

Seropédica, RJ / Dezembro, 2024

Procedimentos metodológicos recomendados para a análise integrada entre atributos específicos e filtros ambientais na restauração de ecossistemas

Luiz Fernando Duarte de Moraes⁽¹⁾, Fabiano de Carvalho Balieiro⁽²⁾, Elaine Cristina Cardoso Fidalgo⁽³⁾, Guilherme Kangussu Donagemma⁽⁴⁾, Ariani Dario dos Santos⁽⁵⁾, Davi Barboza Brum Ferreira⁽⁶⁾, Clarissa Carvalho Santana⁽⁷⁾, Sergio Miana de Faria⁽⁸⁾, Eduardo Francia Carneiro Campello⁽⁹⁾

⁽¹⁾Embrapa Agrobiologia, BR 465, km 7, Seropédica/RJ, CEP 23891-000. E-mail: luiz.moraes@embrapa.br. ⁽²⁾Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, Rio de Janeiro/RJ, CEP 22460-000. E-mail: fabiano.balieiro@embrapa.br. ⁽³⁾Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, Rio de Janeiro/RJ, CEP 22460-000. E-mail: elaine.fidalgo@embrapa.br. ⁽⁴⁾Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico, 1024, Rio de Janeiro/RJ, CEP 22460-000. E-mail: guilherme.donagemma@embrapa.br. ⁽⁵⁾UFRRJ, BR 465, km 7, Seropédica/RJ, CEP 23891-000. E-mail: arianidario99@gmail.com.

⁽⁶⁾UFRRJ, BR 465, km 7, Seropédica/RJ, CEP 23891-000. E-mail: davibrum1801@gmail.com. ⁽⁷⁾UFRRJ, BR 465, km 7, Seropédica/RJ, CEP 23891-000. E-mail: clarissacarvalho70@ufrj.br. ⁽⁸⁾Embrapa Agrobiologia, BR 465, km 7, Seropédica/RJ, CEP 23891-000. E-mail: sergio.defaria@embrapa.br. ⁽⁹⁾Embrapa Agrobiologia, BR 465, km 7, Seropédica/RJ, CEP 23891-000. E-mail: eduardo.campello@embrapa.br.

Introdução

A restauração ecológica, definida como um processo de auxiliar a recuperação de um ecossistema que foi alterado, degradado ou destruído (Gann *et al.*, 2019), é reconhecida pela sua relevância em construir soluções baseadas na natureza para os temas globais associados às três convenções mais importantes da Rio-92: a da Conservação da Biodiversidade, a do Combate à Desertificação e a voltada para as Mudanças Climáticas. Devido a essa magnitude, os processos de restauração de ecossistemas naturais demandam um sólido arcabouço conceitual.

As bases conceituais para a restauração ecológica são reunidas em um campo da ciência denominado Ecologia da Restauração, que subsidia um processo científico de desenvolvimento de teorias para guiar a restauração (Palmer *et al.*, 2006). Apesar da restauração ecológica apresentar essa relevância em nível global, há ainda muita incerteza sobre o sucesso das ações adotadas para a formação de comunidades florestais pela restauração. Estudos são necessários para ampliar a compreensão sobre quais os fatores que podem afetar os esforços de restauração, principalmente os associados a como, onde e quando a restauração é executada (Brudvig *et al.*, 2017).



Fotos: Luiz Fernando Duarte de Moraes

Figura 1. Área preparada para plantio de espécies arbóreas nativas visando à restauração florestal na Mata Atlântica - Silva Jardim, 1999 - e plantio de espécies arbóreas nativas com um ano de idade, para a restauração da Mata Atlântica - Silva Jardim, 2000.

Importantes referências conceituais para guiar a restauração de ecossistemas naturais encontram-se nas regras para formação de comunidades (Temperton; Hobbs, 2006). Do ponto de vista funcional da formação das comunidades, duas linhas teóricas complementares são principalmente utilizadas: a da limitação de similaridade funcional e a da atuação de filtros ambientais (MacArthur; Levins, 1967). Enquanto a primeira prediz que as espécies dentro de uma comunidade devem ser distintas nas suas características funcionais como resultado da competição (divergência), a segunda espera uma alta similaridade funcional entre espécies coexistentes (convergência), uma vez que elas são “filtradas” por condições ambientais semelhantes.

O conhecimento sobre a diversidade funcional pode assim oferecer uma ideia da proporção de divergência e convergência na estruturação das comunidades, enquanto a composição funcional pode indicar a direção das respostas funcionais pelas espécies (ou pela comunidade) aos filtros ambientais (Lebrija-Tejos *et al.*, 2010; Frangipani, 2016). Em plantios de restauração, em que os objetivos iniciais são a sobrevivência e o estabelecimento das mudas de árvores plantadas, a convergência funcional tem maior importância.

Atributos funcionais têm sido assim sugeridos para explicar o desempenho das espécies nas comunidades naturais. Propostos e considerados atributos funcionais são as características morfológicas, fisiológicas e fenológicas que afetam a adaptabilidade das plantas ao ambiente, por contribuírem para o seu crescimento, reprodução e sobrevivência (Violle *et al.*, 2007). Como exemplo, características (atributos) das espécies foram positiva e significativamente correlacionadas com as taxas médias de sobrevivência das espécies ao longo da sucessão ecológica em comunidades naturais (Lasky *et al.*, 2014).

O conhecimento gerado por estudos com ecologia funcional em comunidades naturais pode oferecer subsídios importantes para a restauração de ecossistemas. O plantio de espécies florestais nativas de diferentes grupos ecológicos é a técnica mais utilizada na restauração do bioma Mata Atlântica (Brançalion *et al.*, 2016), e tem na sucessão ecológica a principal referência para o desenvolvimento de modelos de plantio. Para melhorar o desempenho de espécies florestais nativas utilizadas nesses modelos, a seleção de espécies por seus atributos funcionais informa quais as restrições ambientais que elas podem superar, possibilitando ampliar a compreensão de seu papel na restauração de áreas degradadas (Merchant *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a seleção de espécies para a restauração ecológica deve considerar, além da ocorrência local registrada em levantamentos florísticos, características funcionais que favoreçam sua adaptação à área a ser restaurada (Peters *et al.*, 2016). A aplicação de teorias de filtros ambientais no desenvolvimento de modelos de plantios de restauração pode sugerir como determinadas combinações de espécies nativas atingem respostas desejáveis no nível de comunidade (Lebrija-Tejos *et al.*, 2010; Laughlin *et al.*, 2017).

Atributos funcionais de espécies vegetais têm sido crescentemente usados no desenvolvimento de modelos para prever como comunidades ecológicas responderão a distúrbios abióticos e bióticos, e como as espécies afetam as funções e os serviços ecossistêmicos em um mundo em constantes mudanças (Laughlin, 2014; Reich, 2014; Funk *et al.*, 2017). Os atributos são classificados assim em atributos-resposta (que possibilitam a resposta das espécies a filtros ambientais e às interações bióticas) e atributos de efeito, que afetam as funções do ecossistema (Laughlin, 2014). Embora não haja uma distinção muito clara entre os atributos resposta e os atributos de efeito, a separação conceitual entre ambos é útil para a definição de estratégias e metas na restauração (Funk *et al.*, 2008). No que diz respeito à boa sobrevivência e desenvolvimento das espécies usadas em ações de restauração, os atributos resposta merecem maior atenção, pois descrevem características emergentes da sua interação com o ambiente, permitindo maior ou menor probabilidade de transpor determinado filtro ambiental.

Com base nessas reflexões, estratégias de restauração baseadas em atributos têm merecido crescente atenção, mas lacunas de conhecimento na compreensão de como os atributos funcionais podem contribuir com a provisão de serviços ecossistêmicos dificultam a operacionalização dessa abordagem (Streit; Bellwood, 2022; Carlucci *et al.*, 2020). Para estimular o uso dos atributos funcionais nos estudos ecológicos e na restauração ecológica é preciso, antes de tudo, entender qual o papel dos atributos no ambiente em que as plantas se desenvolvem (Streit; Bellwood, 2022).

Um primeiro passo para a definição de estratégias efetivas de restauração, entretanto, é a identificação dos filtros (ou gargalos) que dificultam a recuperação do ecossistema. Filtros abióticos, como baixa fertilidade e alta compactação do solo, e bióticos, como a competição com invasoras e a ausência de propágulos, podem atuar como barreiras para a restauração ecológica que devem ser superadas.

Uma meta de longo prazo em ações de conservação é justamente entender como os fatores biológicos e ambientais afetam a sucessão florestal, e esse desafio se estende à restauração de ecossistemas. Quando testada, a análise integrada de filtros ambientais e atributos específicos funcionais possibilita a proposição de um esquema que associa a composição de espécies com a distribuição dos atributos na comunidade e a estrutura da floresta. Os padrões de dispersão dos atributos nesse caso são consistentes com as hipóteses de filtros abióticos e/ou da hierarquia competitiva (Buzzard *et al.*, 2016).

Assim, prever resultados de ações de restauração ecológica requer uma compreensão da variabilidade natural das propriedades dos ecossistemas, que pode ser medida a partir dos atributos funcionais das espécies (Laughlin *et al.*, 2017). Para a validação desses modelos são essenciais a experimentação e a análise quantitativa de dados estruturados de comunidades, fatores e variáveis medidas diretamente ou através de seus efeitos.

A análise integrada com o uso de ferramentas de modelagem pode explicar como alterações nos valores dos atributos resultantes de variações ambientais são traduzidas em performance do organismo, e como essas mudanças podem influenciar processos em níveis organizacionais mais altos. A modelagem da composição de espécies a partir de atributos funcionais das espécies pode assim proporcionar maneiras de prever as comunidades futuras e avaliar o funcionamento do ecossistema.

Ferramentas de modelagem já foram utilizadas em abordagem sistêmica, comparando a composição funcional de áreas restauradas com a do ecossistema referência (Rosenfield; Müller, 2017). Análises de modelagem podem indicar quais atributos funcionais são mais determinantes na superação de restrições ambientais durante o processo de restauração de áreas degradadas.

A modelagem por equações estruturais (SEM, do Inglês *Structural Equation Modeling*), por exemplo, é frequentemente utilizada em estudos ecológicos por investigar redes e interações complexas (Grace *et al.*, 2010). A SEM é uma ferramenta metodológica robusta, baseada na análise de caminhos, que permite avaliar as complexas interações entre variáveis e entender as relações de causalidade entre os componentes de um sistema (Wright, 1968; Johnson *et al.*, 1991). A análise de caminhos traz a possibilidade de identificar, pela magnitude e significância nas relações entre as variáveis, quais atributos funcionais respondem melhor aos filtros ambientais na formação de ecossistemas florestais (Poorter *et al.*, 2017).

O presente documento tem como objetivo recomendar procedimentos metodológicos de amostragem de características ambientais e atributos de espécies arbóreas em plantios de restauração florestal, a fim de viabilizar a análise integrada dessas variáveis. A ferramenta estatística adotada para a análise de caminhos é a Modelagem por Equações Estruturais (SEM).

As recomendações neste documento, de caráter conceitual, se baseiam em análises integradas que estão sendo realizadas em 15 plantios de restauração florestal localizados na Mata Atlântica do Rio de Janeiro. Em cada um desses plantios foi feita a caracterização ambiental e a amostragem das cinco espécies arbóreas nativas que apresentaram os melhores resultados de sobrevivência e estabelecimento, para a análise de suas características funcionais.

A seguir, é apresentado o detalhamento dos princípios e das técnicas que embasaram a escolha das ferramentas de amostragem recomendadas com o objetivo de orientar a coleta dos dados para a análise integrada.

Recomendação de procedimentos metodológicos para amostragem das características ambientais e atributos funcionais na restauração florestal

Considerando a influência do meio biofísico no crescimento das espécies florestais, fica evidente que os atributos funcionais dessas comunidades atuam como mediadores das variações microclimáticas e de solo, ajustando os padrões de sobrevivência e aquisição de recursos, adquirindo ou alternando tais atributos no longo prazo (Boukili; Chazdon, 2017). No contexto da restauração florestal, a análise integrada entre as características ambientais e os atributos das espécies plantadas pode indicar quais variáveis ambientais locais ou da paisagem modulam o crescimento das espécies plantadas e o respectivo acúmulo de biomassa acima do solo.

A análise integrada entre os atributos funcionais das espécies e as características (ou filtros) ambientais pressupõe a adoção de ferramentas estatísticas que analisem as correlações entre os dois tipos de características. Conforme comentado anteriormente, a Modelagem por Equações Estruturais (SEM) possibilita avaliar correlações entre variáveis independentes e a variável resposta pela análise de caminhos, buscando estabelecer relações de

causalidade entre as variáveis independentes e os seus efeitos sobre a variável resposta, verificando a significância e magnitude dessas relações. As variáveis a serem usadas na SEM devem ser contínuas (quantitativas – ex.: teor de matéria seca foliar), e não categóricas (qualitativas – ex.: potencial de fixação biológica de N atmosférico).

Estimativa da biomassa aérea acumulada nos plantios

A biomassa acima do solo (aérea) de comunidades em restauração, definida como variável resposta para a análise de caminhos deve ser calculada a partir dos dados de altura e diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores amostradas. Posteriormente à definição do chamado critério de inclusão (recomenda-se incluir na amostragem dos indivíduos arbóreos os que apresentarem o DAP igual ou maior que 5 cm), o inventário deve compreender a medição da altura total e, com o uso de uma fita diamétrica, a circunferência à altura do peito (CAP) das plantas selecionadas. Os valores de CAP vão possibilitar o cálculo do DAP ($DAP = CAP \cdot \pi^{-1}$). Com os dados de altura e DAP sugere-se adotar a equação alométrica proposta por Zanini *et al.* (2022), abaixo, para áreas em restauração, que possibilita estimar a biomassa aérea em cada plantio.

$$\text{Biomassa arbórea (kg)} = 8,9857 + 0,0035 \times DAP^2 \times H$$

(Zanini *et al.*, 2022)

Onde:

DAP = diâmetro à altura do peito, em centímetros

H = altura, em metros.

Identificação e avaliação de atributos funcionais de espécies florestais em plantios de restauração florestal

Os atributos funcionais recomendados neste documento (Tabela 1), a partir de consultas à literatura e a especialistas, incluem as relações entre os teores de carbono e nitrogênio (C:N) e entre os teores de nitrogênio e fósforo (N:P) nas folhas, a área foliar, a área foliar específica, o teor de matéria seca das folhas, a frequência estomática e a abertura dos estômatos. Esses atributos funcionais oferecem uma visão abrangente das características das espécies arbóreas, permitindo uma compreensão de como elas se adaptam ao ambiente e interagem com os fatores abióticos. Os papéis funcionais identificados para cada atributo funcional selecionado para as análises de caminhos estão listados na Tabela 1.

O protocolo de amostragem, coleta e armazenamento para os procedimentos de medição é definido

Tabela 1. Lista de atributos funcionais de espécies de árvores nativas relevantes para a formação da comunidade florestal em processo de restauração ecológica.

Atributo medido	Papel Funcional
Altura média das mudas	Competividade pela luz
Relações C:N e N:P foliar	Fixação do N; decomponibilidade do material orgânico; status micorrízico
Área foliar, cm ²	Captura de recurso (luz); atividade fotossintética; estratégia de competição
Área foliar específica, cm ² .g ⁻¹	Defesa (herbivoria) e captura de recurso (luz, água)
Teor de matéria seca da folha, %	Defesa (danos mecânicos e herbivoria); tolerância ao estresse hídrico
Densidade da madeira, g cm ⁻³	Defesa; estrutural e transporte
Frequência estomática, n.mm ⁻²	Resistência a estresse hídrico e crescimento: transporte e uso de água; assimilação de C
Abertura dos estômatos, μm	Resistência a estresse hídrico e crescimento: transporte e uso de água; assimilação de C

por Pérez-Harguindeguy *et al.* (2013). Para análises dos atributos foliares sugere-se selecionar pelo menos cinco espécies por plantio e coletar amostras de cinco indivíduos por espécie. Recomenda-se a coleta de seis amostras (folhas) por indivíduo; devem ser escolhidas folhas relativamente jovens de plantas adultas, expostas ao sol ou as que recebam mais sol, sem sintomas de ataque de patógenos ou de herbivoria. Deve-se coletar seções inteiras de galhos com as folhas ainda presas, que só devem ser removidas para o processamento.

O armazenamento das folhas segue duas recomendações. A primeira aplica-se quando o procedimento em laboratório for realizado no mesmo dia da coleta ou no dia seguinte. Nesses casos, utilizam-se folhas de papel toalha umedecidas e enroladas na base do ramo. O galho é armazenado em um saco plástico preto com um pouco de água para manter a umidade. A segunda recomendação é para quando o procedimento em laboratório for realizado após o dia seguinte ao da coleta, situação em que algumas folhas necessitam de reidratação (Figura 2A), como ocorre com espécies de leguminosas de folhas compostas. A medição da área foliar pode ser



Figura 2. Exemplos de processamento do material vegetal amostrado para definição dos atributos funcionais: (A) Amostras de folhas no processo de reidratação; e (B) Amostras de galhos processados para determinação da densidade da madeira.

realizada com um medidor de área foliar, sendo o modelo LI-3000C bastante difundido. A determinação da massa seca foliar também segue o protocolo de Pérez-Harguindeguy *et al.* (2013).

Para o cálculo da densidade da madeira o ramo coletado deve ser armazenado dentro de um saco plástico com zíper contendo um pouco de água; esses sacos plásticos são então armazenados dentro de uma geladeira (Figura 2B). Posteriormente, a densidade da madeira é determinada pelo método de deslocamento de água, com a imersão das amostras em pote plástico com graduação de volume.

Caracterização da paisagem das áreas de plantio de espécies nativas para a restauração florestal

Estudos têm fornecido evidências de que os filtros ambientais associados à paisagem e aos fatores específicos do local onde se desenvolve a comunidade florestal (no caso da restauração florestal, os plantios) são importantes na estruturação dessas comunidades e na distribuição dos atributos funcionais (Boukili; Chazdon, 2017). A avaliação dos fatores abióticos selecionados para a análise integrada com os atributos funcionais das espécies plantadas na restauração deve ter início com a caracterização da paisagem, que inclui preferencialmente a declividade da área, a descrição e o histórico do uso do solo (Tabela 2), a distância do plantio com o fragmento florestal mais próximo e a cobertura vegetal do entorno do plantio, com foco na cobertura

total (ha) e percentual de florestas (Tabela 3), conforme os exemplos ilustrativos nas Tabelas 2 e 3 sobre a sistematização dessas informações. O cálculo da área coberta por florestas no entorno dos plantios pode adotar diferentes valores de raios a partir do centro dos plantios, como 100, 250, 500 e 1000 m. A Figura 3 mostra exemplos de plantios localizados em paisagens com diferentes proporções de cobertura florestal, o que pode resultar em efeitos distintos sobre condições microclimáticas que afetam os plantios.

A caracterização e o histórico do uso do solo são realizados de forma descritiva, com o objetivo de subsidiar a interpretação dos resultados. A caracterização está fortemente relacionada ao histórico do uso do solo, e proporciona uma visão sobre a condição inicial de degradação no momento do planejamento e da implementação da restauração. Essas são informações categóricas, não utilizadas na modelagem (SEM), que demanda dados contínuos. Os dados sobre a face da vertente (quando aplicável) dos plantios também se encaixam nessa categoria. Já os dados de declividade, coletados com o auxílio de um clinômetro, podem ser utilizados na SEM.

Para os cálculos da distância do plantio ao fragmento florestal mais próximo e de área coberta por floresta no entorno do plantio são utilizados aplicativos de mapeamento e análise avançada de imagens. Um exemplo são as imagens Maxar/Vivid, GE01; 0,46m. Vivid é uma camada de imagem global de alta resolução e alta precisão, atualizada anualmente para incorporar coleções de imagens mais recentes.

Tabela 2. Exemplo de sistematização de informações de caracterização de fatores abióticos associados à paisagem nas áreas de plantios de espécies arbóreas para a restauração florestal.

Ponto	latitude	longitude	altitude (m)	Declividade (graus)	face da vertente (graus)	face da vertente (orientação)	data de plantio	uso do solo anterior ao plantio	uso do solo no entorno próximo ao plantio	classe de solo
2	-22,4999641	-43,477397	459	33,5	150	SE	2016	pasto abandonado	mesmo plantio e a 15 m, na parte baixa, no final da encosta, há bambuf	Cambissolo Háplico
4	-22,63609	-44,508007	550	35	110	E	2017	pasto abandonado	mesmo plantio circundado por pasto e pequenas áreas com espécies arbóreas	Latossolo Vermelho Amarelo
5	-22,508216	-44,47072	444	27,5	265	W	2017	pastagem	mesmo plantio circundado por pasto	Latossolo Vermelho Amarelo
6	-22,509318	-44,468931	430	9,3	313	W	2017	pastagem	mesmo plantio circundado por pasto	Latossolo Vermelho Amarelo
7	-22,480135	-42,8127	61	15	37	NE	2018	pastagem	vegetação em regeneração, pastagem e cultivo de aipim	Cambissolo ou Argissolo (com afloramentos rochosos)
8	-22,440227	-42,809425	91	plano	---	---	2018 ou 2019	pastagem	vegetação em regeneração e pastagem	Cambissolo de baixada até Neossolo Flúvico (em local mais próximo ao rio)

Tabela 3. Sistematização de informações de caracterização de fatores abióticos associados à paisagem nas áreas de plantios de espécies arbóreas para a restauração florestal.

Identificação da área de plantio	distância do fragmento mais próximo (m)	área do fragmento mais próximo (ha)	área (ha) de floresta no entorno de 500m de raio	área (ha) de floresta no entorno de 250m de raio	% de floresta no entorno de 500m de raio	% de floresta no entorno de 250m de raio
Reserva Ecológica Guapiaçu (REGUA) – Cachoeiras de Macacu	115,70	306240,40	34,38	4,14	43,77	21,08
Colônia de Férias dos Marítimos - Miguel Pereira	0,00	52,06	46,80	18,45	59,59	93,97
Estação Ecológica de Guaxindiba – São Francisco do Itabapoana	0,00	1131,69	40,32	11,52	51,34	58,67
Parque Mico Leão Dourado (Baixada) – Silva Jardim	0,00	4902,43	65,43	17,55	83,31	89,38
Parque Mico Leão Dourado (Encosta) – Silva Jardim	73,45	3402,47	45,72	12,96	58,21	66,00



Figura 3. Exemplos de paisagens em que estão inseridos plantios de espécies arbóreas nativas para a restauração das áreas degradadas. Na Figura (A) observa plantio (ponto em azul) próximo à área com grande cobertura florestal; na Figura (B), plantios (pontos em azul) em áreas onde a matriz predominante é a pastagem.

Amostragem de solo

Na caracterização ambiental nas áreas de plantios de restauração é fundamental identificar os atributos do solo que podem influenciar direta ou indiretamente os atributos funcionais das espécies plantadas e a performance da restauração. Dentre eles, citam-se características da fertilidade do solo (por exemplo, teor de matéria orgânica, P disponível e Al trocável) e a densidade do solo (medida indiretamente pela resistência a penetração).

Para a amostragem de solo das áreas de plantio deve-se definir inicialmente qual a profundidade do solo a ser analisada. Por tratar-se de solos sob florestas, sugere-se que o solo seja amostrado nos primeiros 40 cm a partir da superfície, com a confecção de amostras compostas para as camadas de 0-20 cm e 20-40 cm de profundidade. Para uma área de um hectare, adotada para amostrar cada plantio de árvores nativas, a amostra composta teve origem em dez (10) amostras simples coletadas de forma aleatória ou sistemática (esta última, apenas em caso de plantios em linhas), de forma a representar toda a área útil (área central do fragmento/plantio ou área estabelecida para a avaliação das espécies arbóreas e seus atributos funcionais). Todas as amostras devem ser secas ao ar e peneiradas (<2mm), para então seguirem para o laboratório.

Em laboratório, sugere-se que as amostras de terra sejam caracterizadas quanto ao pH (em água), teores de Ca, Mg e Al trocáveis (em solução de KCl 1 mol L⁻¹) e, para K, P trocáveis (Mehlich⁻¹, H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹). Os teores de H+Al (em solução de acetato de cálcio, 0,5 mol L⁻¹, ajustada a pH 7,1) são usados nos cálculos da saturação por bases. Os teores de areia fina e grossa, silte e argila são determinados pelo método da pipeta.

Como recomendação, os métodos, químicos e físicos devem seguir o Manual de Métodos de Análise de Solos da Embrapa (Viana *et al.*, 2017).

Paralelamente à amostragem de solo para fins de fertilidade, é importante realizar a avaliação da resistência à penetração como indicador físico da presença de camadas adensadas e compactadas nas áreas e parcelas amostradas, utilizando preferencialmente um penetrógrafo. Na Figura 4 observa-se a espacialização de registros de resistência à penetração coletados pelo penetrógrafo. Para interpretação dos resultados é preciso avaliar o teor de umidade dos pontos de amostragem ao longo do perfil amostrado. A determinação do teor de umidade no solo é feita pelo método gravimétrico (Viana *et al.* 2017).

A lista de características (filtros) ambientais que se sugere adotar, e sua esperada influência sobre a comunidade vegetal, é apresentada na Tabela 4.

Como correlacionar atributos funcionais e filtros ambientais: um exercício

Com o objetivo de ilustrar a aplicação da SEM, na Figura 5 está exemplificada uma análise de caminhos hipotética, que relaciona características ambientais (disponibilidade hídrica e insolação) e atributos funcionais (área foliar específica, relação N:P foliar e frequência estomática), como variáveis independentes (latentes), e a biomassa aérea da comunidade em restauração como variável resposta (observada), representando o desempenho do plantio de restauração (crescimento das mudas plantadas).

Fonte: Autores

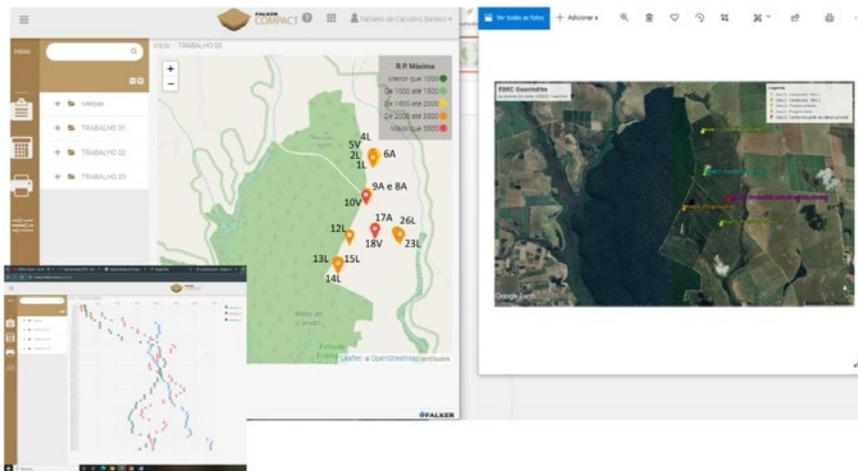


Figura 4. Exemplo de registros espacializados (foto aérea à direita na imagem) da resistência a penetração utilizando um penetrógrafo.

Tabela 4. Lista de filtros ambientais sugeridos para áreas em processo de restauração e sua relação ou influência sobre as plantas.

Categoria	Filtro da paisagem	Influência sobre espécies e comunidades
Relevo	Declividade	Alterações do regime hídrico do solo; assimilação de C por alterações em estômatos (densidade, tamanho)
	Face da vertente (insolação)	Intensidade da radiação; captação de luz e assimilação de C
Uso e Cobertura	Distância do fragmento mais próximo	Microclima; polinizadores; controle de pragas e doenças; complementariedade ou facilitação por espécies regenerante
	% Cobertura vegetal do entorno do plantio	Microclima; polinizadores; controle de pragas e doenças; complementariedade ou facilitação por espécies regenerantes
Solo	Teor de P	Status micorrízicos; Taxa de FBN; Crescimento; competitividade; decomponibilidade
	Densidade/resistência à penetração e anel simples Profundidade/grau de hidromorfismo	Adaptação ao estresse hídrico; Suporte físico
Clima	Balanco hídrico	Grau de esclerofilia; Fenologia

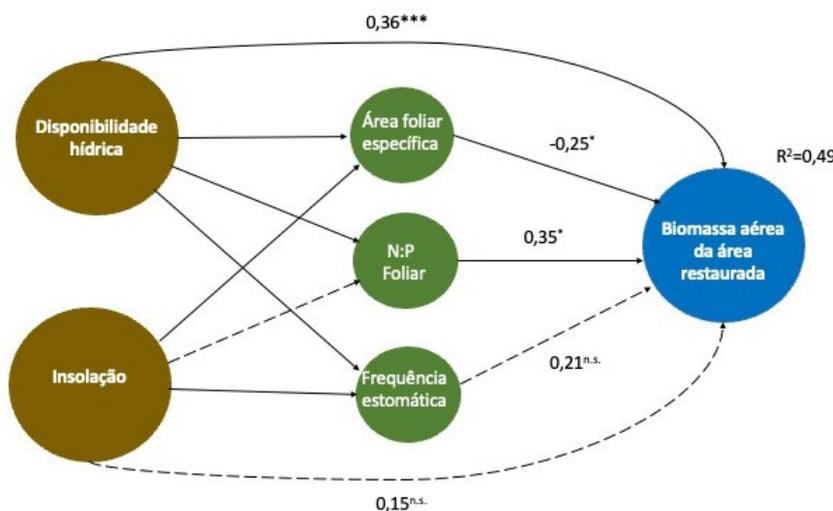


Figura 5. Exemplo hipotético do efeito de variáveis ambientais (insolação - relevo, e disponibilidade hídrica - clima) e atributos específicos (área foliar específica, relação entre os teores de N e P foliar e frequência estomática) sobre a performance do plantio de restauração, medida pela biomassa da comunidade vegetal. Os coeficientes e níveis de significância são dados pelo modelo. As linhas tracejadas indicam não significância nas relações entre as variáveis, enquanto as linhas cheias mostram relações significativas.

Neste exemplo hipotético, sem o rigor do uso de dados primários, propõe-se um modelo em que se observa, por meio das linhas cheias, as relações que foram significativas ($p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$), e das linhas tracejadas, as que não foram. O total explicado pelo modelo é dado pelo R^2 . Neste exemplo hipotético, o modelo, com as variáveis latentes e observada adotadas, explicou 49% da variação na biomassa aérea da área restaurada, sugerindo uma relevante interação entre essas variáveis afetando o desenvolvimento do plantio. A disponibilidade hídrica afetou de forma positiva e direta essa variação (valor de relação 0,36, significativo), sendo que a insolação não foi significativamente relacionada com o acúmulo de biomassa no plantio. A área foliar específica se relacionou de forma inversa e significativa ($p < 0,05$) com a biomassa acumulada na vegetação arbórea, que apresentou uma relação direta e positiva com a relação N:P foliar (valor 0,35). A ausência de relação significativa entre a frequência estomática e a biomassa aérea sugere a não necessidade de estratégias adaptativas como resposta à disponibilidade hídrica na área.

A Modelagem por Equações Estruturais é uma ferramenta estatística que requer grandes amostras (Kline, 2016); uma das chamadas regras de ouro indica que cada relação (caminho) entre duas variáveis seja analisada com base em pelo menos cinco repetições. Dessa forma, a definição do modelo e o número de caminhos vai depender do número de repetições disponíveis. Nesse caso, cada plantio de restauração florestal com espécies arbóreas nativas constitui uma repetição. A seleção das características (ou filtros) ambientais e atributos a serem utilizados nos modelos deve ser sustentada pelas relações teóricas (hipotéticas) de causalidade entre elas, conforme o arcabouço teórico que podem afetar o desempenho dos plantios de restauração.

Considerações finais

Há um debate atual bastante relevante sobre o uso dos atributos funcionais na prática da restauração ecológica (Funk *et al.*, 2024; Gornish *et al.*, 2023; Merchant *et al.*, 2022). Há um consenso de que o conhecimento sobre as características funcionais pode representar uma ferramenta que complementa as práticas tradicionais de restauração, mas há lacunas a serem superadas, como a necessidade de uma maior compreensão sobre como as características afetam o desempenho da planta e as funções do ecossistema sob diferentes condições ambientais (Funk *et al.*, 2024; Gornish *et al.*, 2023;

Merchant *et al.*, 2022). A superação dessas lacunas passa necessariamente pela aproximação entre pesquisa e prática, buscando a contínua integração entre essas duas abordagens; a execução de pesquisas a partir da prática da restauração pode ampliar a proposição de hipóteses a serem testadas e assim expandir o uso de atributos funcionais na restauração (Gornish *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, recomenda-se que essa aproximação entre pesquisa e prática na restauração tenha início no esforço de amostragem dos atributos funcionais das espécies e das características (filtros) ambientais, fundamentais para a construção de uma base sólida de dados para a adoção da SEM. Os procedimentos metodológicos individualizados para amostrar os atributos funcionais das espécies e realizar a caracterização dos fatores abióticos que podem afetar a sobrevivência e o estabelecimento de espécies arbóreas plantadas em ações de restauração de ecossistemas são conhecidos e consolidados.

O diferencial proposto nas recomendações do presente documento reside na análise integrada dessas características para a definição de quais atributos específicos (funcionais) e ambientais (abióticos) são mais relevantes para o desempenho das espécies plantadas. Além disso, busca-se entender como a relação de causalidade entre essas características auxilia a compreensão do desenvolvimento da comunidade em restauração, podendo orientar a escolha de espécies a serem plantadas e as técnicas mais promissoras a serem adotadas.

Esta pode ser uma abordagem recomendada diferenciada para transpor os desafios da restauração de florestas em tempos de mudanças climáticas, como no caso do estado do Rio de Janeiro, que possui quase 8% da população brasileira, em que seus recursos hídricos são altamente dependentes da sua cobertura florestal.

Referências

- ABOUKILI, V. K.; CHAZDON, R. L. Environmental filtering, local site factors and landscape context drive changes in functional trait composition during tropical forest succession. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 24, p. 37-47, 2017.
- BRANCALION, P. H.S.; SCHWEIZER, D.; GAUDARE, U.; MANGUEIRA, J. R.; LAMONATO, F.; FARAH, F. T.; NAVE, A. G.; RODRIGUES, R. R. Balancing economic costs and ecological outcomes of passive and active restoration in agricultural landscapes: the case of Brazil. **Biotropica**, v. 48, n. 6, p. 856-867. 2016.

- BRUDVIG, L. A.; BARAK, R. S.; BAUER, J. T.; CAUGHLIN, T.; LAUGHLIN, D. C. LARIOS, L.; MATTHEWS, J. W.; STUBLE, K. L.; TURLEY, N. E.; CHAD R. Z. Interpreting variation to advance predictive restoration science. **Journal of Applied Ecology**, v. 54, n. 4, p. 1018-1027, 2017.
- BUZZARD, V.; HULSHOF, C. M.; BIRT, T.; VIOLLE, C.; ENQUIST, B. J. Re-growing a tropical dry forest: functional plant trait composition and community assembly during succession. **Functional Ecology**, v. 30, n. 6, p. 1006-1013, 2016.
- CARLUCCI, M. B.; BRANCALION, P. H.; RODRIGUES, R. R.; LOYOLA, R.; CIANCIARUSO, M. V. Functional traits and ecosystem services in ecological restoration. **Restoration Ecology**, v. 28, n. 6, p. 1372-1383, 2020.
- FRANGIPANI, M. A. **Padrões de composição e diversidade funcionais de florestas do Pampa no sul do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- FUNK, J. L.; EVINER, V. T.; GARBOWSKI, M.; VALLIERE, J. M. Empirical tests of trait–function relationships are crucial for advancing trait-based restoration: a response to Merchant et al. (2023). **Restoration Ecology**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/rec.14254>. Acesso em: 7 nov.2024.
- FUNK, J. L.; LARSON, J. E.; AMES, G. M.; BUTTERFIELD, B. J.; CAVENDER-BARES, J.; JENNIFER FIRN, D. C.; LAUGHLIN, A. E.; SUTTON-GRIER, L. W.; WRIGHT, J. Revisiting the Holy Grail: using plant functional traits to understand ecological processes. **Biological Reviews**, v. 92, n. 2, p. 1156-1173, 2017.
- FUNK, J. L.; CLELAND, E. E.; SUDING, K. N.; ZAVALETA, E. S. Restoration through re-assembly: plant traits and invasion resistance. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 23, p. 695– 703, 2008.
- GANN, G. D.; MCDONALD, T.; WALDER, B.; ARONSON, J.; NELSON, V. T.; JONSON, J.; HALLETT, J. G.; EISENBERG, C.; GUARIGUATA, M. R.; FANGYUAN HUA, J. L.; ECHEVERRÍA, C.; GONZALES, E.; SHAW, N.; DECLEER, K.; DIXON, W. W. **Padrões internacionais para a prática da restauração ecológica: incluindo princípios e conceitos chaves**, 2. ed. Tuckson: Society for Ecological Restoration, 2019. Disponível em: https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/SER_Standards_Portuguese.pdf. Acesso em: 5 nov. 2024.
- GORNISH, E. S.; CAMPBELL, C.; SVEJCAR, L.; SETH, M. M., KURT VAUGHN, M. K. S.; YELENIK, S. G.; WOLF, A.; MITCHELL, R. Functional traits are used in restoration practice: a response to Merchant et al. (2022), **Restoration Ecology**, v. 31, n. 7, p. 1–6, 2023.
- Disponível em: <https://doi.org/10.1111/rec.13880>. Acesso em: 7 nov. 2024.
- GRACE, J. B.; ANDERSON, T. M.; OLFF, H. SCHEINER, S. M. On the specification of structural equation models for ecological systems. **Ecological Monographs**, v. 80, n. 1, p. 67-87, 2010.
- JOHNSON, M.L.; HUGGINS, D.G.; DE NOYELLES, F. Ecosystem modeling with Lisrel: A new approach for measuring direct and indirect effects. **Ecol. Appl.** v. 1, n 4, p. 383–398. 1991.
- KLINE, R. B. **Principles and Practice of Structural Equation Modeling**, 4a ed. New York: The Guilford Press, 2016. E-book. Disponível em: <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/befc0f8521c770249dd18726a917cf90.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2024.
- LASKY, J. R.; URIARTE, M.; BOUKILI, V. K.; CHAZDON, R. L. Trait-mediated assembly processes predict successional changes in community diversity of tropical forests. **PNAS**, v. 111, n. 15, p. 5616-5621, 2014.
- LAUGHLIN, D. C. Applying trait-based models to achieve functional targets for theory-driven ecological restoration. **Ecology Letters**, v. 17, n. 7, 771-784, 2014.
- LAUGHLIN, D. C.; STRAHAN, R. T.; MOORE, M. M.; FULÉ, P. Z.; HUFFMAN, D.; W.; COVINGTON, W. The hierarchy of predictability in ecological restoration: are vegetation structure and functional diversity more predictable than community composition? **Journal of Applied Ecology**, v. 54, n. 4, 1058-1069, 2017.
- LEBRIJA-TREJOS, E.; PÉREZ-GARCÍA, E. A.; MEAVE, J. A.; BONGERS, F.; POORTER, L. Functional traits and environmental filtering drive community assembly in a species-rich tropical system. **Ecology**, v. 91, n. 2, p. 386-398, 2010.
- MACARTHUR, R. H.; LEVINS, R. The limiting similarity, convergence, and divergence of coexisting species. **American Naturalist**, v. 101, p. 377-385, 1967.
- MERCHANT, T. K.; HENN, J. J.; DE SILVA, I.; VAN CLEEMPUT, E.; SUDING, K. N. FOUR reasons why functional traits are not being used in restoration practice. **Restoration Ecology**, v. 31, n. 3., p. 1-7, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/rec.13788>. Acesso em: 7 nov. 2024.
- PALMER, M. A.; FALK, D. A.; ZEDLER, J. B. Ecological Theory and Restoration Ecology. In: Falk, D. A.; Palmer, M. A.; Zedler, J. B. (ed.). **Foundations of Restoration Ecology**. Washington, D.C.: Island Press, 2006.
- PETERS, V. E.; CARLO, T. A.; MELLO, M. A. R.; RICE, R. A.; TALLAMY, D. W.; CAUDILL, S. A.; FLEMING, T. H. Using plant–animal interactions to inform tree selection in tree-based agroecosystems for enhanced biodiversity. **BioScience**, v. 12, p. 1046-1056. 2016.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N.; DIAZ, S.; LAVOREL, S.; POORTER, H.; JAUREGUIBERRY, P.; BRET-HARTE, M. S.; CRAINE, H.; URCELAY, C.; VENEKLAAS, E.; REICH, P.; POOTER, L.; WRIGHT, I. J.; RAY, P.; ENRICO, L.; PAUSAS, J. G.; DE VOS, A. C.; BUCHMANN, N.; FUNES, G.; GU'WTIER, F.; HODGSON, J. G.; THOMPSON, K.; MORGAN, H. D.; STEEGE, H. H.; VAN DER HEUDEN, M. G. A.; SACK, L.; BLONDE, B.; POSCHLOD, P.; VARERETTI, M. V.; CONTI, G.; STAVELAND, A. C.; AQUINO, S.; CORNELISSEN, J. H. C. New handbook for standardized measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v. 61, n. 3, p. 167-234, 2013.

POORTER, L.; SANDE, M. van der; ARETS, E. J. M. M.; ASCARRUNZ, N.; ENQUIST, B.; FINEGAN, B.; LICONA, J. C.; MARTINEZ-RAMOS, M.; FREITAS, L. J. M. de; MEAVE, J. A.; MUÑOZ, R.; NYTCH, C. J.; OLIVEIRA, A. A. de; PÉREZ-GARCÍA, E. A.; PRADO-JUNIOR, J.; RODRÍGUEZ-VELÁZQUES, J.; RUSCHEL, A. R.; SALGADO-NEGRET, B.; SCHIAVINI, I.; SWENSON, N. G.; TENORIO, E. A.; THOMPSON, J.; TOLEDO, M.; URIARTE, M.; HOUT, P. van der; ZIMMERMAN, J. K.; PEÑA-CLAROS, M. Biodiversity and climate determine the functioning of Neotropical forests. **Global Ecology and Biogeography**, v. 26, n. 12, p. 1423-1434, 2017.

REICH, P. B. The worldwide 'fast-slow' plant economics spectrum: a traits manifesto. **Journal of Ecology**, v. 102, p. 275-301, 2014.

ROSENFELD, M. F.; MÜLLER, S. C. Predicting restored communities based on reference ecosystems using a trait-based approach. **Forest Ecology and Management**, v. 391, p. 176-183, 2017.

STREIT, R. P.; BELLWOOD, D. R. To harness traits for ecology, let's abandon 'functionality.' **Trends in Ecology and Evolution**, v. 38, n. 5, p. 402-411, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.11.009>. Acesso em: 5 nov. 2024.

TEMPERTON, V.; HOBBS, R. J. The search for ecological assembly rules and its relevance to restoration ecology. In: TEMPERTON, V. M.; HOBBS, R. J.;

NUTTLE, T.; HALLE, S. (ed.). **Assembly rules and restoration ecology—bridging the gap between theory and practice**. Washington, D.C.: Island Press, 2004.

VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Umidade atual (capítulo 2). In: Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª Ed. revista e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VIOLLE, C.; NAVAS, M. L.; VILE, D.; KAZAKOU, E.; FORTUNEL, C.; HUMMEL, I.; GARNIER, E. Let the concept of trait be functional! **Oikos**, v. 116, n. 5, p. 882-892, 2007.

WRIGHT, S. **Evolution and the genetics of populations: genetic and biometric foundations**. Chicago: University of Chicago Press, 1968.

ZANINI, A. M.; MAYRINCK, R. C.; VIEIRA, S. A.; RODRIGUES, R. R. Carbon content and allometric models to estimate aboveground biomass for forest areas under restoration. **Restoration Ecology**, v. 30, n. 5, p. 1-9, 2022.

Embrapa Agrobiologia

Rodovia BR 465, km 7 - CEP 23891-000 Seropédica, RJ
Caixa Postal 74.505
Fone: (21) 3441-1500 | Fax: (21) 2682-1230
www.embrapa.br/agrobiologia
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Bruno José Rodrigues Alves*

Secretário-executivo: *Carmelita do Espírito Santo*

Membros: *Ana Cristina Siewert Garofolo, Janaina Ribeiro Costa Rouws, Luc Felicianus Marie Rouws, Luis Cláudio Marques de Oliveira, Luiz Fernando Duarte de Moraes, Márcia Reed Rodrigues Coelho, Marta dos Santos Freire Ricci de Azevedo e Nátia Élen Auras*

Comunicado Técnico 153

ISSN 1517-8862
Dezembro, 2024

Edição executiva: *Ana Cristina Siewert Garofolo*
Revisão de texto: *Luis Cláudio Marques de Oliveira*
Normalização bibliográfica: *Carmelita do Espírito Santo (CRB-7/5043)*

Projeto gráfico: *Leandro Sousa Fazio*

Diagramação: *Maria Christine Saraiva Barbosa*

Publicação digital: PDF



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA

Todos os direitos reservados à Embrapa.