBASTIANI, V. J.; PILLAR, V. D. Syncsa-R tool for analysis of metacommunities based on functional traits and phylogeny of the community components. **Bioinformatics**, [s. l.], v. 28, n. 15, p. 2067–2068, 2012.
- DIAMOND, J. **Colapso: Como as sociedades escolhem o fracasso ou o sucesso**. 6. ed. Rio de Janeiro: Record, 2009.
- DIAMOND, J.; BELLWOOD, P. Farmers and their languages: The first expansions. **Science**, [s. l.], v. 300, n. 5619, p. 597–603, 2003.

DÍAZ, S. *et al.* A Rosetta Stone for Nature's Benefits to People. **PLoS Biology**, [s. l.], v. 13, n. 1, 2015a.

DÍAZ, S. *et al.* Assessing nature's contributions to people: Recognizing culture, and diverse sources of knowledge, can improve assessments. **Science**, [s. l.], v. 359, n. 6373, p. 270–272, 2018.

DÍAZ, S. *et al.* Biodiversity loss threatens human well-being. **PLoS Biology**, [s. l.], v. 4, n. 8, p. 1300–1305, 2006. Disponível em: Acesso em: 15 jun. 2022.

DÍAZ, S. *et al.* Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 104, n. 52, p. 20684–20689, 2007.

DÍAZ, S. *et al.* The global spectrum of plant form and function. **Nature**, [s. l.], v. 529, n. 7585, p. 167–171, 2016.

DÍAZ, S. *et al.* The IPBES Conceptual Framework - connecting nature and people. **Science Direct**, Elsevier, 2015b.

DÍAZ, S.; CABIDO, M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. **Trends in Ecology & Evolution**. [S. l.: s. n.], 2001. Disponível em: <http://tree.trends.com0169>.

DONAZZOLO, J. *et al.* On farm management of *Acacia sellowiana* (Myrtaceae) as a strategy for conservation of species genetic diversity. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 259, n. August 2019, p. 108826, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108826>.

DOS SANTOS, D. *et al.* Crop functional diversity drives multiple ecosystem functions during early agroforestry succession. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 58, n. 8, p. 1718–1727, 2021.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos (Rio de Janeiro, RJ), 2006.

FALSTER, D. S.; DUURSMA, R. A.; FITZJOHN, R. G. How functional traits influence plant growth and shade tolerance across the life cycle. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 115, n. 29, p. E6789–E6798, 2018.

FAO. **Agroforestry for landscape restoration**. [S. l.]: FAO, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/fa7b6a1e-f781-4a9e-9da0-7cf02366c6f5>.

FILGUEIRAS, B. K. C. *et al.* Winner–Loser Species Replacements in Human-Modified Landscapes. **Trends in Ecology & Evolution**, Elsevier Ltd, 2021.

FILHO, A. F. *et al.* Crescimento e idade de espécies nativas regenerantes sob plantio de *Araucaria angustifolia* no Paraná. **Floresta e Ambiente**, [s. l.], v. 24, 2017.

FINEGAN, B. Pattern and process in neotropical secondary rain forests: The first 100 years of succession. **Trends in Ecology & Evolution**, Elsevier Ltd, 1996.

FINNEY, D. M.; KAYE, J. P. Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 54, n. 2, p. 509–517, 2017.

FOLEY, J. A. *et al.* Solutions for a cultivated planet. **Nature**, [s. l.], v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011.

FORNARA, D. A.; TILMAN, D. Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 96, n. 2, p. 314–322, 2008.

GABA, S. *et al.* Agroecological weed control using a functional approach: A review of cropping systems diversity. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 103–119, 2014.

GARNIER, E.; NAVAS, M. L. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: Concepts, methods and applications for agroecology. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Springer, 2012. ISSN 17740746.v. 32

GIBSON, L. *et al.* Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. **Nature**, [s. l.], v. 478, n. 7369, p. 378–381, 2011.

GÓMEZ-APARICIO, L. *et al.* Applying plant facilitation to forest restoration: A meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. **Ecological Applications**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1128–1138, 2004.

GÓMEZ-RUIZ, P. A.; LINDIG-CISNEROS, R.; VARGAS-RÍOS, O. Facilitation among plants: A strategy for the ecological restoration of the high-andean forest (Bogotá, D.C. Colombia). **Ecological Engineering**, [s. l.], v. 57, p. 267–275, 2013.

GRACE, J.; TILMAN, D. **Perspectives on Plant Competition**. [S. l.]: Elsevier, 1990.

GRASS, I. *et al.* Land-sharing/-sparing connectivity landscapes for ecosystem services and biodiversity conservation. **People and Nature**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 262–272, 2019.

GRIME, P. J. Benefits of plant diversity to ecosystems: immediate, filter and founder effects. **Journal of Ecology**, [s. l.], p. 902–910, 1998.

HARLAN, J. R. **Crops & Man**. [S. l.: s. n.], 1992.

HAUTIER, Y. *et al.* Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity. **Science**, American Association for the Advancement of Science, 2015.

HECTOR, A.; BAGCHI, R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. **Nature**, [s. l.], v. 448, n. 7150, p. 188–190, 2007.

HIMMELSTEIN, J. *et al.* A meta-analysis of intercropping in Africa: impacts on crop yield, farmer income, and integrated pest management effects. **International Journal of Agricultural Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 1–10, 2017.

HOLL, K. D. *et al.* Applied nucleation facilitates tropical forest recovery: Lessons learned from a 15-year study. **Journal of Applied Ecology**, Blackwell Publishing Ltd, 2020.

HOLMGREN, M.; SCHEFFER, M.; HUSTON, M. A. The interplay of facilitation and competition in plant communities. **Ecology**, [s. l.], v. 78, n. 7, p. 1966–1975, 1997.

HUNTER, A. F.; AARSSSEN, L. W. Plants Helping Plants New evidence indicates that beneficence is important in vegetation. **Aarssen Source: BioScience**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 34–40, 1988.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. [S. l.: s. n.], 2012.

ISBELL, F. *et al.* Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales. **Nature**, Nature Publishing Group, 2017.

JACKSON, L. *et al.* **Agrobiodiversity**: a new science agenda for biodiversity in support of sustainable agroecosystems. FAO, 2005.

JAKOVAC, C. C. *et al.* The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for the restoration of tropical forests. **Biological Reviews**, [s. l.], v. 96, n. 4, p. 1114–1134, 2021.

KATTGE, J. *et al.* TRY - a global database of plant traits. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 17, n. 9, p. 2905–2935, 2011.

LALIBERTÉ, E.; LEGENDRE, P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits. **Ecology**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: <http://www.ecolag.univ-montp2.fr/softwarei>.

LAVOREL, S; GARNIER, E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. **Functional Ecology**. [S. l.: s. n.], 2002.

LEVIS, C. *et al.* How people domesticated Amazonian forests. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 5, n. JAN, 2018.

LEVIS, C. *et al.* Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. **Science**, [s. l.], v. 355, n. 6328, p. 925–931, 2017. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aal0157>.

LI, L. *et al.* Planting accelerates restoration of tropical forest but assembly mechanisms appear insensitive to initial composition. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 55, n. 2, p. 986–996, 2018.

LI, C. *et al.* Syndromes of production in intercropping impact yield gains. **Nature Plants**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 653–660, 2020.

LIENARD, J.; FLORESCU, I.; STRIGUL, N. An appraisal of the classic forest succession paradigm with the shade tolerance index. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 10, n. 2, 2015.

LOHBECK, M. *et al.* Biomass is the main driver of changes in ecosystem process rates during tropical forest succession. **Ecology**, ESA, 2015.

LOREAU, M. MINI-REVIEW Biodiversity and ecosystem functioning: recent theoretical advances. **Oikos**, [s. l.], 2000.

LOREAU, M.; HECTOR, A. Partitioning selection and. **Nature**, [s. l.], v. 412, n. July, p. 72–76, 2001.

MAEZUMI, S. Y. *et al.* The legacy of 4,500 years of polyculture agroforestry in the eastern Amazon. **Nature Plants**, Palgrave Macmillan Ltd., 2018.

MALÉZIEUX, E. *et al.* Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [S. l.: s. n.], 2009.

MARTÍNEZ-GARZA, C.; BONGERS, F.; POORTER, L. Are functional traits good predictors of species performance in restoration plantings in tropical abandoned pastures? **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 303, p. 35–45, 2013.

MARTÍNEZ-GARZA, C.; HOWE, H. F. Restoring tropical diversity: Beating the time tax on species loss. **Journal of Applied Ecology**, [S. l.: s. n.], 2003.

MARTINS, E. M. *et al.* O uso de sistemas agroflorestais diversificados na restauração florestal na Mata Atlântica. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 632, 2019.

MARTINS, T. P.; RANIERI, V. E. L. Sistemas agroflorestais como alternativa para as reservas legais. **Ambiente e Sociedade**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 79–96, 2014.

MAY, P. Herman.; TROVATTO, C. M. Moreira.; DEITENBACH, Armin. **Manual agroflorestal para a Mata Atlântica**. [S. l.]: Ministerio do Desenvolvimento Agrario, 2008.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. [S. l.: s. n.], 2010.

MCMICHAEL, C. H. *et al.* Comment on “persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition”. **Science**, [s. l.], v. 358, n. 6361, p. 925–931, 2017.

MICCOLIS, A. *et al.* **Restauração ecológica com Sistemas Agroflorestais**. [S. l.: s. n.], 2016.

MICCOLIS, A. *et al.* Restoration Through Agroforestry: options for reconciling livelihoods with conservation in the cerrado and caatinga biomes in Brazil. **Experimental Agriculture**, [s. l.], v. 55, n. S1, p. 208–225, 2019.

MOKANY, K.; ASH, J.; ROXBURGH, S. Functional identity is more important than diversity in influencing ecosystem processes in a temperate native grassland. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 96, n. 5, p. 884–893, 2008.

MORI, A. S.; FURUKAWA, T.; SASAKI, T. Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change. **Biological Reviews**, [s. l.], v. 88, n. 2, p. 349–364, 2013.

NAEEM, S. *et al.* Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems. **Nature**, [s. l.], p. 734–737, 1994.

NAIR, P. K. R. **An introduction to agroforestry**. [S. l.]: Kluwer Academic Publishers in cooperation with International Centre for Research in Agroforestry, 1993.

NETO, N E C *et al.* **Agroflorestando o mundo de facção a trator**. [S. l.: s. n.], 2016.

NODARI, R. O.; GUERRA, M. P. A agroecologia: Estratégias de pesquisa e valores. **Estudos Avancados**, [s. l.], v. 29, n. 83, p. 183–207, 2015.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N. *et al.* New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 167–234, 2013.

PILLAR, V. D. *et al.* Functional redundancy and stability in plant communities. **Journal of Vegetation Science**, [s. l.], v. 24, n. 5, p. 963–974, 2013.

POORTER, L. *et al.* Successional theories. **Biological Reviews**, [s. l.], v. 98, n. 6, p. 2049–2077, 2023.

POWER, A. G. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, Royal Society, 2010.

PUMARIÑO, L. *et al.* Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. **Basic and Applied Ecology**, Elsevier GmbH, 2015.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

RAO, R. Diversity and Dissimilarity. **Theoretical population biology**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 24–43, 1982.

REICH, P. B. The world-wide “fast-slow” plant economics spectrum: A traits manifesto. **Journal of Ecology**, [s. l.], v. 102, n. 2, p. 275–301, 2014.

RICOTTA, C.; MORETTI, M. CWM and Rao’s quadratic diversity: a unified framework for functional ecology. **Oecologia**, [s. l.], v. 167, n. 1, p. 181–188, 2011.

ROOSEVELT, A. C. The Amazon and the Anthropocene: 13,000 years of human influence in a tropical rainforest. **Anthropocene**, [s. l.], v. 4, p. 69–87, 2013.

ROSA-SCHLEICH, J. *et al.* Ecological-economic trade-offs of Diversified Farming Systems – A review. **Ecological Economics**, Elsevier B.V., 2019.

ROSENFELD, M. F.; MÜLLER, S. C. Plant Traits Rather than Species Richness Explain Ecological Processes in Subtropical Forests. **Ecosystems**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 52–66, 2020.

SAIS, A. C.; OLIVEIRA, R. E. de. Distribuição de Sistemas Agroflorestais no Estado De São Paulo: apontamentos para restauração florestal e produção sustentável. **Redes**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 111, 2018.

SEDREZ DOS REIS, M.; LADIO, A.; PERONI, N. Landscapes with Araucaria in South America: Evidence for a cultural dimension. **Ecology and Society**, [s. l.], v. 19, n. 2, 2014.

SER. Society for Ecological Restoration (SER) International. **Princípios da SER International sobre a restauração ecológica**, [s. l.], p. 15, 2004.

SIDDIQUE, I.; DIONÍSIO, A. C.; SIMÕES-RAMOS, G. A. **Construindo conhecimentos sobre Agroflorestas em Rede**. [S. l.: s. n.], 2017.

SIMINSKI, A. *et al.* Dynamics of Natural Regeneration: Implications for Landscape Restoration in the Atlantic Forest, Brazil. **Frontiers in Forests and Global Change**, [s. l.], v. 4, 2021.

SOUZA, K. *et al.* Partição de nicho por grupos funcionais de espécies arbóreas em uma floresta subtropical. **Rodriguesia**, [s. l.], v. 68, n. 4, p. 1165–1175, 2017.

TILMAN, D. *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, [s. l.], v. 418, n. August, p. 671–677, 2002.

TILMAN, D. *et al.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [s. l.], v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011.

TOBNER, C. M. *et al.* Advancing biodiversity-ecosystem functioning science using high-density tree-based experiments over functional diversity gradients. **Oecologia**, [s. l.], v. 174, n. 3, p. 609–621, 2014.

TOBNER, C. M. *et al.* Functional identity is the main driver of diversity effects in young tree communities. **Ecology Letters**, Blackwell Publishing Ltd, 2016.

TSCHARNTKE, T. *et al.* Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - A review. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 619–629, 2011.

URGOITI, J. *et al.* No complementarity no gain: net diversity effects on tree productivity occur once complementarity emerges during early stand development. **Ecology Letters**, John Wiley and Sons Inc, 2022.

VALENTE, J. J. *et al.* Land-sparing and land-sharing provide complementary benefits for conserving avian biodiversity in coffee-growing landscapes. **Biological Conservation**, [s. l.], v. 270, 2022.

VANDERMEER, J. H. **The Ecology of Intercropping**. [S. l.]: Cambridge University Press, 1989.

VIEIRA, D. L. M.; HOLL, K. D.; PENEIREIRO, F. M. Agro-successional restoration as a strategy to facilitate tropical forest recovery. **Restoration Ecology**, [S. l.: s. n.], 2009.

VIOLLE, C. *et al.* Let the concept of trait be functional! **Oikos**, [s. l.], v. 116, n. 5, p. 882–892, 2007.

VISSER, M. D. *et al.* Functional traits as predictors of vital rates across the life cycle of tropical trees. **Functional Ecology**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 168–180, 2016.

WALKER, B. H. *et al.* Biodiversity and Ecological Redundancy Biodiversity and Ecological Redundancy. **Conservation Biology**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 18–23, 2016.

WALTERS, M. B.; REICH, P. B. Are Shade Tolerance, Survival, and Growth Linked? Low Light and Nitrogen Effects on Hardwood Seedlings. **Ecology**, ESA, 1996.

WFO. **WFO (2023): World Flora Online**. [S. l.], 2023.

WIERSUM, K. F. From natural forest to tree crops, co-domestication of forests and tree species, an overview. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 425–438, 1997.

WIGLEY, B. J. *et al.* A handbook for the standardised sampling of plant functional traits in disturbance-prone ecosystems, with a focus on open ecosystems. **Australian Journal of Botany**, CSIRO, 2020.

WOOD, S. A. *et al.* Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services. **Trends in Ecology and Evolution**, Elsevier Ltd, 2015.

WRIGHT, A. J. *et al.* The Overlooked Role of Facilitation in Biodiversity Experiments. **Trends in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 383–390, 2017.

ZHU, S. G. *et al.* Plant facilitation shifts along with soil moisture and phosphorus gradients via rhizosphere interaction in the maize-grass pea intercropping system. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 139, 2022.

ZOMER, R. J. *et al.* **A. Trees on farms: an update and reanalysis of agroforestry's global extent and socio-ecological characteristics**. [S. l.: s. n.], 2014.

ZUUR, A. F. *et al.* **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. Springer, New York, 2009.

ZUUR, A. F.; IENO, E. N.; ELPHICK, C. S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. **Methods in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 3–14, 2010.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela A 1. Distribuição das espécies, grupos funcionais por composição no experimento. Nome comum e nome científico (entre parênteses).

TETRA-CULTIVOS	ANUAL (<1a)	SEMI-PERENE (<3a)	PIONEIRA (>3a)	LONGA VIDA (>20a)
T 1	Abóbora (<i>Cucurbita moschata</i>)	Baga-de-veado (<i>Solanum corymbiflorum</i>)	Vime (<i>Salix viminalis</i>)	Angico (<i>Parapiptadenia rigida</i>)
T 2	Amendoim (<i>Arachis hypogaea</i>)	Chaya (<i>Cnidioscolus aconitifolius</i>)	Aroeira-pimenteira (<i>Schinus terebinthifolia</i>)	Canjerana (<i>Cabralea canjerana</i>)
T 3	Arroz arbóreo (<i>Oryza sativa</i>)	Taia (<i>Xanthoshoma sagittifolium</i>)	Bracatinga (<i>Mimosa scabrella</i>)	Cambucá (<i>Plinia edulis</i>)
T 4	Crotalária (<i>Crotalaria juncea</i>)	Cana-de-açúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	Grandiúva (<i>Trema micrantha</i>)	Caxeta (<i>Chrysophyllum viride</i>)
T 5	Crotalária (<i>Crotalaria breviflora</i>)	Yacon (<i>Smallanthus sonchifolius</i>)	Vassourinha (<i>Baccharis semiserrata</i>)	Canela-fogo (<i>Cryptocarya aschersoniana</i>)
T 6	Melancia (<i>Citrullus lanatus</i>)	Lulo (<i>Solanum quitoense</i>)	Figatil (<i>Gymnanthemum amygdalinum</i>)	Louro-pardo (<i>Cordia trichotoma</i>)
T 7	Crotalária (<i>Crotalaria ochroleuca</i>)	Mandioca (<i>Manihot esculenta</i>)	Ingá-feijão (<i>Inga marginata</i>)	Cabriúva (<i>Myrocarpus frondosus</i>)
T 8	Crotalária (<i>Crotalaria spectabilis</i>)	Boldo-de-jardim (<i>Plectranthus barbatus</i>)	Capororoca (<i>Myrsine coriacea</i>)	Peróba (<i>Aspidosperma olivaceum</i>)

TETRA-CULTIVOS	ANUAL (<1a)	SEMI-PERENE (<3a)	PIONEIRA (>3a)	LONGA VIDA (>20a)
T 9	Chia (<i>Salvia hispanica</i>)	Manjericão (<i>Ocimum basilicum</i>)	Dedaleiro (<i>Lafoensia pacari</i>)	Ipê-do-brejo (<i>Handroanthus umbellatus</i>)
T 10	Cravo-de-defunto miúdo (<i>Tagetes minuta</i>)	Fisalis (<i>Physalis angulata</i>)	Bananeira (<i>Musa paradisiaca</i>)	Sassafrás (<i>Ocotea odorifera</i>)
T 11	Malva-crista (<i>Anoda cristata</i>)	Muricato (<i>Solanum muricatum</i>)	Urucum (<i>Bixa orellana</i>)	Goiaba-serrana (<i>Feijoa sellowiana</i>)
T 12	Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Cidreirão (<i>Lippia alba</i>)	Bergamota (<i>Citrus reticulata</i>)	Tarumã (<i>Vitex megapotamica</i>)
T 13	Feijão-de-porco (<i>Canavalia ensiformis</i>)	Cidreira (<i>Cymbopogon citratus</i>)	Nascedero (<i>Trichanthera gigantea</i>)	Palmito (<i>Euterpe edulis</i>)
T 14	Girassol (<i>Helianthus annuus</i>)	Açafrão-da-terra (<i>Curcuma longa</i>)	Capororocão (<i>Myrsine umbellata</i>)	Erva-mate (<i>Ilex paraguariensis</i>)
T 15	Quiabo (<i>Abelmoschus esculentus</i>)	Lírio-do-brejo (<i>Hedychium coronarium</i>)	Ingá-anão (<i>Inga vulpina</i>)	Piquia (<i>Aspidosperma tomentosum</i>)
T 16	Batata-doce (<i>Ipomoea batatas</i>)	Cheiro-de-anis (<i>Ocimum carnosum</i>)	Mulungu (<i>Erythrina speciosa</i>)	Araçá-do-mato (<i>Eugenia supraaxilaris</i>)
T 17	Milheto (<i>Cenchrus americanus</i>)	Zedoária (<i>Curmuma zedoaria</i>)	Leucena (<i>Leucaena leucocephala</i>)	Uvaia (<i>Eugenia pyriformis</i>)
T 18	Milho (<i>Zea mays</i>)	Pfafia (<i>Pfaffia glomerata</i>)	Bracatinga de Campo-Mourão (<i>Mimosa flocculosa</i>)	Cereja-do-RS (<i>Eugenia involucrata</i>)

TETRA-CULTIVOS	ANUAL (<1a)	SEMI-PERENE (<3a)	PIONEIRA (>3a)	LONGA VIDA (>20a)
T 19	Pimenta-jalapeño (<i>Capsicum annuum</i>)	Topinambo (<i>Helianthus tuberosus</i>)	Pata-de-vaca (<i>Bauhinia forficata</i>)	Cedro (<i>Cedrela fissilis</i>)
T 20	Sesbânia (<i>Sesbania cannabina</i>)	Couve-de-folhas (<i>Brassica oleracea</i>)	Cabeiro (<i>Tabernaemontana catharinensis</i>)	Guamirim (<i>Eugenia tenuipedunculata</i>)
T 21	Soja (<i>Glycine max</i>)	Ararutão (<i>Canna indica</i>)	Tucaneira (<i>Citharexylum myrianthum</i>)	Cocoloba (<i>Coccoloba warmingii</i>)
T 22	Cravo-de-defunto-gigante (<i>Tagetes erecta</i>)	Mamona (<i>Ricinus communis</i>)	Ora-pro-nóbis (<i>Pereskia aculeata</i>)	Araucária (<i>Araucaria angustifolia</i>)
T 23	Teosinto (<i>Zea mays</i> subsp. <i>mexicana.</i>)	Rami (<i>Boehmeria nivea</i>)	Timbaúva (<i>Enterolobium contortisiliquum</i>)	Pitanga (<i>Eugenia uniflora</i>)
T 24	Tomate-rasteiro (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Sacha (<i>Tephrosia purpurea</i>)	Ora-pro-nóbis (<i>Pereskia grandifolia</i>)	Cortiça (<i>Annona emarginata</i>)
T 25	Trigo-mourisco (<i>Fagopyrum esculentum</i>)	Guandu (<i>Cajanus cajan</i>)	Sabugueiro (<i>Sambucus australis</i>)	Gabiroba-crespa (<i>Campomanesia reitziana</i>)

APÊNDICE B

Tabela B 1. Espécies de plantas utilizadas, seu grupo e atributos funcionais

Nome científico	Grupo funcional	Longevidade categórica (anos)	Altura máxima (m)
<i>Abelmoschus esculentus</i> (L.) Moench	anual	0,5	4
<i>Annona emarginata</i> (Schltdl.) H.Rainer	longa vida	50	15
<i>Anoda cristata</i> (L.) Schltdl.	anual	0,5	1
<i>Arachis hypogaea</i> L.	anual	0,5	0,8
<i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze	longa vida	50	50
<i>Aspidosperma olivaceum</i> Müll.Arg.	longa vida	50	30
<i>Aspidosperma tomentosum</i> Mart. & Zucc.	longa vida	50	20
<i>Baccharis semiserrata</i> DC.	pioneira	20	5
<i>Bauhinia forficata</i> Link	pioneira	20	20
<i>Bixa orellana</i> L.	pioneira	20	15
<i>Boehmeria nivea</i> (L.) Gaudich.	semiperene	3	2
<i>Brassica oleracea</i> L.	semiperene	3	1,5
<i>Cabralea canjerana</i> (Vell.) Mart.	longa vida	50	35
<i>Cajanus cajan</i> (L.) Huth	semiperene	3	3
<i>Campomanesia reitziana</i> D.Legrand	longa vida	50	10
<i>Canavalia ensiformis</i> (L.) DC.	anual	0,5	2
<i>Canna indica</i> L.	semiperene	3	5
<i>Capsicum annuum</i> L.	anual	0,5	1
<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	longa vida	50	35
<i>Cenchrus americanus</i> (L.) Morrone	anual	0,5	3
<i>Chrysophyllum viride</i> Mart. & Eichler	longa vida	50	30
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	pioneira	20	25
<i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.) Matsum. & Nakai	anual	0,5	3
<i>Citrus reticulata</i> Blanco	pioneira	20	8
<i>Cnidocolus aconitifolius</i> (Mill.) I.M.Johnst.	semiperene	3	8
<i>Coccoloba warmingii</i> Meisn.	longa vida	50	15
<i>Copaifera trapezifolia</i> Hayne	longa vida	50	35
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	longa vida	50	35
<i>Crotalaria breviflora</i> DC.	anual	0,5	1,5

Nome científico	Grupo funcional	Longevidade categórica (anos)	Altura máxima (m)
<i>Crotalaria juncea</i> L.	anual	0,5	3
<i>Crotalaria ochroleuca</i> G. Don	anual	0,5	2,25
<i>Crotalaria spectabilis</i> Röth	anual	0,5	2
<i>Cryptocarya aschersoniana</i> Mez	longa vida	50	30
<i>Cucurbita moschata</i> Duchesne	anual	0,5	5
<i>Curcuma longa</i> L.	semiperene	3	1,5
<i>Curcuma zedoaria</i> (Christm.) Roscoe	semiperene	3	1,5
<i>Cymbopogon citratus</i> (DC.) Stapf	semiperene	3	2
<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	pioneira	20	40
<i>Erythrina speciosa</i> Andrews	pioneira	20	15
<i>Eugenia involucrata</i> DC.	longa vida	50	20
<i>Eugenia multicostata</i> D.Legrand	longa vida	50	25
<i>Eugenia pyriformis</i> Cambess.	longa vida	50	15
<i>Eugenia supraaxillaris</i> Spring	longa vida	50	25
<i>Eugenia tenuipedunculata</i> Kiaersk.	longa vida	50	16
<i>Eugenia uniflora</i> L.	longa vida	50	15
<i>Euterpe edulis</i> Mart.	longa vida	50	20
<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench	anual	0,5	0,9
<i>Feijoa sellowiana</i> (O.Berg) O.Berg	longa vida	50	10
<i>Garcinia gardneriana</i> (Planch. & Triana) Zappi	longa vida	50	15
<i>Garcinia humilis</i> (Vahl) C.D.Adams	longa vida	50	10
<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	anual	0,5	2
<i>Gymnanthemum amygdalinum</i> (Delile) Sch.Bip. ex Walp.	pioneira	20	8
<i>Handroanthus umbellatus</i> (Sond.) Mattos	longa vida	50	20
<i>Hedychium coronarium</i> J.Koenig	semiperene	3	3
<i>Helianthus annuus</i> L.	anual	0,5	3
<i>Helianthus tuberosus</i> L.	semiperene	3	3
<i>Ilex paraguariensis</i> A.St.-Hil.	longa vida	50	30
<i>Inga marginata</i> Willd.	pioneira	20	28
<i>Inga vulpina</i> Mart. ex Benth.	pioneira	20	5
<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.	anual	0,5	4

Nome científico	Grupo funcional	Longevidade categórica (anos)	Altura máxima (m)
<i>Lafoensia pacari</i> A.St.-Hil.	pioneira	20	25
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	pioneira	20	10
<i>Lippia alba</i> (Mill.) N.E.Br. ex Britton & P.Wilson	semiperene	3	2
<i>Manihot esculenta</i> Crantz	semiperene	3	5
<i>Mimosa flocculosa</i> Burkart	pioneira	20	10
<i>Mimosa scabrella</i> Benth.	pioneira	20	29
<i>Morus nigra</i> L.	pioneira	20	10
<i>Musa paradisiaca</i> L.	pioneira	20	9
<i>Myrocarpus frondosus</i> Allemão	longa vida	50	35
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	pioneira	20	15
<i>Myrsine umbellata</i> Mart.	pioneira	20	20
<i>Ocimum basilicum</i> L.	semiperene	3	0,8
<i>Ocimum carnosum</i> (Spreng.) Link & Otto ex Benth.	semiperene	3	1
<i>Ocotea odorifera</i> (Vell.) Rohwer	longa vida	50	28
<i>Ocotea porosa</i> (Nees & Mart.) Barroso	longa vida	50	30
<i>Oryza sativa</i> L.	anual	0,5	1,5
<i>Parapiptadenia rigida</i> (Benth.) Brenan	longa vida	50	35
<i>Pereskia aculeata</i> Mill.	pioneira	20	10
<i>Pereskia grandifolia</i> Haw.	pioneira	20	10
<i>Pfaffia glomerata</i> (Spreng.) Pedersen	semiperene	3	3
<i>Phaseolus vulgaris</i> L.	anual	0,5	5
<i>Physalis angulata</i> L.	semiperene	3	1
<i>Plectranthus barbatus</i> Andr.	semiperene	3	3
<i>Plinia edulis</i> (Vell.) Sobral	longa vida	50	20
<i>Ricinus communis</i> L.	semiperene	3	5
<i>Saccharum officinarum</i> L.	semiperene	3	6
<i>Salix viminalis</i> L.	pioneira	20	15
<i>Salvia hispanica</i> L.	anual	0,5	1
<i>Sambucus australis</i> Cham. & Schltld.	pioneira	20	10
<i>Schinus terebinthifolia</i> Raddi	pioneira	20	15
<i>Sesbania cannabina</i> (Retz.) Pers.	anual	0,5	3,5

Nome científico	Grupo funcional	Longevidade categórica (anos)	Altura máxima (m)
<i>Smallanthus sonchifolius</i> (Poepp.) H.Rob.	semiperene	3	3
<i>Solanum corymbiflorum</i> (Sendtn.) Bohs	semiperene	3	3
<i>Solanum lycopersicum</i> L.	anual	0,5	4
<i>Solanum muricatum</i> Aiton	semiperene	3	1
<i>Solanum quitoense</i> Lam.	semiperene	3	3
<i>Tabernaemontana catharinensis</i> A.DC.	pioneira	20	10
<i>Tagetes erecta</i> L.	anual	0,5	1,2
<i>Tagetes minuta</i> L.	anual	0,5	2,5
<i>Tephrosia purpurea</i> (L.) Pers.	semiperene	3	1
<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	pioneira	20	15
<i>Trichanthera gigantea</i> (Humb. & Bonpl.) Nees	pioneira	20	17
<i>Vitex megapotamica</i> (Spreng.) Moldenke	longa vida	50	25
<i>Xanthosoma sagittifolium</i> (L.) Schott	semiperene	3	2,5
<i>Zea mays</i> L.	anual	0,5	5
<i>Zea mays</i> subsp. mexicana (Schrad.) Iltis	anual	0,5	3

APÊNDICE C. Índice de tamanho da comunidade e modelos com índice de tamanho como variável resposta

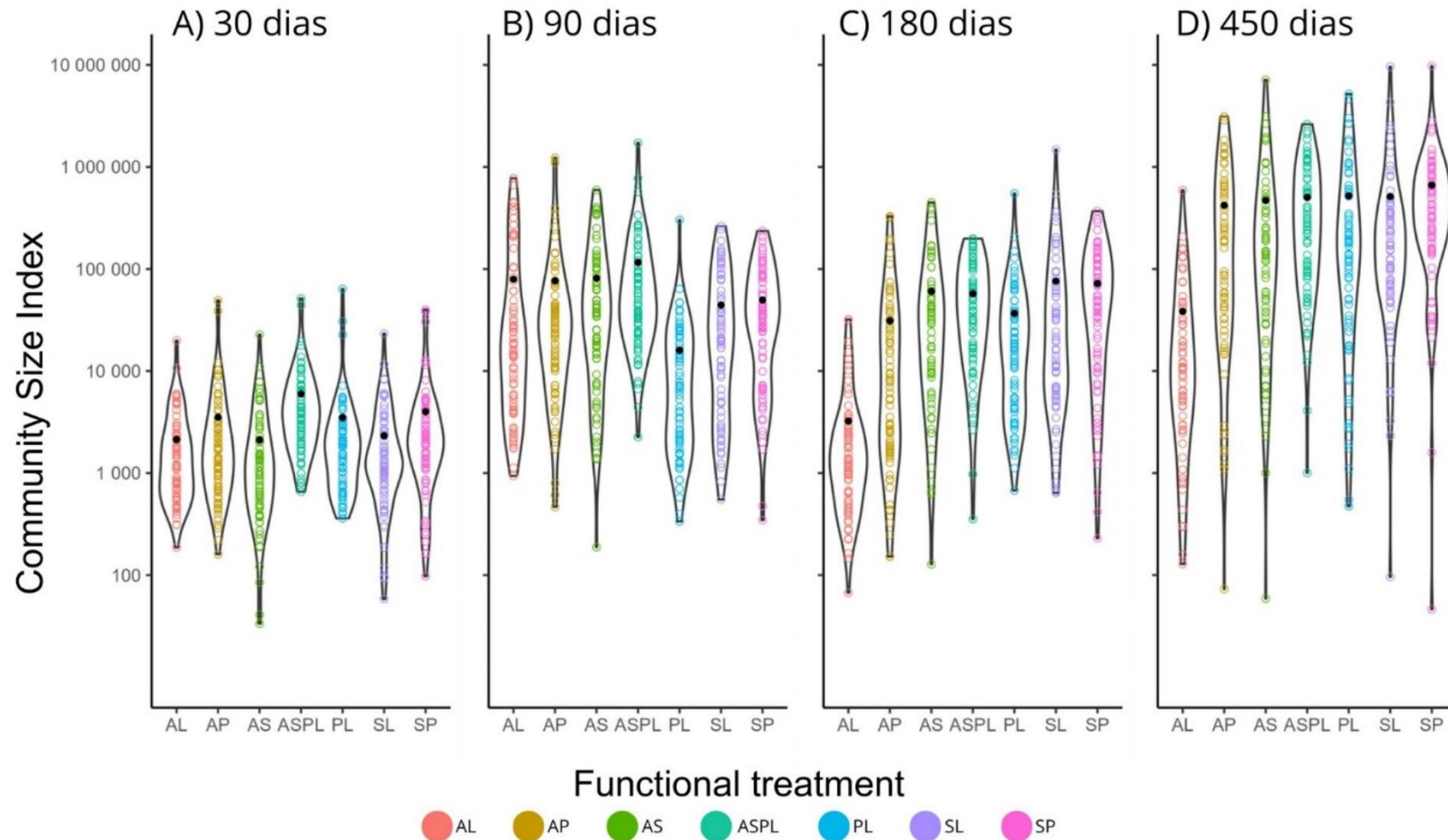


Figura C1. Índice de tamanho da comunidade no núcleo por tratamento funcional aos 30 dias (A), aos 90 dias (B), aos 180 dias (C) e, aos 450 dias (D). O ponto preto representa o valor médio em cada tratamento funcional.

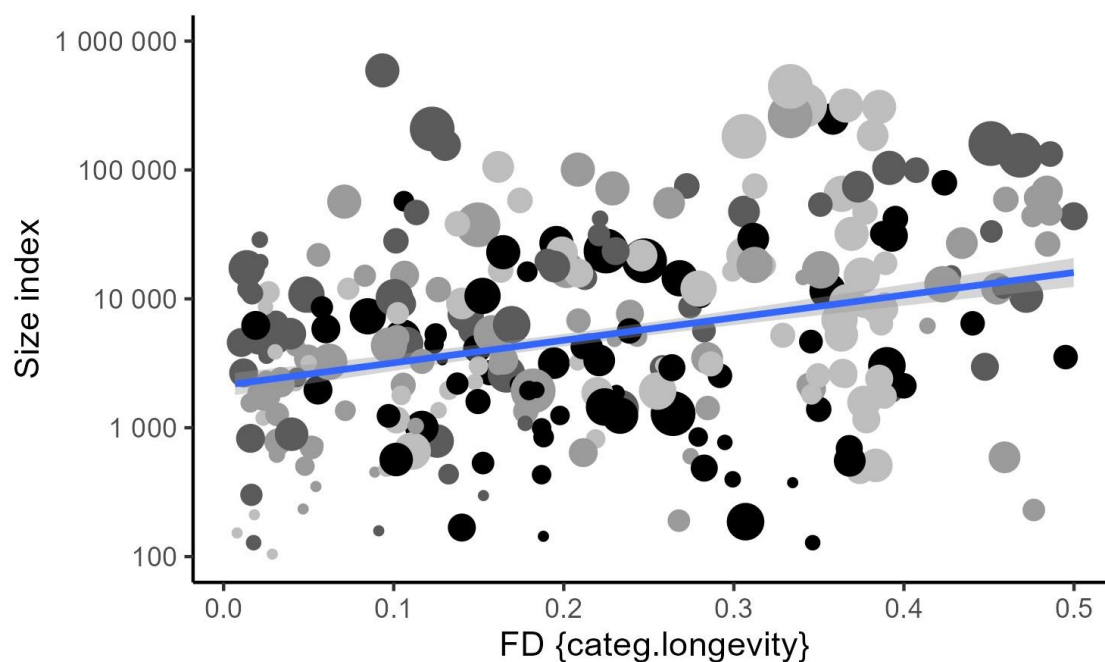


Figura C2. Índice de tamanho das espécies longa vida aos 450 dias em função da diversidade funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.

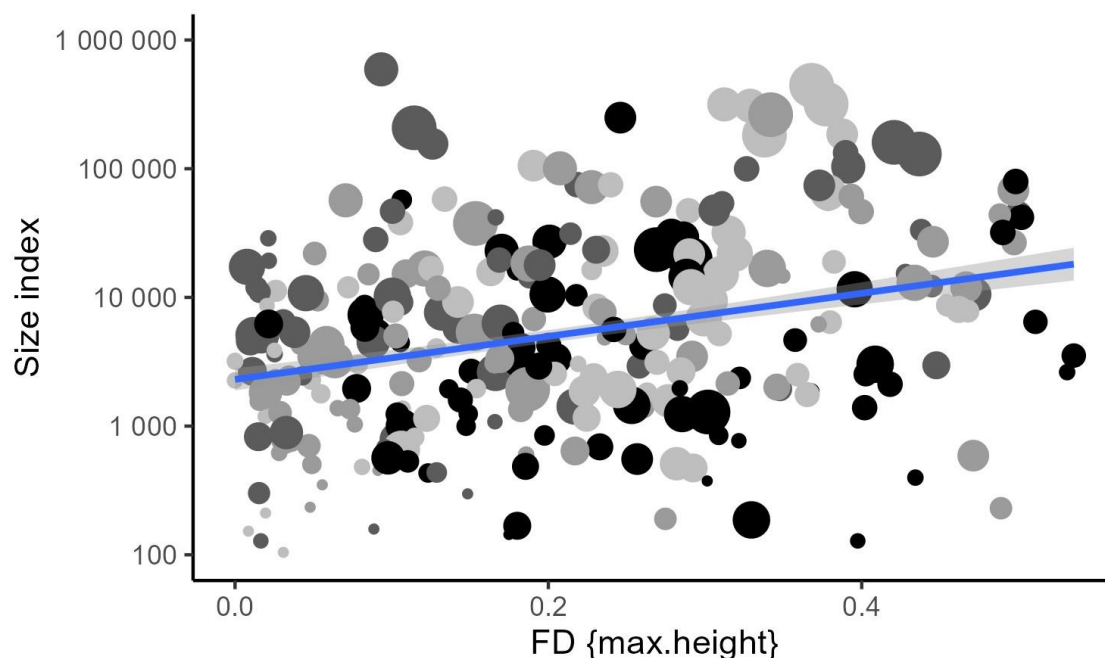


Figura C3. Índice de tamanho das espécies longa vida aos 450 dias em função da diversidade funcional (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada e o gradiente cinza ao preto representa a densidade de pontos de plantio dos tratamentos funcionais no núcleo.

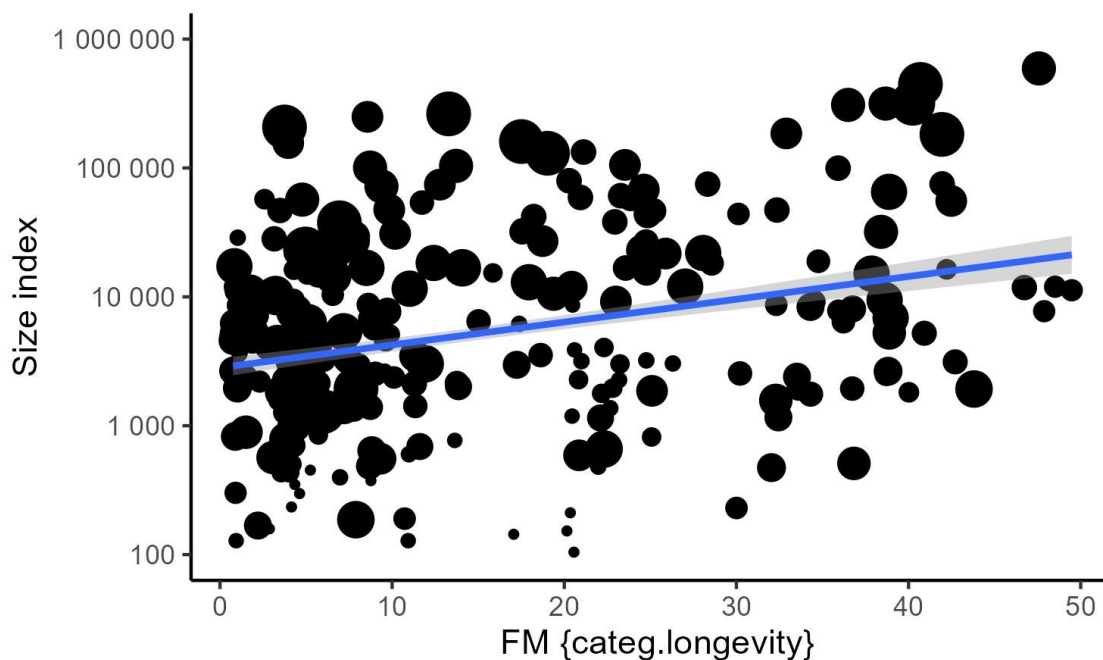


Figura C4. Índice de tamanho das espécies longa vida aos 450 dias em função da média funcional (longevidade categórica). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.

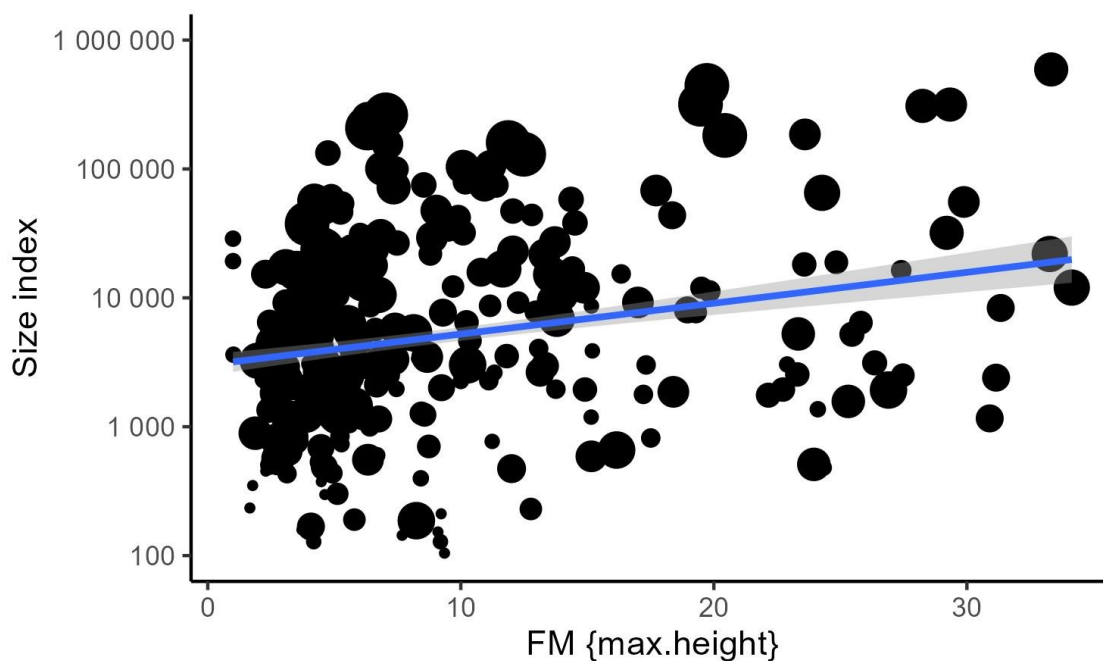


Figura C5. Índice de tamanho das espécies longa vida aos 450 dias em função da média funcional (altura máxima). O tamanho dos pontos representa a massa do propágulo da espécie longa vida plantada.