

Critérios e indicadores para a restauração da Mata Atlântica brasileira: uma prospecção na literatura científica

Alejandro Caballero Rivero ^{1*}, Juliana Lazzarotto Freitas ², Fábio Mascarenhas e Silva ³

¹Doutor em Ciência da Informação, Instituto Nacional da Mata Atlântica, Brasil. (*Autor correspondente: caballero.alecaba@gmail.com)

²Doutora em Ciência da Informação, Instituto Nacional da Mata Atlântica, Brasil.

³Doutor em Ciência da Informação, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 08/07/2024 – Revisado em: 14/09/2024 – Aceito em: 30/12/2024

RESUMO

Os critérios e indicadores relacionados à restauração florestal são recursos que contribuem para o desenvolvimento da pesquisa sobre a restauração e para a definição, monitoramento e avaliação do progresso periódico dos processos de restauração ecológica de florestas. Questiona-se quais os principais critérios e indicadores utilizados no Brasil e no mundo para a restauração de ecossistemas florestais que possam ser empregados na restauração da Mata Atlântica. Para responder a essa questão, objetiva-se prospectar critérios e indicadores nacionais e internacionais passíveis de uso no monitoramento e avaliação da restauração da Mata Atlântica brasileira. É um estudo de natureza exploratória e documental, adota a revisão de literatura e a análise de conteúdo temática categorial de um corpus de 31 publicações indexadas nas bases Web of Science e SciELO relativas aos critérios e indicadores de restauração, combinando-os com os termos relacionados à Mata Atlântica. Foram identificados 19 critérios e 118 indicadores, dos quais foram selecionados para a análise aqueles incluídos em pelo menos quatro dos 31 documentos, sendo eles 13 critérios e 56 indicadores, agrupados em cinco dimensões: i) ecológica; ii) econômica; iii) social; iv) mudança climática; v) gestão da restauração. Esses critérios pretendem ser colocados em xeque para validação por especialistas em uma próxima etapa da pesquisa.

Palavras-Chaves: Critérios & Indicadores, Restauração florestal, Restauração ecológica, Mata Atlântica.

Criteria and indicators for the restoration of the Brazilian Atlantic Forest: a survey of the scientific literature

ABSTRACT

Criteria and indicators related to forest restoration contribute to the development of research on restoration and to the definition, monitoring and evaluation of the periodic progress of ecological restoration processes of forests. This research questions what the main criteria and indicators are used in Brazil and worldwide for the restoration of forest ecosystems that can be used in the restoration of the Atlantic Forest. To answer this question, national and international criteria and indicators that can be used in the monitoring and evaluation of the restoration of the Brazilian Atlantic Forest are prospected. This is an exploratory and documentary study, adopting a literature review and thematic categorial content analysis of a corpus of 31 publications indexed in the Web of Science and SciELO databases related to restoration criteria and indicators, combining them with terms related to the Atlantic Forest. A total of 19 criteria and 116 indicators were identified, of which those included in at least four of the 31 documents were selected for analysis, being 13 criteria and 56 indicators, grouped into five dimensions: i) ecological; ii) economic; iii) social; iv) climate change; v) restoration management. These criteria are intended to be put into question for validation by experts in a next stage of the research.

Keywords: Criteria and Indicators, Forest Restoration, Ecological Restoration, Atlantic Forest.

Caballero Rivero, A. et al. (2024). Critérios e indicadores para a restauração da Mata Atlântica brasileira: uma prospecção na literatura científica. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v.12, n.4, p.91-118.



Crerios e indicadores para la restauración del Bosque Atlántico brasileño: prospección a partir de la literatura científica

RESUMEN

Los criterios e indicadores relacionados con la restauración forestal son recursos que contribuyen al desarrollo de la investigación sobre restauración y a la definición, seguimiento y evaluación del avance periódico de los procesos de restauración ecológica forestal. El estudio cuestiona cuáles son los principales criterios e indicadores utilizados en Brasil y en el mundo para la restauración de ecosistemas forestales que pueden ser utilizados en la restauración del Bosque Atlántico. Para responder a esa pregunta, el objetivo es prospectar criterios e indicadores nacionales e internacionales que puedan ser utilizados en el seguimiento y evaluación de la restauración del Bosque Atlántico brasileño. Se trata de un estudio exploratorio y documental, adoptando una revisión de la literatura y un análisis de contenido temático categorial de un corpus de 31 publicaciones indexadas en las bases de datos Web of Science y SciELO relacionadas con criterios e indicadores de restauración, combinándolos con términos relacionados con el Bosque Atlántico. Se identificaron 19 criterios y 118 indicadores, de los cuales se seleccionaron para su análisis aquellos incluidos en al menos cuatro de los 31 documentos, que comprenden 13 criterios y 56 indicadores, agrupados en cinco dimensiones: i) ecológica; ii) económico; iii) social; iv) cambio climático; v) gestión de la restauración. Se pretende que estos criterios sean cuestionados para su validación por expertos en la siguiente etapa de la investigación.

Palabras clave: Criterios e Indicadores, Restauración forestal, Restauración ecológica, Bosque Atlántico.

1. Introdução

A restauração florestal é uma forma especializada de reflorestamento (ações que devolvem qualquer tipo de cobertura arbórea às terras desmatadas), mas seus objetivos são a manutenção do equilíbrio dos ecossistemas envolvidos, visando a recuperação e conservação da biodiversidade e a proteção ambiental. Nesse sentido, a definição de restauração florestal explicita que se trata de “[...] ações para restabelecer processos ecológicos, que aceleram a recuperação da estrutura florestal, do funcionamento ecológico e dos níveis de biodiversidade em direção aos níveis típicos da floresta clímax” (Elliott, Blakesley e Hardwick, 2013, p. 12, tradução nossa). Em outros termos, são ações voltadas para estabelecer ecossistemas relativamente estáveis que consigam desenvolver o máximo de biomassa, complexidade estrutural e diversidade de espécies, considerando os limites impostos pelo meio ambiente (ex., clima, solo) e sem perturbações contínuas por parte dos seres humanos (Elliott, Blakesley e Hardwick, 2013).

A avaliação das ações de restauração florestal tem sido motivo de preocupação e discussão no mundo nas últimas décadas, sendo estabelecidas metas globais, nacionais e regionais na intenção de restaurar milhões de hectares de floresta para atingir múltiplos objetivos, incluindo o sequestro de carbono, a conservação da biodiversidade, melhorias na qualidade e abastecimento de água, dentre outras questões (Holl, 2017). Exemplos como *O Desafio de Bonn*, de 2011, e, a *Declaração de Nova Iorque sobre Florestas*, de 2014, visavam restaurar 150 milhões de hectares em todo o mundo até 2020 e ainda 350 milhões de hectares até 2030 (Temperton et al., 2019). Estas metas globais baseiam-se em objetivos regionais de restauração, tais como, a iniciativa *20x20* do *World Resources Institute* (WRI), a qual inclui compromissos de 17 países da América Latina para proteger e restaurar 50 milhões de hectares de florestas, fazendas, pastagens e outras paisagens até 2030 (WRI, 2024).

Consequentemente, o monitoramento e avaliação da restauração florestal tornou-se uma das questões mais importantes para pesquisadores e profissionais de restauração ecológica nas últimas décadas (Holl, 2017). Alguns estudos mostram que diferentes fatores abióticos e bióticos impedem a recuperação florestal, e a importância relativa destes fatores varia entre tipos de floresta e as especificidades biológicas locais; logo, as estratégias de restauração devem ser cuidadosamente selecionadas, considerando a resiliência natural de um determinado local, as barreiras específicas à restauração, bem como os objetivos ecológicos e humanos do projeto de restauração (Chazdon, 2014).

O processo de restauração ecológica deve ser conduzido com clara compreensão dos objetivos da restauração, a qual deve incorporar a dimensão ecológica (ex., estrutura vegetal, composição de espécies arbustivas, características físicas e químicas dos solos, dentre outras), mas também as dimensões climática, econômica, ambiental e social; todas essas dimensões devem ser monitoradas ao longo da restauração para garantir seu sucesso (Burley, 2004).

Há princípios e padrões internacionais para a prática da restauração ecológica (ver, por exemplo, Gann et al., 2019). Internacionalmente, desde 1992, tem-se elaborado e implementado vários instrumentos que adotam Critérios e Indicadores (C&I) para apoiar o monitoramento e a concepção de relatórios sobre o estado das florestas, incluindo a identificação de metas que norteiem o desenvolvimento do setor florestal, incorporando, também, aspectos ecológicos, sociais, econômicos e de governança (Linser et al. 2018).

O enfoque de C&I desponta como uma ferramenta eficaz para implementar políticas relacionadas às florestas, e voltadas para a restauração e conservação da biodiversidade de ecossistemas florestais (UN, 2023). Conceitualmente, os C&I são ferramentas utilizadas para definir, avaliar e monitorar o progresso periódico em determinado país ou área florestal específica.

Os critérios caracterizam ou definem os elementos essenciais, ou seja, o conjunto de condições ou processos pelos quais as florestas podem ser avaliadas em relação ao estágio de conservação, ou, de restauração em que se encontram. Logo, um conjunto de critérios pode representar as condições e níveis de conservação ou restauração dos ecossistemas florestais. Por sua vez, os indicadores expõem as mudanças ao longo do tempo para cada critério e demonstram o progresso alcançado em relação aos objetivos específicos, isto é, medem e ajudam a monitorar o estado e as mudanças das florestas em termos quantitativos, qualitativos e descritivos, refletindo os valores florestais considerados na definição de cada critério. Finalmente, as métricas são os métodos utilizados para verificar, medir ou avaliar um indicador (FAO, 2017; MCPFE, 1998).

No entanto, embora a implementação dos sistemas de monitoramento baseados em C&I seja reconhecida internacionalmente, também tem enfrentado resistências devido ao uso de conjuntos inadequados de dados e indicadores, a falta de capacidade técnica para a coleta sistemática de dados que subsidiam os indicadores, a falta de capacidade financeira para a realização de inventários florestais regulares, dentre outros aspectos (UN, 2023).

Adicionalmente, há uma necessidade crescente de C&I generalizáveis cuja uniformidade permita sua replicabilidade, seu uso em meta-análises e em comparações mútuas entre projetos de restauração (Oliver, Dorrrough e Travers, 2023; Prach et al., 2019; Orsi, Genelleti e Newton, 2011).

A Mata Atlântica brasileira é considerada uma das mais importantes florestas tropicais do planeta devido à abundante diversidade de espécies animais e vegetais (Figueiredo et al. 2021). Mais de 145 milhões de brasileiros vivem dentro dos limites da Mata Atlântica e dependem dos serviços ecossistêmicos fornecidos por esse bioma (Carlucci, Silva e Torezam, 2021). Devido a sua importância para o país, a Mata Atlântica foi definida como patrimônio nacional no artigo 225 da Constituição Federal (Brasil, 1988). No entanto, o uso inadequado dos solos, bem como a exploração excessiva dos recursos florestais, dentre outros fatores, está degradando ambientalmente o bioma e contribuindo para a ruptura dos seus processos ecológicos; como resultado, a Mata Atlântica está sendo reduzida a pequenas porções fragmentadas de suas extensões originais (Carlucci, Silva e Torezam, 2021).

Logo, resulta importante desenvolver, baseado no enfoque de C&I, um sistema de monitoramento e avaliação sobre a restauração e a conservação da biodiversidade da Mata Atlântica que atualize e complemente os estudos anteriores de mapeamento dos C&I sobre o tema em questão. Neste sentido, questiona-se: quais são os principais C&I utilizados internacional e nacionalmente para a restauração de ecossistemas florestais?

O objetivo geral do presente trabalho é prospectar C&I nacionais e internacionais que possam ser utilizados para o monitoramento e avaliação da restauração da Mata Atlântica brasileira. Como objetivos específicos, pretende-se identificar, na literatura científica, os principais C&I adotados no Brasil e no mundo para monitorar, avaliar e informar sobre a restauração de ecossistemas florestais e caracterizar os C&I

identificados. Almeja-se que os resultados sejam, a posteriori, avaliados por especialistas da área para certificar a aplicabilidade no âmbito da Mata Atlântica.

2. Material e Métodos

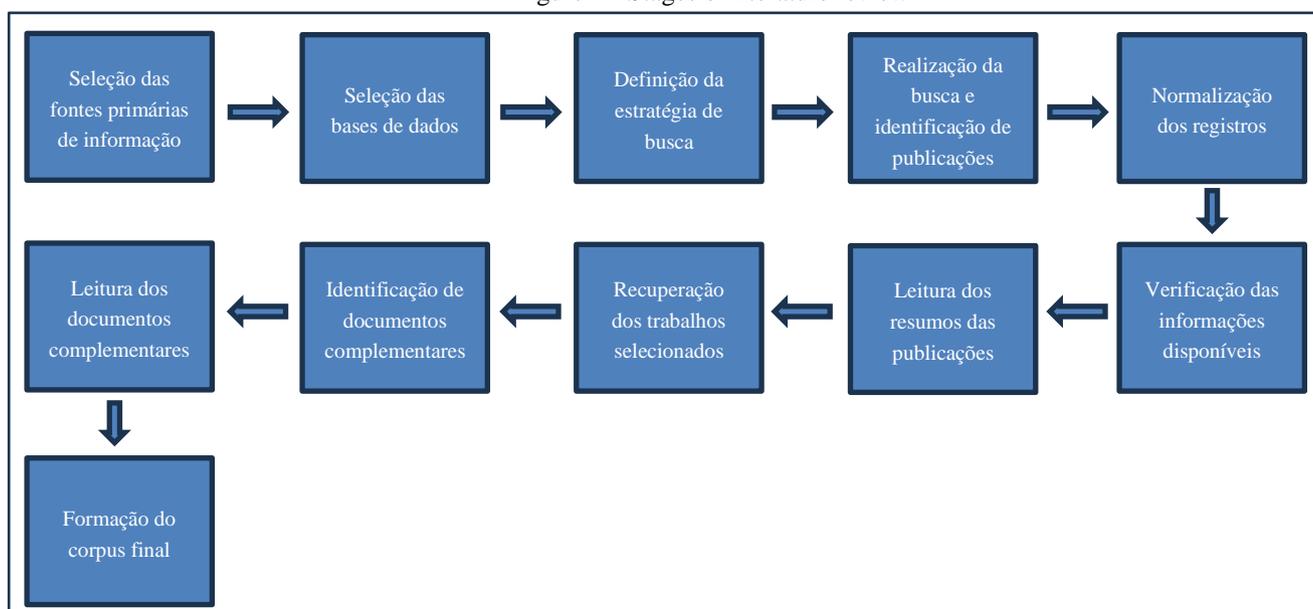
Este estudo é de natureza exploratória e documental e adota a revisão de literatura e a análise de conteúdo para categorizar as publicações sobre a temática em questão. A seguir detalham-se os procedimentos metodológicos.

1.1 Revisão de literatura

Para uma exploração preliminar sobre o tema foi realizada uma revisão de literatura para detectar, obter e consultar a bibliografia pertinente para a pesquisa, bem como extrair e compilar dela a informação relevante sobre os principais C&I utilizados no mundo e no Brasil para monitorar, avaliar e informar sobre a restauração de ecossistemas florestais. A figura 1 apresenta as etapas principais da revisão da literatura.

Figura 1 – Etapas da revisão de literatura.

Figure 1 - Stages of literature review



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Source: Prepared by the authors (2024)

Primeiramente, foram selecionadas as fontes de informação primária a serem consultadas: artigos publicados em periódicos científicos (artigos e artigos de revisão), livros, capítulos de livros e trabalhos completos publicados em anais de congressos. A seguir foram selecionadas as bases de dados para identificar e recuperar a literatura: Bases de dados Science Citation Index Expanded (SCIE); Social Sciences Citation Index (SSCI); Conference Proceedings Citation Index – Science (CPCI-S); Conference Proceedings Citation Index – Social Sciences and Humanities (CPCI-SSH) e Emerging Sources Citation Index (ESCI), da Web of Science (WoS) (Clarivate Analytics); Base de dados Scopus (Elsevier); Scientific Electronic Library Online (SciELO). Em seguida, foi definida a estratégia de busca para identificar e recuperar a literatura, considerando os campos título, resumo e palavras-chave, e utilizando os seguintes termos de busca em inglês, português e

espanhol: “criteria”; “critérios” ; “criterios” ; “indicators”; “indicadores”; “restoration”; “restauração”; “restauración”; “ecosystem”; “ecosistema”; “ecosistema”; “tropical”; “forest”; “floresta”; “bosque”; “mata”.

A busca foi realizada em outubro de 2023 e foram identificadas 189 publicações, sendo 187 artigos de periódicos e 2 capítulos de livros. A normalização dos registros identificados, e sua correspondente informação bibliográfica (título, autor, resumo, palavra-chave), foi realizada por meio do software de mineração de dados VantagePoint (version 12.0), fusionando os registros coletados para identificar os trabalhos duplicados. Do total de 189 publicações, 51 estavam indexadas em mais de uma das bases utilizadas, logo, restaram 138 publicações.

Em seguida, verificaram-se as informações disponíveis em cada uma das 138 publicações, identificando-se 126 com o conjunto completo de metadados, enquanto 12 publicações, por não cumprirem esse requisito, foram eliminadas. Procedeu-se à leitura dos resumos dessas publicações para identificar os mais próximos à temática de C&I para a restauração de ecossistemas florestais. Foram descartadas 86 publicações em cujos títulos, resumos ou palavras-chave constavam alguns dos termos de busca utilizados, porém, cujo foco não eram os C&I para a restauração de ecossistemas florestais, ou que utilizavam como indicadores de restauração espécies endêmicas de determinadas áreas geográficas, inexistentes na Mata Atlântica brasileira (por exemplo, o coelho-do-pântano - *Sylvilagus aquaticus*), logo, mantiveram-se 40 publicações.

A seguir, localizaram-se e recuperaram-se os trabalhos selecionados que não apresentavam limitações de acesso. Descartaram-se 11 publicações devido a exigências de pagamento de assinaturas por subscrição ou compra, totalizando 29 publicações em formato .pdf.

Adicionalmente, a modo de complementação, foram identificados outros tipos de documentos, tais como: projetos já implementados, boas práticas e experiências bem-sucedidas relativas à implementação de C&I para a restauração de ecossistemas florestais no mundo e no Brasil, utilizando a base do *Google acadêmico*. Os critérios de busca foram os mesmos utilizados na etapa anterior. No total foram recuperados 12 documentos, incluindo relatórios de organismos internacionais sobre a elaboração de indicadores, estatísticas e outras contribuições analíticas e metodológicas sobre indicadores para a tomada de decisões. Os 12 documentos coletados foram lidos na íntegra, descartando-se dez deles, cujo foco não eram os C&I para a restauração de ecossistemas florestais.

Como resultado, o corpus final foi constituído por um total de 31 documentos em formato .pdf, os quais foram lidos na íntegra, sendo elaboradas as referências correspondentes a partir das questões e ideias mais relevantes vinculadas à pesquisa (critérios, indicadores, sistemas de indicadores, dentre outros).

1.2 Análise de conteúdo

A análise de conteúdo é um conjunto de técnicas de análise de comunicações que “[...] visa a obtenção de indicadores (quantitativos ou não) por procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, permitindo a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção (variáveis inferidas) dessas mensagens” (Bardin, 1977, p. 32, tradução nossa).

Na presente pesquisa foi utilizada a análise de conteúdo temática-categorial para identificar e caracterizar os C&I que aparecem nos 31 documentos. A análise de conteúdo temática-categorial funciona por meio de etapas nas quais se realizam operações de desmembramento dos textos analisados em unidades e em categorias para, posteriormente, agrupá-los analiticamente (Oliveira, 2008). A análise foi aplicada em três etapas, apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Etapas da análise de conteúdo temática-categorial

Table 1 – Ecological dimension of forest restoration: main criteria, indicators and metrics

Etapa	Descrição
Pre-análise	Os documentos identificados, coletados e revisados nas etapas anteriores foram organizados e classificados considerando o foco principal, por exemplo, indicadores

	florestais, de serviços ambientais (serviços básicos oferecidos pelas florestas que tornam a vida possível às pessoas que moram nas florestas ou nas suas proximidades, tais como água potável, frutas, vegetais, madeira, lenha, gás natural), dentre outros
Codificação	A partir da revisão de literatura foi realizada a codificação do corpus, e, a partir dos códigos, formaram-se categorias; selecionou-se o tipo de unidade de registro (palavras, por exemplo, critérios, indicadores); as unidades de contexto (relacionadas com o tema da restauração de ecossistemas florestais); os indicadores que permitem aferir as unidades de significação (frequência absoluta dos termos)
Inferência e interpretação	Análise temática da restauração de ecossistemas florestais (quantificação das categorias presentes em cada critério); análise categorial dos textos (a partir das categorias identificadas para cada critério); interpretação (a partir dos valores de presença e frequência de cada uma das categorias identificadas); apresentação dos resultados em forma de descrição

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Source: Prepared by the authors (2024)

Em complemento à análise de conteúdo temática-categorial adotada, foi utilizado o *Voyant Tools*, um aplicativo de código aberto disponível na web (<https://voyant-tools.org/>) que permite analisar textos ou corpos de textos (Voyant Tools, 2023). O *Voyant Tools* ajuda na exploração e interpretação dos textos, permitindo a navegação entre diversos níveis de leitura, análise e visualização por meio da sua mineração e visualização interativa (Sánchez Tarragó, 2021).

O uso do *Voyant Tools* implicou a realização de várias etapas, conforme aplicado por Sánchez Tarragó (2021). Primeiramente, foi preparado o corpus de análise, renomeando-se os 31 documentos com o sobrenome do autor e o ano de publicação para melhor identificação. A seguir, realizou-se o *upload* desses documentos para o site do *Voyant Tools* dos 31 documentos em formato .pdf. Em seguida, foram incorporadas as palavras sem significado relevante à lista de *stopwords* para desconsiderá-las na análise dos textos, tais como: artigos, preposições, interjeições, pronomes (ex., *the, in and, of, to etc.*), abreviaturas (ex., e.g., fig., i.e., etc.), protocolos ou endereços na Internet (ex., http, https, doi.org, 10.1016, etc.). Depois, foi utilizado o módulo Sumário para obter as características básicas do corpus analisado (ex., total de documentos analisados, total de palavras contidas nesses documentos, total de palavras únicas contidas no corpus, densidade de vocabulário, palavras por oração). Seguidamente, por meio do módulo Cirrus, foi criada uma nuvem de palavras mostrando os termos mais frequentes. Isso permitiu utilizar o módulo Termos para determinar a frequência de palavras e filtrar aquelas sem significado relevante. Imediatamente, se utilizou o módulo Tendências para identificar o número de artigos em que aparecem os termos com maior frequência absoluta de palavras. Finalmente, por meio do módulo Contexto foi analisado o contexto circundante em que cada termo ocorre; o módulo apresenta um determinado número de palavras que antecedem e que sucedem ao termo.

A análise fundamentada na frequência absoluta de palavras se sustenta no pressuposto de que os pesquisadores utilizam conceitos que estão associados aos fenômenos estudados, e esses conceitos são expressos por meio de termos ou palavras-chave já consensuais no campo de estudo. Então, se a frequência absoluta de determinado conjunto de termos é superior à de outros, se admite que esse conjunto de termos manifeste maior probabilidade para representar os conceitos principais no contexto dessas pesquisas.

Uma vez identificados os termos com maior frequência absoluta - por meio do módulo “Contexto” - foram identificados os principais C&I sobre a restauração de ecossistemas florestais. Adicionalmente, por meio do módulo “Tendências”, foi identificado o número de artigos que tratavam dos C&I e suas correspondentes métricas.

Finalmente, esses C&I foram agrupados em dimensões que fornecem a estrutura conceitual primária para monitoramento e avaliação da restauração florestal. Embora a ideia inicial fosse utilizar o nome exato dos critérios e indicadores identificados, muitos artigos utilizam termos diferentes, porém, sinônimos, para se

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Source: Prepared by the authors (2024)

Foram identificados 19 critérios e 118 indicadores, dos quais selecionaram-se para a análise os C&I incluídos em, ao menos, quatro dos 31 artigos, isto é, 13 critérios e 56 indicadores. Esses C&I foram agrupados em cinco dimensões: i) ecológica; ii) econômica; iii) social; iv) mudança climática; v) gestão da restauração. A seguir, descreve-se cada dimensão, e seus respectivos critérios e indicadores. Adicionalmente, para uma melhor compreensão de cada indicador, foram incorporadas as correspondentes métricas e unidades de medida. Porém, esclarece-se que nem todos os trabalhos analisados especificam métricas, portanto, a tabela apresenta apenas as métricas identificadas.

3.1 Dimensão ecológica

A dimensão ecológica da restauração florestal foca no monitoramento ecológico, logo, os C&I utilizados nessa dimensão oferecem a possibilidade de avaliar com precisão a necessidade de realizar ações corretivas no decurso do processo de restauração. Nessa dimensão foram identificados, no total, seis critérios e 80 indicadores, dos quais, os seis critérios e 40 indicadores apareceram em quatro ou mais trabalhos analisados. O quadro 1 oferece um resumo dos resultados para a dimensão ecológica, apresentando esses seis critérios e 42 indicadores, bem como as respectivas métricas para cada indicador, sua Unidade de Medida (UM) e o número de trabalhos em que apareceram.

Quadro 1 – Dimensão ecológica da restauração florestal: principais critérios, indicadores e métricas

Table 1 – Ecological dimension of forest restoration: main criteria, indicators and metrics

Indicadores	Definição	Métrica	UM	No. de publicações
Critério I - Estrutura vegetal				
Cobertura da copa florestal	Proporção da superfície do solo sombreada pelas árvores	Percentual de linha do terreno coberta pela projeção da copa de árvores	%	12
Presença de espécies invasoras	Ocorrência de espécies de plantas que não são nativas do ecossistema	Presença de indivíduos de espécies vegetais invasoras	Sim/Não	8
Cobertura de herbáceas invasoras e superdominantes	Proporção da superfície do solo ocupada por plantas herbáceas que não são desejadas ou que dominam o ambiente	Percentual de cobertura do solo por herbáceas invasoras e superdominantes	%	8
Área basal das árvores	Parte de uma área florestal ocupada pelos troncos das árvores que compõem essa floresta, considerando o diâmetro dos troncos à altura peito (DAP)	Áreas basal de indivíduos de espécies arbóreas	m ² /ha	8
Densidade de indivíduos de menor porte (DAP≤15)	Quantidade de indivíduos de espécies arbustivas e arbóreas não invasoras por unidade de área	Indivíduos de menor porte de espécies não invasoras por área	ind./ha	8
Densidade de indivíduos de maior porte (DAP>15)	Quantidade de indivíduos de espécies arbustivas e arbóreas não invasoras por unidade de área	Indivíduos de maior porte de espécies não invasoras por área	ind./ha	8

Altura das árvores	Distância linear entre o nível do solo e o ponto mais alto da copa	Altura média das árvores	m	8
Diâmetro à altura do peito (DAP)	Diâmetro do caule (tronco) na altura do peito, padronizado em 1,3 m.	Diâmetro do caule à altura do peito	cm	6
Estratificação do dossel	Divisão vertical da floresta em diferentes camadas ou estratos	Presença de estratos (superior, médio, inferior, sub-bosque)	Sim/Não	6
Área basal das espécies não invasoras	Parte de uma área florestal ocupada pelos troncos das árvores de espécies não invasoras, considerando o diâmetro dos troncos à altura peito (DAP)	Áreas basal de indivíduos de espécies arbóreas não invasoras	m ² /ha	5
Densidade de árvores	Número de indivíduos de espécies arbustivas e arbóreas por unidade de área	Número de indivíduos por unidade de área	ind./ha	5
Densidade do sub-bosque	Quantidade de indivíduos arbóreas que crescem na camada inferior da floresta, abaixo do dossel, por unidade de área	Indivíduos de espécies arbóreas por unidade de área	ind./ha	4
Critério II - Composição de espécies arbóreas e arbustivas				
Riqueza de espécies de plantas nativas	Número de diferentes espécies de plantas nativas presentes na área em restauração	Número de espécies de plantas nativas	U	11
Riqueza do sub-bosque	Número de diferentes espécies de plantas que crescem na camada inferior da floresta (arbustos, samambaias, ervas e outras plantas que crescem na sombra das árvores do dossel)	Número de espécies arbóreas abaixo do dossel	U	9
Densidade das espécies arbóreas invasoras	Número de espécies arbóreas invasoras por unidade de área (com semeadura direta ou plantio de mudas)	Número de espécies arbóreas que não são nativas por hectare	Esp./ha	8
Composição de espécies arbóreas invasoras	Conjunto de espécies de árvores não nativas que se estabeleceram em uma área florestal	Número de espécies arbóreas invasoras	U	7
Presença de determinadas espécies de insetos	Ocorrência de espécies de insetos que podem contribuir para a reprodução das espécies vegetais (ex., polinizadores, como abelhas, moscas e borboletas)	Presença de indivíduos de determinadas espécies de insetos	Sim/Não	5
Diversidade de outras formas de plantas além das árvores	Variedade de outras espécies vegetais (ex., herbáceas, arbustivas, trepadeiras, forrageiras e gramíneas)	Número de outras espécies vegetais além das árvores presentes na área	U	5
Presença de determinadas espécies de aves	Ocorrência de espécies de aves que podem contribuir para a reprodução das espécies vegetais	Presença de indivíduos de determinadas espécies de aves	Sim/Não	5

	(ex., aves polinizadoras, como beija-flor, cambacica)			
Composição de espécies não invasoras	Conjunto de espécies de árvores nativas de uma área florestal	Número de espécies arbóreas invasoras	U	4
Densidade de espécies vegetais nativas utilizadas para recobrimento	Número de espécies vegetais nativas empregadas na restauração florestal (com semeadura direta ou plantio de mudas) por unidade de área que apresentam maior recobrimento do solo na área em restauração	Número de espécies vegetais nativas por hectare utilizadas para recobrimento	Esp./ha	4
Critério III - Edáfico				
Composição química do solo	Composição mineralógica, da matéria orgânica, da reação (pH), da capacidade de troca catiônica, da disponibilidade de água e da atividade biológica do solo	Disponibilidade no solo de macronutrientes, micronutrientes, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica, saturação por bases	Várias	9
Grau de conservação do solo	Nível de conservação do solo, considerando os seus atributos físicos, químicos e biológicos	Presença de erosão laminar, em sulcos ou voçorocas	Sim/Não	8
Grau de compactação do solo	Medida que indica o quão compactado está o solo	Resistência mecânica do solo à penetração	MPa	7
Cobertura vegetal do solo	Proporção de solo que está protegida por plantas vivas ou mortas (ex., folhas, galhos, palha)	Percentual de solo descoberto na entrelinha (preparo convencional com revolvimento do solo)	%	6
Bioindicadores	Seres vivos de natureza diversa utilizados para avaliação da qualidade ambiental (biomassa microbiana, enzimas)	Biomassa microbiana	µg C/g solo seco	6
		Atividade enzimática	kat	
Infiltração do solo	Medida da passagem da água pela superfície do solo	Taxa de infiltração do solo	mm/h ou cm/h	6
Percolação do solo	Medida da movimentação descendente da água abaixo da superfície do solo	Taxa de percolação do solo	mm/h ou cm/h	6
Textura do solo	Proporção dos componentes granulométricos da fase mineral do solo (areia, silte e argila) de uma área em restauração	Percentual de areia, argila e silte presentes em uma amostra de solo	%	5
Riqueza faunística do solo	Estimação da abundância dos organismos que vivem no solo (ex., microartrópodes, nematoides, microssimbiontes, biomassa microbiana)	Espécies de animais que vivem no solo	Ind.	5
Densidade faunística do solo	Estimação da diversidade dos organismos que vivem no solo (ex., microartrópodes,	Indivíduos de diferentes grupos de organismos que vivem no solo por unidade de área	Ind./m2	5

	nematóides, microssimbiontes, biomassa microbiana)			
Critério IV- Fatores de degradação				
Gado e/ou outros animais domésticos na área em restauração	Presença atual ou recente de gado e/ou outros animais domésticos na área em restauração	Sinais de presença de gado e outros animais domésticos	Sim/Não	5
Histórico de presença de gado e/ou outros animais domésticos na área em restauração	Frequência e duração da entrada e saída de gado e/ou outros animais domésticos na área em restauração	Frequência histórica da entrada e saída de gado e/ou outros animais domésticos na área em restauração	Vezes/ano	5
		Duração histórica da presença de gado e/ou outros animais domésticos na área em restauração	Dias	
Fogo	Ocorrência de fogo na área em restauração	Sinais de queimadas	Sim/Não	4
Histórico de fogo	Frequência, intensidade e duração de queimadas na área em restauração	Frequência histórica das queimadas na área em restauração	Vezes / ano	4
		Intensidade histórica das queimadas na área em restauração	Escala Likert	4
		Duração histórica das queimadas na área em restauração	Dias	4
Critério V- Serviços ambientais				
Balanço hídrico	Entradas e saídas de água de uma bacia hidrográfica em um determinado intervalo de tempo	Fluxo	m ³ /s	6
		Fluxo de base	m ³ /s	
Sedimentos na água	Quantidade de material sólido que se acumula no fundo do reservatório de uma bacia hidrográfica proveniente da erosão	Nível de sedimentos no reservatório	g/m ² ou kg/m ²	4
Turbidez da água	Grau de turvação da água de uma bacia hidrográfica causado pelos sedimentos em suspensão (ex., argila, silte, matéria orgânica, micro-organismos)	Turbidez	NTU	4
Critério VI - Processos ecológicos				
Densidade de regenerantes nativos	Quantidade de indivíduos de espécies arbustivas e arbóreas nativas por unidade de área, que se estabeleceram naturalmente após a restauração	Indivíduos lenhosos de espécies nativas	ind./ha	7
Riqueza de espécies nativas em regeneração	Espécies de plantas nativas que estão crescendo novamente na área em restauração após um distúrbio (ex., desmatamento, incêndio)	Porcentagem de ocupação do ambiente	%	7

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)
Source: Prepared by the authors (2024)

I. Estrutura vegetal: esse critério se refere à distribuição vertical e horizontal da comunidade vegetal em restauração (organização física ou padrões). Os indicadores utilizados para avaliar essa estrutura foram publicados em 19 dos 31 trabalhos analisados, destacando 14 indicadores que apareceram em quatro ou mais publicações. O indicador mais utilizado para avaliar a estrutura vegetal (usado em mais de 30% dos estudos) foi a cobertura da copa florestal. Os indicadores menos utilizados foram o índice de vegetação, o índice de vegetação aprimorado, a fração da cobertura vegetal, a tendência da cobertura do solo, a diminuição da área florestal, e as plantações de monocultura, todos eles ocorrendo, unicamente, em um artigo.

II. Composição de espécies arbóreas e arbustivas: esse critério se refere aos aspectos da composição de espécies vegetais na área em restauração (identidade e variedade de elementos). Os indicadores utilizados para avaliar essa composição foram publicados em 13 dos trabalhos analisados, destacando nove indicadores que constam em quatro ou mais publicações. Os indicadores mais utilizados para avaliar a composição (cada um usado em mais de 30% dos estudos) foram a riqueza de espécies de plantas nativas (11 publicações) e a riqueza do sub-bosque (9). Os indicadores menos utilizados foram a presença de espécies vegetais de diferentes grupos sucessionais, as espécies de árvores zoocóricas, as espécies de árvores não pioneiras, e o índice de valor de importância, todos eles incidentes, unicamente, em um artigo.

III. Edáfico: esse critério se refere aos aspectos inerentes ao solo da área em restauração (composição química, características físicas e bioindicadores). Os indicadores utilizados para avaliar o solo foram publicados em 20 dos trabalhos, destacando dez indicadores que apareceram em quatro ou mais publicações. Os indicadores mais utilizados para avaliar esse critério (cada um usado em mais de 29% dos estudos) foram a composição química do solo (nove publicações), o grau de conservação do solo (oito publicações) e o grau de compactação do solo (sete publicações). Os indicadores menos utilizados foram o índice de qualidade do solo, o índice de qualidade vegetal e a produtividade primária líquida, todos eles identificados, unicamente, em um artigo.

IV. Fatores de degradação: esse critério se refere às condições ou atividades que prejudicam a saúde e a vitalidade do ecossistema florestal. Os indicadores utilizados para avaliar esse critério foram publicados em 7 dos trabalhos, destacando quatro indicadores incidentes em quatro ou mais publicações. Os indicadores mais utilizados para avaliar o solo (cada um usado em mais de 16% dos estudos) foram a presença de gado e/ou outros animais domésticos na área em restauração e o histórico da presença de gado e/ou outros animais domésticos, ambos constando em cinco publicações. O indicador menos utilizado foi a ocorrência de eventos climáticos extremos, que aparece, unicamente, em um artigo.

V. Serviços ambientais: esse critério se refere aos benefícios que as florestas proporcionam ao meio ambiente e aos seres humanos. Os indicadores utilizados para avaliar esses serviços foram publicados em 8 dos trabalhos, destacando três indicadores presentes em quatro ou mais publicações. O indicador mais utilizado (usado em mais de 19% dos estudos) foi o balanço hídrico das bacias hidrográficas das áreas em restauração, presente em 6 publicações. Os indicadores menos utilizados foram as práticas de conservação de água, o nível máximo do lençol freático em um período de três dias, o índice de diatomáceas tróficas, o índice de macro invertebrados bentônicos e o índice de avaliação de peixes, todos eles contidos, unicamente, em um artigo.

VI. Processos ecológicos: esse critério se refere às interações complexas entre os organismos vivos (plantas, animais e microrganismos) e o ambiente físico (solo, água e clima). Os indicadores utilizados para avaliar esses serviços foram publicados em oito dos trabalhos, destacando dois indicadores identificados em quatro ou mais publicações. Os indicadores mais utilizados (usado em mais de 19% dos estudos) foram a densidade de regenerantes nativos e a riqueza de espécies em regeneração, aparecendo em 7 publicações. O indicador menos utilizado foi a ocorrência de frutificação, aparecendo, unicamente, em um artigo.

3.2 Dimensão econômica

A dimensão econômica da restauração florestal envolve aspectos como os custos associados à implementação do projeto de restauração, os benefícios econômicos que podem ser obtidos da floresta restaurada, e as oportunidades econômicas que podem surgir como resultado do projeto, dentre outras questões. No total, foram identificados quatro critérios e 15 indicadores, dos quais três critérios e seis indicadores apareceram em quatro ou mais trabalhos. O quadro 2 apresenta um resumo dos resultados para a dimensão econômica, expondo esses três critérios e seis indicadores, bem como as respectivas métricas para cada indicador, sua unidade de medida e o número de publicações em que apareceram.

Quadro 2 – Dimensão econômica da restauração florestal: principais critérios, indicadores e métricas
Table 2 – Economic dimension of forest restoration: main criteria, indicators and metrics

Indicadores	Definição	Métrica	UM	No. de publicações
Critério VII - Investimento				
Nível de investimento no programa de restauração	Valor de investimentos do programa de restauração	Investimento total do Programa nas atividades de restauração	R\$	4
		Valor de investimento do programa em serviços	R\$	
		Valor de investimento do programa em insumos	R\$	
		Valor de investimento do programa em mão de obra (contrato direto)	R\$	
		Valor de investimento do programa em aquisição de ferramentas, máquinas e implementos	R\$	
		Valor de investimento do programa em impostos	R\$	
		Valor de investimento do programa em gestão	R\$	
Critério VIII - Receitas e incentivos				
Comercialização de produtos florestais madeireiros	Geração de renda pela comercialização de madeira oriunda das áreas em restauração	Montante gerado pela comercialização de produtos madeireiros	m ³ e R\$	7
Comercialização de produtos florestais não madeireiros e agroflorestais	Geração de renda pela comercialização de produtos florestais não madeireiros oriundos das áreas em restauração	Montante gerado pela comercialização de produtos não madeireiros e agroflorestais	m ³ e R\$	7
Aptidão para benefícios econômicos de serviços ambientais	Capacidade da comunidade de utilizar os recursos da floresta de maneira sustentável para obter benefícios econômicos	Pagamento por serviços ambientais	R\$	4
Critério IX - Trabalho e mão de obra				
Geração de postos de trabalho	Postos de trabalhos gerados diretamente pelas atividades de	Número de postos de trabalho gerados por tipo de mão de	U	4

	restauração	obra (permanentes / temporários / familiar)		
Geração de renda para a economia local	Identificação do impacto da restauração sobre a economia local	Porcentagem do investimento total do programa de restauração investido na região	%	4

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Source: Prepared by the authors (2024)

VII. Investimento: esse critério se refere à alocação de recursos financeiros para atividades que visam à recuperação e manutenção de florestas. Os indicadores utilizados para avaliar o investimento na restauração foram publicados em seis trabalhos, destacando um indicador identificado em quatro ou mais publicações. O indicador mais utilizado para avaliar o investimento (usado em mais de 19% dos estudos) foi o nível de investimento do programa de restauração. Já os indicadores menos utilizados foram os custos de plantio, os custos e manutenção inicial e os custos de manutenção contínua, os três aparecendo, unicamente, em um artigo.

VIII. Receitas e incentivos: esse critério se refere à remuneração paga a produtos e processos oriundos das ações de restauração florestal, que são benéficos à sociedade. Os indicadores utilizados para avaliar essa remuneração foram publicados em dez dos trabalhos analisados, destacando dois indicadores que constam em quatro ou mais publicações. Os indicadores mais utilizados para avaliar as receitas e incentivos da restauração (usados em mais de 30% dos estudos) foram a comercialização de produtos florestais madeireiros e a comercialização de produtos florestais não madeireiros e agroflorestais. Os indicadores menos utilizados foram a renda associada à compensação de reserva legal (ex., cotas de reserva legal, servidão florestal etc.) e os incentivos tributários para o programa de restauração, os dois aparecendo, unicamente, em dois artigos.

IX. Trabalho e mão de obra: esse critério se refere às oportunidades de trabalho, treinamento e outros serviços que a restauração oferece às comunidades locais. Os indicadores utilizados para avaliar essa remuneração foram publicados em quatro dos trabalhos, destacando dois indicadores incidentes em quatro publicações. Os indicadores mais utilizados para avaliar as oportunidades de trabalho e mão de obra da restauração (usados em mais de 12% dos estudos) foram a geração de postos de trabalho e a geração de renda para a economia local. O indicador menos utilizado se refere aos requisitos exigidos para contratação de mão de obra para a restauração, aparecendo, unicamente, em dois artigos.

Adicionalmente, foi identificado o critério “Recreação e turismo”, relacionado à existência de atividades e atrações turísticas resultantes da restauração. No entanto, esse critério foi abordado, unicamente, em dois dos 31 artigos analisados, logo, não foi considerado como um dos critérios principais que estão sendo utilizados no mundo para monitorar a restauração.

3.3 Dimensão social

A dimensão social de um projeto de restauração considera as interações entre a área em restauração, as pessoas e a vida em sociedade, destacando o impacto do projeto de restauração nas comunidades locais e respectivas contribuições para o bem-estar social. No total, dois critérios e 11 indicadores foram identificados, porém, um único critério e quatro indicadores constaram em quatro ou mais trabalhos. O quadro 3 sintetiza os resultados para esta dimensão, incorporando esse critério e os quatro indicadores, bem como as respectivas métricas para cada indicador, sua unidade de medida e o número de publicações incidentes.

Quadro 3 – Dimensão social da restauração florestal: principais critérios, indicadores e métricas

Table 3 – Social dimension of forest restoration: main criteria, indicators and metrics

Indicadores	Definição	Métrica	UM	No. de publicações
Critério XI - Relacionamento do projeto de restauração com a comunidade do entorno				

Aceitação do projeto pelas comunidades locais	Grau em que a comunidade local apoia ou aprova o projeto	Porcentagem da população da comunidade que participa das atividades do projeto de restauração	%	6
Participação comunitária na implementação do projeto	Participação da comunidade na conceituação, criação e implantação do projeto de restauração	Reuniões com a comunidade e atores locais	U	5
Ações de educação ambiental do projeto de restauração	Ações para a conscientização e engajamento da comunidade na preservação e recuperação das florestas	Implantação das ações de educação ambiental	U	4
Percepção comunitária da restauração	Como a comunidade percebe os esforços de restauração	Proporção da população que percebe a restauração como benéfica	%	4

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Source: Prepared by the authors (2024)

X. Relacionamento do projeto de restauração com a comunidade do entorno: refere-se aos impactos positivos e negativos do programa de restauração na comunidade do entorno. Os indicadores utilizados para avaliar esse relacionamento foram publicados em seis dos 31 trabalhos analisados, destacando um indicador, presente em seis publicações. O indicador mais utilizado para avaliar o relacionamento do projeto de restauração com a comunidade (usado em mais de 19% dos estudos) foi sua aceitação pelas comunidades locais. O indicador menos utilizado demonstra se os agricultores da comunidade adotam a técnica agrícola de cultivo em nível (também conhecido como plantio em contorno), buscando a conservação do solo, presente, unicamente, em dois artigos.

Adicionalmente foi identificado o critério “Saúde e segurança do trabalho”, relacionado com a proteção dos trabalhadores envolvidos em atividades de restauração, com quatro indicadores associados. Porém, trata-se de um critério discutido unicamente em dois dos 31 trabalhos, logo, não se destaca entre aqueles utilizados no âmbito mundial para monitorar a restauração.

3.4 Dimensão da mudança climática

A dimensão da mudança climática considera os esforços de um projeto de restauração para tentar reduzir a variação das condições climáticas médias que vem acontecendo no planeta ao longo de várias décadas. No total, foram identificados um critério e cinco indicadores, porém apenas dois desses cinco indicadores apareceram em quatro ou mais trabalhos. O quadro 4 resume os resultados para esta dimensão, incorporando um critério e dois indicadores, bem como as respectivas métricas para cada indicador, sua unidade de medida e o número de publicações em que apareceram.

Quadro 4 – Dimensão da mudança climática da restauração florestal: principais critérios, indicadores e métricas

Table 4 – Dimension of climate change of forest restoration: main criteria, indicators and metrics

Indicadores	Definição	Métrica	UM	No. de publicações
Critério XIII – Mitigação da mudança climática				
Carbono sequestrado através do acúmulo de biomassa	Absorção de carbono da atmosfera na forma de CO ² ou outros compostos que têm potencial imediato para se tornar gás carbônico	Estoque de biomassa acima da superfície do solo	ton./ha	4
Carbono orgânico do	Teor de carbono presente na matéria	Quantidade de	ton./ha	4

solo	orgânica do solo formada por restos de plantas e animais em diferentes estágios de decomposição	carbono orgânico do solo		
------	---	--------------------------	--	--

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Source: Prepared by the authors (2024)

XI. Mitigação da mudança climática: esse critério se refere aos esforços empreendidos no contexto de um projeto de restauração para reduzir ou prevenir a emissão de gases de efeito estufa. Os indicadores utilizados para avaliar esse relacionamento foram publicados em nove dos trabalhos, destacando dois indicadores que aparecem em oito publicações. Os indicadores mais utilizados para avaliar a mitigação da mudança climática (usados em mais de 12% dos estudos) foram o carbono sequestrado através do acúmulo de biomassa e o carbono orgânico do solo. Enquanto os indicadores menos utilizados foram a capacidade da comunidade de lidar com choques e tensões resultantes da mudança climática (ex., insegurança alimentar, hídrica, energética, efeitos dos desastres naturais), a capacidade de resposta da comunidade aos impactos das alterações climáticas (como a informação é partilhada e aplicada nas comunidades quando confrontadas com mudanças ambientais), ambos aparecendo, unicamente, em dois trabalhos, bem como o índice de qualidade climática que apareceu unicamente em uma publicação.

3.5 Dimensão da gestão da restauração

A dimensão da gestão da restauração considera o adequado planejamento, avaliação, monitoramento e documentação dos programas e projetos de restauração. No total, foram identificados seis critérios e dez indicadores, porém, apenas dois dos mencionados critérios, e quatro desses indicadores, constam em quatro ou mais publicações. O quadro 5 apresenta um resumo dos resultados para esta dimensão, incorporando esses dois critérios e quatro indicadores, bem como as respectivas métricas para cada indicador, sua unidade de medida e o número de trabalhos incidentes.

Quadro 5 – Dimensão da gestão da restauração florestal: principais critérios, indicadores e métricas

Table 5 – Dimension of forest restoration management: main criteria, indicators and metrics

Indicadores	Definição	Métrica	UM	No. de publicações
Critério XIV – Planejamento e documentação do programa / projeto de restauração				
Programa / Projeto de restauração com diagnóstico e planejamento de atividades	Programa / Projeto contendo as informações pertinentes ao planejamento e execução das diversas etapas do processo de restauração	Diagnóstico socioambiental das áreas a serem restauradas	Sim/Não	4
		Delimitação das áreas em restauração	Sim/Não	
		Lista de espécies indicadas para o projeto	Sim/Não	
		Cronograma de execução física	Sim/Não	
Programa / Projeto de restauração com registros de execução	Documentação de cada etapa e atividade das ações de restauração	Registro das intervenções	Sim/Não	4
		Lista de espécies utilizadas	Sim/Não	
		Origem dos propágulos para restauração	Sim/Não	
		Registro audiovisual (fotos e/ou vídeos) das áreas em restauração em diferentes etapas	Sim/Não	
		Registro de despesas	Sim/Não	

		Controle de produtividade do projeto (rendimento operacional das atividades desenvolvidas)	Sim/Não	
Critério XV - Comunicação fluida do programa / projeto com os atores envolvidos				
Bom fluxo interno de informação do programa / projeto de restauração	Articulação comunicativa entre a equipe gestora e a executora	Registros com comunicações das recomendações dos gestores aos executores	Sim/Não	5
		Registros com comunicações dos executores aos gestores sobre as dificuldades encontradas	Sim/Não	
Bom fluxo externo de informação do programa / projeto de restauração	Comunicação com demais atores sociais interessados	Registros de comunicações com a comunidade do entorno	Sim/Não	5
		Registros de comunicação científica (ex. publicações em periódicos científicos, participação em eventos científicos)	Sim/Não	
		Registros de comunicação com a mídia	Sim/Não	

XII. Planejamento e documentação do programa / projeto de restauração: esse critério se refere à forma de organização da execução dos programas e projetos e ao registro dos resultados obtidos. Os indicadores utilizados para avaliar o planejamento e a documentação foram considerados em quatro trabalhos (usados em mais de 12% dos estudos), especificamente, se apresentam diagnóstico e planejamento de atividades, bem como registros de execução.

XIII. Comunicação fluida do programa / projeto com os atores envolvidos: critério referente aos esforços empreendidos pela coordenação para assegurar o sucesso do projeto de restauração. Os indicadores utilizados para avaliar essa comunicação foram publicados em cinco trabalhos (usados em mais de 16% dos estudos), especificamente, o bom fluxo interno de informação e o bom fluxo externo de informação do projeto.

Adicionalmente, foram identificados outros quatro critérios: “Parcerias formalizadas pelo projeto com os proprietários dos imóveis rurais para a execução de atividades de restauração florestal”; “Sistema de monitoramento do projeto”; “Capacidade técnica da equipe executora do projeto”; e “Promoção de inovação tecnológica ou metodológica em restauração pelo projeto”. No entanto, esses quatro critérios, bem como os cinco indicadores associados a eles, apareceram em menos de quatro publicações, logo, não se sobressaíram dentre os principais que estão sendo utilizados no mundo para monitorar a restauração florestal.

4. Discussão

A maioria dos trabalhos analisados não abrangeu as cinco dimensões identificadas, prevalecendo, de forma significativa, as pesquisas voltadas para o monitoramento e a avaliação da dimensão ecológica da restauração florestal, em detrimento das dimensões econômica, social, da mudança climática e da gestão da restauração. O estudo indica que a maior parte das pesquisas recentes sobre o tema (2010-2023) ainda não considera a restauração florestal como um fenômeno ecológico associado a uma combinação de fatores econômicos e sociais, às mudanças na composição atmosférica como resultado da atividade humana e à necessidade de um adequado planejamento e gestão da restauração, questões anteriormente levantadas por Burley (2004).

Além disso, identificaram-se diferenças significativas entre os critérios adotados para avaliar a dimensão ecológica. A estrutura vegetal e a composição de espécies arbóreas e arbustivas foram avaliadas em mais publicações do que os outros critérios, isto é, aqueles utilizados para avaliar os fatores edáficos, de degradação, os serviços ambientais e os processos ecológicos. Durante as últimas décadas, as pesquisas sobre restauração têm se concentrado, principalmente, em critérios relativos à estrutura vegetal e a composição de espécies arbóreas e arbustivas, dando pouca atenção aos outros critérios (Brudvig, 2011) e assumindo que a recuperação das funções ecológicas é, fundamentalmente, um resultado de mudanças na estrutura e na composição florestal (Young, 2000).

No que diz respeito à dimensão ecológica da restauração florestal, os estudos analisados exploram uma variedade importante de critérios e indicadores, com foco em abordagens que extrapolam indicadores únicos e buscam uma avaliação mais holística do processo. Uma das questões recorrentes é a necessidade de utilizar múltiplos indicadores para capturar a complexidade da restauração florestal. Nesse sentido, Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson (2017) destacam a necessidade de avaliar a composição, estrutura e função dos ecossistemas, utilizando múltiplos indicadores para cada critério. A ênfase em diversidade funcional e análise de padrões espaciais também é destacada por esses autores como crucial para a compreensão da integridade dos ecossistemas.

A aplicação prática dessa multiplicidade de critérios e indicadores para monitorar a restauração florestal está presente em um conjunto de trabalhos analisados. Por exemplo, Suganuma e Durigan (2015) utilizam uma cronosequência (4-53 anos) de florestas ripárias em restauração para modelar a trajetória de vários critérios (estrutura da floresta, riqueza e composição de espécies de árvores, dentre outros) por meio de indicadores como área basal, cobertura da copa florestal, densidade, riqueza de espécies arbóreas e proporção de guildas funcionais; Zangalli et al. (2023), exploram a chuva de sementes e a queda de serapilheira como indicadores relevantes para avaliar a trajetória da restauração passiva em áreas de Mata Atlântica; Orsi, Genelleti e Newton (2011) aprofundam a discussão sobre a seleção de áreas prioritárias para restauração, utilizando um processo Delphi com especialistas para definir critérios ecológicos.

Por sua vez, a importância da participação de diferentes atores na definição de critérios e indicadores para o monitoramento da restauração é enfatizada por Ribeiro et al. (2019), que utiliza metodologias de avaliação rápida, incluindo as diretrizes do Pacto pela Restauração da Mata Atlântica (Rodrigues et al., 2013), para avaliar a eficiência de diferentes técnicas de restauração. Londe et al. (2020) exploram o conceito de "naturalidade" como critério para avaliar o progresso da restauração, comparando áreas em recuperação com ecossistemas de referência. O estudo define valores de referência intermediários e finais para diversos indicadores (cobertura da copa florestal, altura média das árvores, área basal, densidade de árvores, riqueza de espécies, dentre outros), permitindo uma avaliação mais precisa da trajetória da restauração.

No que diz respeito ao monitoramento da estrutura vegetal, a análise dos trabalhos revela um foco significativo nos critérios e indicadores específicos para monitorar a cobertura da copa florestal, que quantifica a proporção da área total coberta pelas copas das árvores, considerado como um indicador crucial na avaliação da saúde, progressão e sucesso de projetos de restauração florestal.

Diversos estudos fornecem critérios e indicadores importantes utilizados para seu monitoramento (Oliveira et al., 2021; Londe et al., 2020; Kedzior et al., 2020; Ribeiro et al., 2019; Tongkoom et al., 2018; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017; Viani et al., 2017; Suganuma e Durigan, 2015; Modica et al., 2015; Rodrigues et al., 2013; Johnson, Shear e James, 2012; Orsi, Genelleti e Newton, 2011). Devido à ampla utilização desse indicador, ilustra-se seu uso por meio de alguns exemplos. Modica et al. (2015) destacam esse indicador como um dos seis indicadores essenciais usados para calcular o Índice de Degradação Florestal (IDF). Considerando que oferece uma medida tangível da extensão da cobertura florestal, também é utilizado para rastrear mudanças na estrutura florestal ao longo do tempo (Suganuma e Durigan, 2015; Modica et al., 2015). Conforme esses autores, sua simplicidade o torna uma ferramenta valiosa para avaliar o progresso em

direção aos objetivos de restauração, particularmente útil nos primeiros 10 anos após o início da restauração, período em que normalmente acontecem mudanças significativas na floresta.

A presença de espécies invasoras, não invasoras e dominantes também foi abordada por vários estudos (Oliveira et al., 2021; Kedzior et al., 2020; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Ribeiro et al., 2019; Tongkoom et al., 2018; Viani et al., 2017; Echeverria, Gatica e Fuentes, 2017; Sharma et al., 2015; Rodrigues et al., 2013). Sharma et al. (2015) discutem a proliferação de espécies exóticas invasoras como um indicador de vulnerabilidade florestal. Segundo esses autores, a proliferação dessas espécies pode prejudicar a diversidade, aumentar o risco de incêndios e impactar negativamente os serviços ecossistêmicos, logo, sua detecção precoce e o monitoramento da cobertura de espécies invasoras são cruciais para orientar intervenções de manejo visando mitigar seus impactos negativos. Por sua vez, Echeverria et al. (2017), mencionam a identificação de "bordas de habitat de alto contraste" entre florestas naturais e áreas invadidas por espécies exóticas, destacando a importância de se monitorar a interface entre áreas restauradas e áreas invadidas para controlar a expansão de espécies invasoras. Rodrigues et al. (2013) abordam a cobertura de espécies herbáceas superdominantes e/ou invasoras como um indicador importante no monitoramento da restauração florestal, ressaltando a necessidade de controlar essas espécies para o sucesso da restauração.

Outros indicadores estão relacionados com as dimensões das árvores, tais como a área basal, a altura e o diâmetro à altura do peito (Oliveira et al., 2021; Londe et al., 2020; Kedzior et al., 2020; Ribeiro et al., 2019; Tongkoom et al., 2018; Viani et al., 2017; Sukanuma e Durigan, 2015; Modica et al., 2015; Meza Meli et al., 2014; Rodrigues et al., 2013). Indicadores para monitorar a densidade de árvores, de indivíduos de menor e maior porte, e do sub-bosque, também foram utilizados de forma importante (Londe et al., 2020; Ribeiro et al., 2019; Tongkoom et al., 2018; Viani et al., 2017; Lee, Cha e Moon, 2017; Sukanuma & Durigan, 2015; Rodrigues et al., 2013; Echeverria et al., 2013; Orsi, Geneletti e Newton, 2011). Já outros indicadores como o índice de uniformidade (Tongkoom et al., 2018; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017), o índice de vegetação por diferença normalizada (NVDI) (Wan et al., 2022; Lee, Cha e Moon, 2017); a taxa de sobrevivência (Oliveira et al., 2021); o índice de Vegetação Aprimorado (EVI) (Takoutsing et al., 2023), dentre outros, foram pouco utilizados (menos de quatro publicações).

No que diz respeito à composição de espécies arbóreas e arbustivas, os trabalhos analisados apresentam uma gama de critérios e indicadores. A avaliação da composição geralmente se concentra na comparação da área em recuperação com ecossistemas de referência ou na avaliação da trajetória da comunidade restaurada ao longo do tempo. Os principais indicadores discutidos têm a ver com a riqueza e diversidade de espécies de plantas nativas (Oliveira et al., 2021; Moravčík et al., 2019; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Tongkoom et al., 2018; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017; Lee et al., 2017; Londe et al., 2020; Viani et al., 2017; Sukanuma e Durigan, 2015; Orsi, Geneletti e Newton, 2011), do sub-bosque (Londe et al., 2020; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Tongkoom et al., 2018; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017; Lee, Cha e Moon, 2017; Viani et al., 2017; Sukanuma e Durigan, 2015; Echeverria, Gatica e Fuentes, 2013; Orsi, Geneletti e Newton, 2011), ou de outras formas de plantas além das árvores (Oliveira et al., 2021; Kedzior et al., 2020; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Rodrigues et al., 2013; Ribeiro et al., 2019; Orsi, Geneletti e Newton, 2011). Conforme os autores, o uso desses indicadores pretende avaliar diferentes aspectos da composição de espécies arbóreas e arbustivas e utilizam a riqueza de espécies arbóreas em diferentes estratos da floresta como um indicador para comparar áreas restauradas com ecossistemas de referência. A riqueza de espécies também é um indicador fundamental na avaliação da chuva de sementes, como apontado por Zangalli et al. (2023), que a utilizam para caracterizar a diversidade de espécies que chegam ao solo em áreas em processo de restauração passiva.

Outros indicadores voltados para monitorar a densidade e composição das espécies invasoras e não invasoras (Londe et al., 2020; Ribeiro et al., 2019; Tongkoom et al., 2018; Lee, Cha e Moon, 2017; Viani et al., 2017; Echeverria et al., 2013; Rodrigues et al., 2013; Orsi, Geneletti e Newton, 2011) e a presença de determinadas espécies de insetos e pássaros (Oliveira et al., 2021; Kedzior et al., 2020; Buckingham et al.,

2019; Ribeiro et al., 2019; McGinley, Robertson e Friday, 2019), também foram abordados de forma importante nos trabalhos analisados. No entanto, há indicadores que foram pouco utilizados (menos de quatro artigos), tais como a presença de espécies vegetais com diferentes síndromes de dispersão (Oliveira et al., 2021), a presença de espécies ameaçadas (Ribeiro et al., 2019; Layman et al., 2010), a presença de espécies vegetais de diferentes grupos sucessionais, as espécies de árvores zoocóricas, as espécies de árvores não pioneiras (Oliveira et al., 2021), e o índice de valor de importância (IVI) (Tongkoom et al., 2018; Meli et al., 2014).

Com relação ao critério edáfico, vários trabalhos oferecem uma variedade de indicadores no contexto de restauração florestal e de esforços de reabilitação de áreas degradadas. Particularmente, a composição química do solo tem sido uma das questões mais tratadas nesses estudos, considerando o carbono orgânico do solo como um indicador chave da saúde do solo, crucial para a ciclagem de nutrientes e retenção de água (Bandyopadhyay e Maiti, 2019; Buckingham et al., 2019; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Vega et al., 2013), a matéria orgânica do solo como fornecedora de insights sobre os níveis de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e enxofre (Meza Mori et al., 2022; Bandyopadhyay e Maiti, 2019; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017; Vega et al., 2013; Rodrigues et al., 2013; Orsi, Genelleti e Newton, 2011), o pH do solo como influenciador da disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana (Kedzior et al., 2020; Bandyopadhyay e Maiti, 2019; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017; Vega et al., 2013; Rodrigues et al., 2013), a concentração de nutrientes como elemento importante para avaliar os níveis de nutrientes essenciais disponíveis para o crescimento das plantas (Bandyopadhyay e Maiti, 2019; Buckingham et al., 2019), a presença de minerais (Cd, Pb, Zn, Cu), comumente encontrados em áreas industriais, como um indicador de contaminação (Kedzior et al., 2020; Rodrigues et al., 2013), dentre outros.

Igualmente destacam indicadores voltados para os parâmetros físicos do solo, tais como o grau de compactação (Bandyopadhyay e Maiti, 2019; Buckingham et al., 2019; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017; Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013; Orsi, Genelleti e Newton, 2011), a infiltração e a percolação do solo que fornecem medidas diretas da capacidade do solo de absorver e drenar água, e que estão intimamente relacionadas à compactação (Oliveira et al., 2021; Buckingham et al., 2019; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017; Rodrigues et al., 2013; Orsi, Genelleti e Newton, 2011; Balana, Mathijs e Muys, 2010).

Também, indicadores que monitoram a conservação do solo (Meza Mori et al., 2022; Ribeiro et al., 2019; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Tongkoom et al., 2018; Viani et al., 2017; Vega et al., 2013; Rodrigues et al., 2013; Orsi, Genelleti e Newton, 2011); a cobertura vegetal do solo (Zangalli et al., 2023; Paletto et al., 2021; Oliveira et al., 2021; Kedzior et al., 2020; Londe et al., 2020; Ribeiro et al., 2019); a presença e abundância de organismos que podem indicar a saúde do solo (bioindicadores), a riqueza e a densidade faunística do solo como indicadores que refletem a qualidade dos processos biológicos do solo (Bandyopadhyay e Maiti, 2019; Buckingham et al., 2019; Tongkoom et al., 2018; Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson, 2017; Orsi, Genelleti e Newton, 2011).

Outro indicador que também foi bastante utilizado tem a ver com a textura do solo, buscando monitorar a proporção de areia, silte e argila, que afeta a drenagem, aeração e disponibilidade de nutrientes no solo (Meza Mori et al., 2022; Bandyopadhyay e Maiti, 2019; Viani et al., 2017; Vega et al., 2013; Orsi, Genelleti e Newton, 2011). Outros indicadores, tais como o índice de qualidade do solo, o índice de qualidade climática, o índice de qualidade vegetal, o índice de qualidade de gestão (Meza Mori et al., 2022), a produtividade primária neta (Takoutsing et al., 2023), ou a temperatura da superfície do solo (Wan et al., 2022), foram pouco utilizados (menos de quatro artigos).

Com relação aos fatores de degradação, os trabalhos analisados destacam, particularmente, a presença de gado ou de outros animais domésticos e a ocorrência de fogo nas áreas em restauração. A presença de gado ou de outros animais domésticos é um fator considerado prejudicial para a restauração florestal e sua ocorrência é registrada como um indicador da necessidade de ações para isolar a área em restauração (McGinley,

Robertson e Friday, 2019; Viani et al., 2017; Sharma et al., 2015; Rodrigues et al., 2013; Balana, Mathijs e Muys, 2010). Por sua vez, a ocorrência de fogo é outro fator de degradação considerado prejudicial à restauração florestal, cujo monitoramento busca identificar incêndios ocorridos após a implementação das práticas de restauração, indicando a eficácia das medidas de prevenção e controle de incêndios (McGinley, Robertson e Friday, 2019; Viani et al., 2017; Sharma et al., 2015; Rodrigues et al., 2013).

Outros indicadores, tais como o desmatamento indiscriminado, que busca monitorar o impacto das comunidades locais na restauração florestal para atender às suas necessidades básicas (ex., lenha para cozinhar) ou para incrementar seus meios de subsistência (ex., produtos comerciais madeireiros e não madeireiros) (McGinley, Robertson e Friday, 2019; Sharma et al., 2015), os ataques de formigas-cortadeiras e outros herbívoros (Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013) e os eventos climáticos extremos (ex., tempestades, furações) (McGinley et al. (2019), tiveram menor presença nos estudos analisados (menos de quatro trabalhos).

No que diz respeito aos serviços ambientais, alguns trabalhos utilizam indicadores específicos para monitorar a quantidade e qualidade da água disponível para as comunidades locais. Destacam, particularmente, o balanço hídrico das bacias hidrográficas, a turbidez da água e os sedimentos na água, indicadores que consideram a dependência das comunidades locais da água para atender adequadamente suas necessidades básicas, bem como para apoiar suas atividades agrícolas e pecuárias (Oliveira et al., 2021; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Buckinhan et al., 2019; Sharma et al. 2015; Johnson, Shear e James, 2012; Orsi, Genelleti e Newton, 2011). Há indicadores menos representativos utilizados em menos de quatro publicações, tais como o nível máximo do lençol freático em um período de 3 dias (Johnson, Shear e James, 2012), as práticas de conservação de água pelas comunidades locais (Buckingham et al., 2019), bem como vários índices relativos à qualidade da água das bacias hidrográficas, especificamente, o índice de diatomáceas tróficas, o índice de macro invertebrados bentônicos, o índice de avaliação de peixes, e o índice de diferença de água normalizado (Park, Kim e Lee, 2021).

Com relação aos processos ecológicos, a riqueza e densidade de diferentes espécies nativas em regeneração foram os indicadores mais utilizados para monitorar a trajetória da restauração e da recuperação da composição e diversidade florística. Uma maior riqueza e densidade de espécies nativas em regeneração indicam maior biodiversidade e um ecossistema mais saudável (Londe et al., 2020; Kedzior et al., 2020; Brewer et al., 2020; Ribeiro et al., 2019; Modica et al., 2015; Meli et al., 2014; Balana, Mathijs e Muys, 2010). Já outros indicadores como a densidade de mudas nativas (Kedzior et al., 2020; Ribeiro et al., 2019), a ocorrência de dispersão de sementes pela fauna (Zangalli et al., 2023; Oliveira et al., 2021), a cobertura de regeneração juvenil, a cobertura de regeneração senil, a cobertura de regeneração natural (Ribeiro et al., 2019; Moravčík et al., 2019), bem como a ocorrência de polinização (Zangalli et al., 2023; Oliveira et al., 2021) e a ocorrência de frutificação (Oliveira et al., 2021), constaram em menos de quatro artigos.

Além dos critérios e indicadores utilizados para monitorar a dimensão ecológica, observa-se um crescimento no número de pesquisas que apresentam uma visão mais holística para monitorar a restauração florestal. Assim, as dimensões sociais e econômicas da restauração florestal têm sido discutidas por vários autores como elementos cruciais para o sucesso a longo prazo dos projetos de restauração.

No caso da dimensão social, destaca-se o uso de critérios e indicadores para monitorar o envolvimento das comunidades locais na tomada de decisões sobre as áreas prioritárias a serem restauradas, sua participação na implementação dos projetos, bem como as ações voltadas para a educação ambiental e a melhora da sua percepção sobre a restauração florestal (Oliveira et al., 2021; Bustamante et al., 2018; Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013; Balana, Mathijs e Muys, 2010). Adicionalmente, outros estudos consideraram critérios e indicadores relacionados com a melhoria da qualidade de vida das comunidades locais decorrentes da restauração florestal, e voltados para monitorar a segurança alimentar, hídrica e energética dessas comunidades, além de benefícios recreativos e culturais (Oliveira et al., 2021; Paletto et al. 2021; Buckingham

et al., 2019), porém, trata-se de indicadores incipientes nas pesquisas sobre o tema, e ainda não alcançaram uma abrangência significativa (menos de 4 artigos).

No que diz respeito à dimensão econômica, há autores que focaram em critérios e indicadores para monitorar a geração de emprego e renda que as comunidades locais podem obter decorrentes dos projetos de restauração, por meio da produção e comercialização de madeira, de produtos florestais não madeireiros, e de serviços ambientais, dentre outros aspectos (Oliveira et al., 2021; Paletto et al., 2021; Buckingham et al., 2019; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013; Balana, Mathijs e Muys, 2010). O investimento na restauração florestal também é um critério que tem sido aplicado por vários estudos, por meio de indicadores voltados para monitorar tanto o investimento total dos programas de restauração, quanto o investimento em serviços, insumos, mão de obra, ferramentas, máquinas, implementos e impostos (McGinley, Robertson e Friday, 2019; Bustamante et al., 2018; Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013). Outros indicadores, relativos aos investimentos na restauração, tais como a origem do montante de recursos investidos (Bustamante et al., 2018; Rodrigues et al., 2013), os custos de desenvolvimento dos projetos (Oliveira et al., 2021; Viani et al., 2017), os custos de plantio, e os custos de manutenção inicial e de manutenção contínua dos programas (Oliveira et al., 2021) também foram identificados, e evidenciam preocupações que vêm surgindo na comunidade acadêmica com essas questões, porém, ainda escassos.

Adicionalmente, alguns autores mencionam o critério do investimento e destacam a importância do seu monitoramento, porém, não fornecem indicadores. Por exemplo, Brewer et al. (2020) destacam a influência dos investimentos em restauração florestal por parte dos governos, da sociedade civil, e do setor privado, enquanto Gatica-Saavedra, Echeverría e Nelson (2017) apontam a importância de utilizar indicadores que permitam aos investidores acompanhar o progresso na restauração como forma de incentivar sua confiança nesses processos e promover novos investimentos; porém, em ambos os casos, não são definidos indicadores a esses efeitos.

Aponta-se, na dimensão econômica, que os custos específicos da restauração são indicadores pouco utilizados, como por exemplo: custos de plantio e manutenção inicial e contínua da restauração. Entretanto, julga-se aqui, de grande relevância considerar os tipos de restauração apropriados para cada ambiente no planejamento de restauração de uma área. Nesse sentido, acredita-se que a pesquisa sobre restauração contribui para a definição de melhores técnicas e tipos de restauração florestal a serem desenvolvidas, e, para a orientação de como essa restauração pode ser mais prolífica, se por regeneração natural, passiva ou assistida, entre outros métodos e técnicas. Portanto, especificar custos relacionados à execução da restauração parecem relevantes para a otimização e êxito desse processo, considerando a melhor opção custo-benefício.

No que diz respeito ao critério da mudança climática, destacam-se trabalhos que consideram a mitigação e uma melhor adaptação às mudanças climáticas por parte das comunidades locais como um benefício resultante da restauração, ressaíndo o sequestro de carbono em biomassa e nos solos como indicadores relevantes a esses efeitos (Paletto et al., 2021; Buckingham et al., 2019; McGinley, Robertson e Friday, 2019; Tongkoom et al., 2018).

Com relação ao critério de gestão de programas e projetos de restauração, salientam-se os estudos sobre indicadores para monitorar seu planejamento, documentação, implementação e impacto. Assim, são utilizados indicadores para examinar se um programa / projeto de restauração possui documentação completa sobre o diagnóstico socioambiental das áreas de restauração, incluindo histórico de uso e cobertura da terra e mapeamento digital das zonas de restauração, a existência de um plano de implementação detalhado que inclui orçamento, cronograma, estudo de viabilidade econômica, registros das intervenções realizadas durante o programa (datas, espécies plantadas, origem de propágulos, custos) e a existência de um registro audiovisual do progresso da restauração (Bustamante et al., 2018; Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013; Balana, Mathijs e Muys, 2010).

Também destacam estudos que utilizam indicadores para monitorar a clareza e a frequência da comunicação entre a gestão dos programas / projetos e os executores em campo, tanto em situações regulares

como naquelas que envolvem dificuldades e desafios, bem como a existência de registros de comunicação com a comunidade local, mídia, comunidade científica e outras partes interessadas (Brewer et al., 2020; Bustamante et al., 2018; Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013; Balana, Mathijs e Muys, 2010). Já em menor medida (menos de 4 trabalhos) foram utilizados indicadores para monitorar a existência de acordos formalizados entre os gestores dos programas / projetos e os proprietários da terra onde a restauração está sendo realizada (McGinley, Robertson e Friday, 2019; Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013), a existência de um protocolo bem definido para monitorar as ações e os resultados dos programas / projetos, as qualificações profissionais e a experiência da equipe técnica responsável pela implementação e gestão dos projetos de restauração (Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013; Brewer et al., 2020), bem como para identificar e documentar a utilização, descoberta ou implementação de quaisquer inovações tecnológicas ou metodológicas que contribuam para o sucesso do projeto de restauração (Viani et al., 2017; Rodrigues et al., 2013).

Um último aspecto que chama a atenção é que a maioria dos estudos analisados utiliza poucos indicadores para monitorar as mudanças em cada um dos critérios. Em média, foram identificados menos de quatro indicadores por critério em cada trabalho analisado. Novamente, essa tendência foi mais forte nos C&I utilizados para avaliar as dimensões econômica, social, da mudança climática e da gestão da restauração do que nos indicadores utilizados para avaliar a dimensão ecológica e, particularmente, a estrutura vegetal e a composição de espécies arbóreas e arbustivas.

5. Conclusão

Mundialmente, esforços significativos estão sendo realizados para implementar planos de restauração que permitam cumprir os compromissos internacionais, bem como as metas regionais e nacionais dos países, no que diz respeito à restauração florestal. A implementação desses planos requer seu monitoramento e avaliação por meio de C&I, isto é, das ferramentas que possam contribuir para assegurar a garantia da qualidade desses processos.

Os resultados deste estudo permitiram identificar os principais C&I, bem como as métricas que têm sido mais utilizadas para o monitoramento e a avaliação mundial da restauração florestal ao longo da última década. Esses resultados servem de subsídio para especialistas da área discutirem e buscarem a um consenso posterior sobre o potencial de aplicação dos C&I identificados e caracterizados na Mata Atlântica brasileira.

Adicionalmente, os resultados do estudo destacam algumas lacunas importantes no conjunto de textos analisados. Primeiro, a atenção dedicada aos C&I da dimensão ecológica da restauração, particularmente, na estrutura vegetal e na composição de espécies arbóreas e arbustivas, em detrimento de outras dimensões igualmente importantes, tais como a econômica, a social, a da mudança climática e a da gestão da restauração.

Em segundo lugar, observa-se a necessidade de utilização de mais indicadores para monitorar e avaliar cada um dos critérios identificados, sobretudo nas dimensões menos abordadas pelos estudos analisados. Considerando a complexidade que abrange a Mata Atlântica brasileira, acredita-se ser útil adotar uma quantidade maior de indicadores para avaliar cada critério e reforçar, em especial, as dimensões que têm sido menos atendidas até o momento. Isso contribuiria para uma melhor compreensão sobre até que ponto essas outras dimensões coadjuvariam na restauração ecológica e na manutenção da integridade dos ecossistemas florestais da Mata Atlântica.

Finalmente, outros estudos poderiam complementar o presente trabalho no sentido de determinar os estágios de regeneração da floresta desde o momento de aplicação dos C&I identificados e o período de avaliação de cada critério e indicador, dentre outras questões aqui não contempladas.

6. Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

(CNPq) no âmbito do Programa de Capacitação Institucional do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e do Instituto Nacional da Mata Atlântica (INMA).

7. Referências

Balana, B. B.; Mathijs, E.; Muys, B. (2010). Assessing the sustainability of forest management: an application of multi-criteria decision analysis to community forests in northern Ethiopia. **Journal of Environmental Management**, 91(6), 1294-1304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.005>

Bandyopadhyay, S.; Maiti, S. K. (2019). Evaluation of ecological restoration success in mining-degraded lands. **Environmental Quality Management**, 29(1), 89-100. DOI: <https://doi.org/10.1002/tqem.21641>

Bardin, L. (1977). **El análisis de contenido**. Ediciones Akal: Madrid.

Brewer, J.; Langston, J. D.; Ferretti-Gallon, K.; Innes, J. L.; Xin, S.; Zhai, H.; Wang, G. (2020). Alleviating forest degradation in the Lancang-Mekong Region requires closing management—measurement gaps. **Journal of Forestry Research**, 31(6), 2033–2051. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01111-z>

Brudvig, L. A. (2011). The restoration of biodiversity: where has research been and where does it need to go? **American Journal of Botany**, 98(3), 549-558. DOI: <https://doi.org/10.3732/ajb.1000285>

Buckingham, K.; Ray, S.; Gallo Granizo, C.; Toh, L.; Stolle, F.; Zoveda, F.; Reyta, K.; Zamora, R.; Ndunda, P.; Landsberg, F.; Matsumoto, M.; Brand, J. (2019). **The Road to Restoration: a guide to identifying priorities and indicators for monitoring forest and landscape restoration**. FAO & World Resources Institute, Rome, Washington, DC. Disponível em: <https://www.decadeonrestoration.org/publications/road-restoration-guide-identifying-priorities-and-indicators-monitoring-forest-and-landscape-restoration>. Acesso em: 30 out., 2023.

Burley, J. (2004). The restoration of research. **Forest Ecology and Management**, 201(1), 83-88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.06.014>

Bustamante, J. M.; Stevanovic, M.; Krotta, M.; Carvalho, E. F. Brazilian State Forest Institutions: Implementation of forestry goals evaluated by the 3L Model. **Land Use Policy**, 79, 531-546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.004>

Carlucci, M. B.; Silva, V. M.; Torezan, J. M. (2021). The Southern Atlantic Forest: Use, Degradation, and Perspectives for Conservation. In: MARQUES, M. C. M.; GRELLE, C. E. V. (ed.). **The Atlantic Forest: History, Biodiversity, Threats and Opportunities of the Mega-diverse Forest**. Cham, Switzerland: Springer Nature. p. 91-111. ISBN 978-3-030-55321-0.

Chazdon, R. L. (2014). **Second Growth: The Promise of Tropical Forest Regeneration in an Age of Deforestation**. University of Chicago Press: Chicago.

Echeverria, C.; Gatica, P.; Fuentes, R. (2013). Habitat Edge Contrast as an Indicator to Prioritize Sites for Ecological Restoration at the Landscape Scale. **Natureza & Conservação**, 11(2):170-175. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/natcon.2013.026>

Elliott, S. D.; Blakesley, D.; Hardwick, K. (2013). **Restoring Tropical Forests: a practical guide**. Royal Botanic Gardens: Kew.

FAO - Food and Agriculture Organization. (2017). **Voluntary guidelines on National Forest Monitoring**. FAO, ISBN 978-92-5-109619-2. Disponível em: https://reliefweb.int/report/world/voluntary-guidelines-national-forest-monitoring?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwp4m0BhBAEiwAsdc4aG0qqzYvyl6xJap1o0z2sPGL2GX7NgQYB9vxmB_Nry3W0rRT1u7FHxoCtPMQAvD_BwE. Acesso em: 20 out., 2023.

Figueiredo, M. S. L.; Weber, M. M.; Brasileiro C. A.; Cerqueira, R.; Grelle, C. E. V.; Jenkins, C. N.; Solidade, C. V.; Thomé, M. T. C.; Vale, M. M.; Lorini, M. L. (2021). Tetrapod Diversity in the Atlantic Forest: Maps and Gaps. *In*: MARQUES, M. C. M.; GRELE, C. E. V. (ed.). **The Atlantic Forest: History, Biodiversity, Threats and Opportunities of the Mega-diverse Forest**. Cham, Switzerland: Springer Nature. p. 185-204. ISBN 978-3-030-55321-0

Gann, G. D.; McDonald, T.; Walder, B.; Aronson, J.; Nelson, C. R.; Jonson, J.; Hallett, J. G.; Eisenberg, C.; Guariguata, M. R.; Liu, J.; Hua, F.; Echeverría, C.; Gonzales, E.; Shaw, N.; Decler, K.; Dixon, K. D. (2019). **International principles and standards for the practice of ecological restoration**. Society for Ecological Restoration, Wiley.

Gatica-Saavedra, P.; Echeverría, C.; Nelson, C. R. (2017). Ecological indicators for assessing ecological success of forest restoration: a world review. **Restoration Ecology**, 25(6), 850-857. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12586>

Holl, K. D. Research Directions in Tropical Forest Restoration. (2017). **Annals of the Missouri Botanical Garden**, 102(2), 237-250. DOI: <https://doi.org/10.3417/2016036>

Johnson, Y. B.; Shear, T. H.; James, A. L. (2012). Identifying ecohydrological patterns in natural forested wetlands useful to restoration design. **Ecohydrology**, 5(3), 368-379. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.227>

Kedzior, R.; Szwaleca, A.; Mundałaa, P.; Skalski, T. (2020). Ground beetle (Coleoptera, Carabidae) life history traits as indicators of habitat recovering processes in postindustrial areas. **Ecological Engineering**, 142, 105615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105615>

Layman, C. A.; Arrington, D. A.; Kramer, P. A.; Valentine-Rose, L.; Dahlgren, C. P. (2010). Indicator Taxa to Assess Anthropogenic Impacts in Caribbean and Bahamas Tidal Creeks. **Caribbean Journal of Science**, 46(1), 12-18. DOI: <https://doi.org/10.18475/cjos.v46i1.a3>

Lee, S. M.; Cha, J. G.; Moon, H. G. (2017). Study on the diagnosis of disturbed forest ecosystem in the Republic of Korea: in case of Daegwallyeong and Chupungryeong. **Journal of Ecology and Environment**, 41, 25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41610-017-0043-2>

Linser, S.; Wolfslehner, B.; Bridge, S. J. R.; Gritten, D.; Johnson, S.; Payn, T.; Prins, K.; Raši, R.; Robertson, G. (2018). 25 Years of Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management: How Intergovernmental C&I Processes Have Made a Difference. **Forests**, 9(9), 578. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9090578>

Londe, V.; Farah, F. T.; Rodrigues, R. R.; Martins, F. R. (2020). Reference and comparison values for ecological indicators in assessing restoration areas in the Atlantic Forest. **Ecological indicators**, 110, 105928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105928>

McGinley, K. A.; Robertson, G. C.; Friday, K. S. (2019). Examining the Sustainability of Tropical Island Forests: Advances and Challenges in Measurement, Monitoring, and Reporting in the U.S. Caribbean and Pacific. **Forest**, 10(11), 946-971. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10110946>

MCPFE - Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe (1993). **Resolution H1 General Guidelines for the Sustainable Management of Forests in Europe**. Second Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, 16-17 June 1993, Helsinki/Finland. Disponível em: https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2022/01/MC_helsinki_resolutionH1.pdf. Acesso em: 21 out. 2023.

Meli, P.; Martínez-Ramos, M.; Rey-Benayas, J. M.; Carabias, J. (2014). Combining ecological, social and technical criteria to select species for forest restoration. **Applied Vegetation Science**, 17(4), 744-753. DOI: <https://doi.org/10.1111/avsc.12096>

Modica, G.; Merlino, A.; Solano, F.; Mercurio, R. (2015). An index for the assessment of degraded Mediterranean forest ecosystems. *Forest Systems*, 24(3), e037. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2015243-07855>

Moravčík, M.; Sarvašová, Z.; Merganič, J.; Schwarz, M. (2010). Forest Naturalness: Criterion for Decision Support in Designation and Management of Protected Forest Areas. **Environmental Management**, 46(6), 908-919. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9506-2>

Meza Mori, G.; Torres Guzmán, C.; Oliva-Cruz, M.; Salas López, R.; Marlo, G.; Barboza, E. (2022). Spatial Analysis of Environmentally Sensitive Areas to Soil Degradation Using MEDALUS Model and GIS in Amazonas (Peru): An Alternative for Ecological Restoration. **Sustainability**, 14(22), 14866. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142214866>

Oliveira, D. C. (2008). Análise de conteúdo temático-categorial: uma proposta de sistematização. **Revista Enfermagem UERJ**, Rio de Janeiro, 16(4), 569-576. Disponível em: <http://files.bvs.br/upload/S/0104-3552/2008/v16n4/a569-576.pdf>. Acesso em: 24 out. 2023.

Oliveira, R.E.; Engel, V. L. (2017). Indicadores de monitoramento da restauração na Floresta Atlântica e atributos para ecossistemas restaurados. **Scientia Plena**, 13(12), 1-13. DOI: 10.14808/sci.plena.2017.127301

Oliveira, R. E.; Engel, V. L.; Loiola, P. P., Moraes, L. F. D.; Vismara, E. S. (2021). Top 10 indicators for evaluating restoration trajectories in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, 127, 107652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107652>

Oliver, I.; Dorrough, J.; Travers, S. (2023). The acceptable range of variation within the desirable stable state as a measure of restoration success. **Restoration Ecology**, 31(1), e13800. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13800>

- Orsi, F.; Geneletti, D.; Newton, A. C. (2011). Towards a common set of criteria and indicators to identify forest restoration priorities: An expert panel-based approach. **Ecological indicators**, 11(2), 337-347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.001>
- Paletto, A.; Pieratti, E.; De Meo, I.; Agnelli, A. E.; Cantiani, P.; Chiavetta, U.; Mazza, G.; Lagomarsino, A. (2021). A multi-criteria analysis of forest restoration strategies to improve the ecosystem services supply: an application in Central Italy. **Annals of Forest Science**, 78, 7. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-020-01020-5>
- Park, S. R.; Kim, S.; Lee, S. W. (2021). Evaluating the Relationships between Riparian Land Cover Characteristics and Biological Integrity of Streams Using Random Forest Algorithms. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 18(6), 3182. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18063182>
- Prach, K.; Durigan, G.; Fennessy, S.; Overbeck, G. E.; Torezan, J. M.; Murphy, S. D. (2019). A primer on choosing goals and indicators to evaluate ecological restoration success. **Restoration Ecology**, 27(5), 917–923. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.13011>
- Ribeiro, S. S.; Oliveira, F. A.; Ferreira, G. C.; Santos, D. E.; Cruz, D. C. (2019). Forest Restoration Evaluation Through Indicators in Areas of Bauxite Mining. **Floresta e Ambiente**, 26(3), e20170812. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.081217>
- Sánchez Tarragó, N. (2021). Descubriendo críticas al acceso abierto mediante la visualización de textos con *Voyant Tools*. **Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud**, 32(1), e1824. Disponível em: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2307-21132021000100012. Acesso em: 24 out. 2023.
- Rodrigues, R. R.; Padovezi, A.; Farah, F. T.; Garcia, L. C.; Sanglade, L. D.; Brancalion, P. H. S.; Chaves, R. B.; Viani, R. A. G.; Barreto, T. E. (2013). **Monitoring Protocol for Forest Restoration Programs and Projects**. Pacto pela Restauração da Mata Atlântica. Disponível em: <https://www.pactomataatlantica.org.br/wp-content/uploads/2021/05/protocolo-de-monitoramento-en.pdf>. Acesso em: 31 out. 2023.
- Sharma, J.; Chaturvedi, R. K.; Bala, G.; Ravindranath, N. H. (2015). Assessing “inherent vulnerability” of forests: a methodological approach and a case study from Western Ghats, India. **Mitigation and adaptation strategies for global changes**, 20(3), 573–590. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9508-5>
- Suganuma, M. S.; Durigan, G. (2015). Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. **Restoration Ecology**, 23(3), 238–251. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12168>
- Takoutsing, B.; Winowiecki, L. A.; Bague´s-Tobella, A.; Vagen, T. G. (2023). Determination of land restoration potentials in the semi-arid areas of Chad using systematic monitoring and mapping techniques. **Agroforestry Systems**, 97, 1289–1305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00720-9>
- Temperton, V. M.; Buchmann, N.; Buisson, E.; Durigan, G.; Kazmierczak, L.; Perring, M. P.; Dechoum, M. S.; Veldman, J. W.; Overbeck, G. E. (2019). Step back from the forest and step up to the Bonn Challenge: how a broad ecological perspective can promote successful landscape restoration. **Restoration ecology**,

27(4), 705-719. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.12989>

Tongkoom, K.; Marohna, C.; Piephob, H. P.; Cadisch, G. (2018). Ecosystem recovery indicators as decision criteria on potential reduction of fallow periods in swidden systems of Northern Thailand. **Ecological indicators**, 95(1), 554-567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.061>

UN – United Nations. (2023). **Reporting on Forests and Sustainable Forest Management in the Caucasus and Central Asia – Focus on Criteria and Indicators**. United Nations. ISBN 978-92-1-117325-3. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2023-04/2228065_E_web.pdf. Acesso em: 23 out., 2023.

Vega, J. A.; Fontúrbel, T.; Merino, A.; Fernández, C.; Ferreiro, A.; Jiménez, E. (2013). Testing the ability of visual indicators of soil burn severity to reflect changes in soil chemical and microbial properties in pine forests and shrubland. **Plant Soil**, 369, 73-91. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1532-9>

Viani, R. A. G.; Holl, K. D.; Padovezi, A.; Strassburg, B. B. N.; Farah, F. T.; Garcia, L. C.; Chaves, R. B.; Rodrigues, R. R.; P. H. S. Brancalion. Protocol for Monitoring Tropical Forest Restoration: Perspectives from the Atlantic Forest Restoration Pact in Brazil. **Tropical Conservation Science**, 10, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1177/1940082917697265>

Voyant Tools. (2023). **About**. Disponível em: <https://voyant-tools.org/docs/#!/guide/about>. Acesso em: 31 out. 2023.

Wan, H.; Guo, P.; Luo, L.; Zhao, Y.; Zhao, Y.; Wang, X. (2022). Different remote sensing indicators reveal the transitions of two states along elevation gradients within the Xinjiang Tianshan Bogda Natural World Heritage Site. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 111, 102842. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102842>

WRI – World Resources Institute. (2024). **Initiative 20x20**. Disponível em: <https://www.wri.org/initiatives/initiative-20x20>. Acesso em: Feb. 18, 2024.

Young, T. P. (2000). Restoration ecology and conservation biology. **Biological Conservation**, 92(1), 73-83. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(99\)00057-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00057-9)

Zangalli, C.; Fockink, G. D.; Almeida, B. R. S.; Oliveira, E.; Goes, M. P.; Nicoletti, M. F.; Floriani, M. M. P.; Kanieski, M. R. (2023). Ecological indicators of forest regeneration in areas of Araucaria Forest in South Brazil. **Ecological Engineering**, 194, 107035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107035>