



Nota Técnica

RECOMENDAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DA REGENERAÇÃO NATURAL NA AMAZÔNIA



SETEMBRO/2023

RESUMO

A condução da regeneração natural (RN) é um método de baixo custo para promover a recomposição e restauração de florestas nativas, reconhecido pela legislação brasileira e adotado em políticas públicas nacionais e estaduais.

Estudos mostram que a RN pode ser uma forma eficiente para restaurar florestas tropicais, principalmente em áreas pouco degradadas. No entanto, em áreas que sofreram intenso uso da terra e que estejam em paisagens muito desmatadas, a RN poderá gerar florestas com baixa integridade ecológica que não serão eficientes na restauração ambiental.

Para que as políticas públicas de recuperação da vegetação nativa atinjam o seu propósito, é preciso ter métricas que permitam avaliar e monitorar a integridade ecológica das florestas em regeneração ao longo do tempo.

Neste documento são propostos indicadores e valores de referência que permitem classificar a integridade ecológica das florestas em regeneração em áreas de terra firme na Amazônia, que tenham entre cinco (5) e vinte anos (20) de tempo de regeneração.

Estas recomendações foram produzidas a partir do projeto de síntese científica REGENERA-Amazônia que analisou o maior banco de dados de florestas em regeneração disponível para a Amazônia e discutiu e refinou os resultados junto à representantes dos órgãos de meio ambiente dos estados da Amazônia, MMA, ICMBio e IBAMA.



CONTEXTO

A condução da regeneração natural (RN) é um método de baixo custo para promover a recomposição e restauração de florestas nativas e prover serviços ecossistêmicos como o sequestro de carbono e a restauração da biodiversidade. O Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG) define a regeneração natural como “o conjunto de processos pelos quais espécies nativas se estabelecem em uma área alterada ou degradada a ser recuperada ou em recuperação, sem que tenham sido introduzidas deliberadamente por ação humana”. A Lei de Proteção da Vegetação Nativa (12.651/2012) considera a RN como uma opção de intervenção para a promoção da regularização ambiental em imóveis rurais, que apresentem passivo ambiental em Áreas de Reserva Legal - ARL, Áreas de Preservação Permanente – APP e Áreas de Uso Restrito - AUR.

A RN ocorre através da germinação de sementes e da rebrota de cepas e raízes. Florestas que regeneram naturalmente em áreas pouco degradadas podem atingir, após 20 anos, quase 80% da fertilidade do solo, do estoque de carbono do solo e da diversidade de árvores presentes em florestas maduras¹. No entanto, a capacidade e velocidade de regeneração da floresta variam enormemente na Amazônia. A floresta regenera lentamente e com baixa diversidade de espécies em áreas que foram muito degradadas pelo uso da terra e por repetidas queimadas e em paisagens muito desmatadas². Isso acontece porque o uso da terra e as queimadas diminuem muito a quantidade e diversidade de sementes e rebrotos no solo e a fragmentação da floresta dificulta a chegada de novas sementes para colonizar as áreas a serem recuperadas³. Além disso, a presença de gramíneas agressivas, como as usadas em pastagens, dificultam a germinação e crescimento das espécies florestais nativas⁴.

CONTEXTO

Em locais muito degradados, como áreas mineradas ou cultivadas com uso de maquinário por muito tempo, a RN pode não ocorrer. Nos locais onde a RN se expressa, ou seja, onde há a colonização e desenvolvimento de uma vegetação nativa, ela pode gerar florestas exuberantes, mas também pode gerar florestas empobrecidas e com limitada provisão de serviços ecossistêmicos^{5,6}. Por isso, é importante avaliar as florestas em regeneração para saber se estão efetivamente restaurando os processos ecológicos.

Diante desta realidade, alguns estados da Amazônia condicionam a aceitação da RN como método de recomposição da vegetação nativa à verificação da sua expressão em campo. Os estados do Mato Grosso, Acre, Pará, Amazonas e Rondônia apresentam em seus Programas de Regularização Ambiental (PRA) a necessidade do proprietário rural ou do órgão ambiental verificarem se está ocorrendo regeneração da vegetação nativa e se tal regeneração está sendo eficiente para a regularização do passivo ambiental.

O principal desafio para proprietários/possuidores de terra e órgãos ambientais é saber se a regeneração natural está sendo eficiente como um método de recomposição da vegetação nativa, pois a maioria dos estados não possui critérios claros para tal avaliação. Nestes casos, a avaliação fica a cargo dos técnicos de campo e proprietários rurais, que através de observações de campo verificam de forma subjetiva se a RN está acontecendo e se está efetivamente recompondo a vegetação nativa. Isso resulta em um alto grau de incerteza sobre o sucesso da restauração e na insegurança jurídica para proprietários/possuidores e órgãos ambientais. Tal incerteza também dificulta a tomada de decisão sobre como e onde utilizar a RN para restaurar florestas em Unidades de Conservação.

CONTEXTO

Para auxiliar na qualificação da RN, propomos o uso do conceito de integridade ecológica da regeneração natural, e apresentamos indicadores e valores de referência para caracterizar a integridade ecológica das florestas regenerantes, com idades de 5 a 20 anos, na Amazônia Brasileira.



INTEGRIDADE ECOLÓGICA DA REGENERAÇÃO NATURAL

A integridade ecológica é definida como: "A capacidade de um sistema ecológico sustentar e manter uma comunidade de organismos que possui composição de espécies, diversidade e organização funcional comparáveis aos habitats naturais dentro de uma região e em uma determinada faixa de idade"⁷. A idade de florestas em regeneração é medida como o tempo desde que a área foi isolada dos fatores de degradação ou o tempo decorrido desde o início da colonização pela vegetação nativa. Florestas com alta integridade ecológica são mais resilientes e, portanto, capazes de resistir e se recuperar de perturbações de baixa a média intensidade, sendo elas naturais ou causadas pelos humanos.

INTEGRIDADE ECOLÓGICA DA REGENERAÇÃO NATURAL

Uma floresta regenerante tem alta integridade quando suas características ecológicas, medidas pelos indicadores de composição, estrutura e função, ocorrem dentro de uma faixa natural ideal para aquela região e classe de idade. Florestas regenerantes com alta integridade ecológica, ou seja, que seguem uma trajetória sucessional ótima, ocorrem em situações em que há pouca ou nenhuma limitação aos processos de sucessão secundária, colonização e desenvolvimento da vegetação (Figura 1).

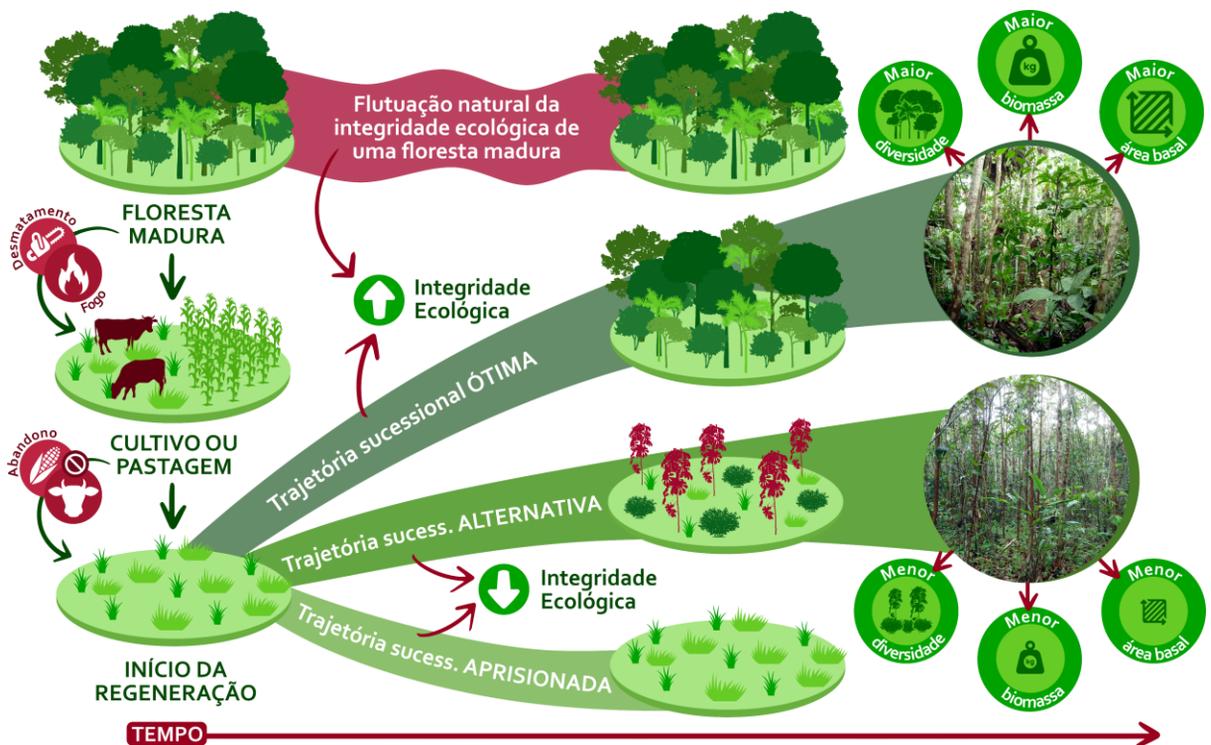


Figura 1. Diagrama ilustrando trajetórias de regeneração com diferentes níveis de integridade ecológica. A faixa verde mais escuro representa a trajetória sucessional ótima (de alta integridade ecológica), que ocorre quando há baixa intensidade de uso prévio do solo e elevada cobertura florestal na paisagem, gerando florestas com altos valores dos indicadores ecológicos (à direita). As faixas abaixo, em tons mais claros de verde, representam trajetórias com baixa integridade ecológica.

INTEGRIDADE ECOLÓGICA DA REGENERAÇÃO NATURAL

A integridade ecológica da regeneração natural é reduzida em áreas agrícolas intensamente manejadas (por exemplo, com uso repetido de fogo, uso de maquinário pesado e aplicação de herbicidas) e que estejam localizadas em paisagens extensamente desmatadas e fragmentadas (Figura 2). Nestas situações, o processo de sucessão florestal fica estagnado, sem que a vegetação consiga atingir os mesmos níveis de biodiversidade e estoque de biomassa das florestas originais, ainda que apresente um dossel fechado em poucos anos. Nesses casos, a regeneração natural não funcionará, ou resultará em florestas com baixa integridade ecológica e bastante aquém do potencial daquela região para acúmulo de biodiversidade e biomassa ao longo das primeiras quatro décadas de sucessão ecológica.

Para caracterizar a integridade ecológica é preciso comparar os valores dos indicadores de tal floresta em regeneração com valores de referência que são extraídos de florestas que seguem uma trajetória sucessional ótima naquela região (Figura 2). A integridade ecológica é interpretada a partir da análise conjunta de indicadores de diversidade, estrutura e função.

INTEGRIDADE ECOLÓGICA DA REGENERAÇÃO NATURAL

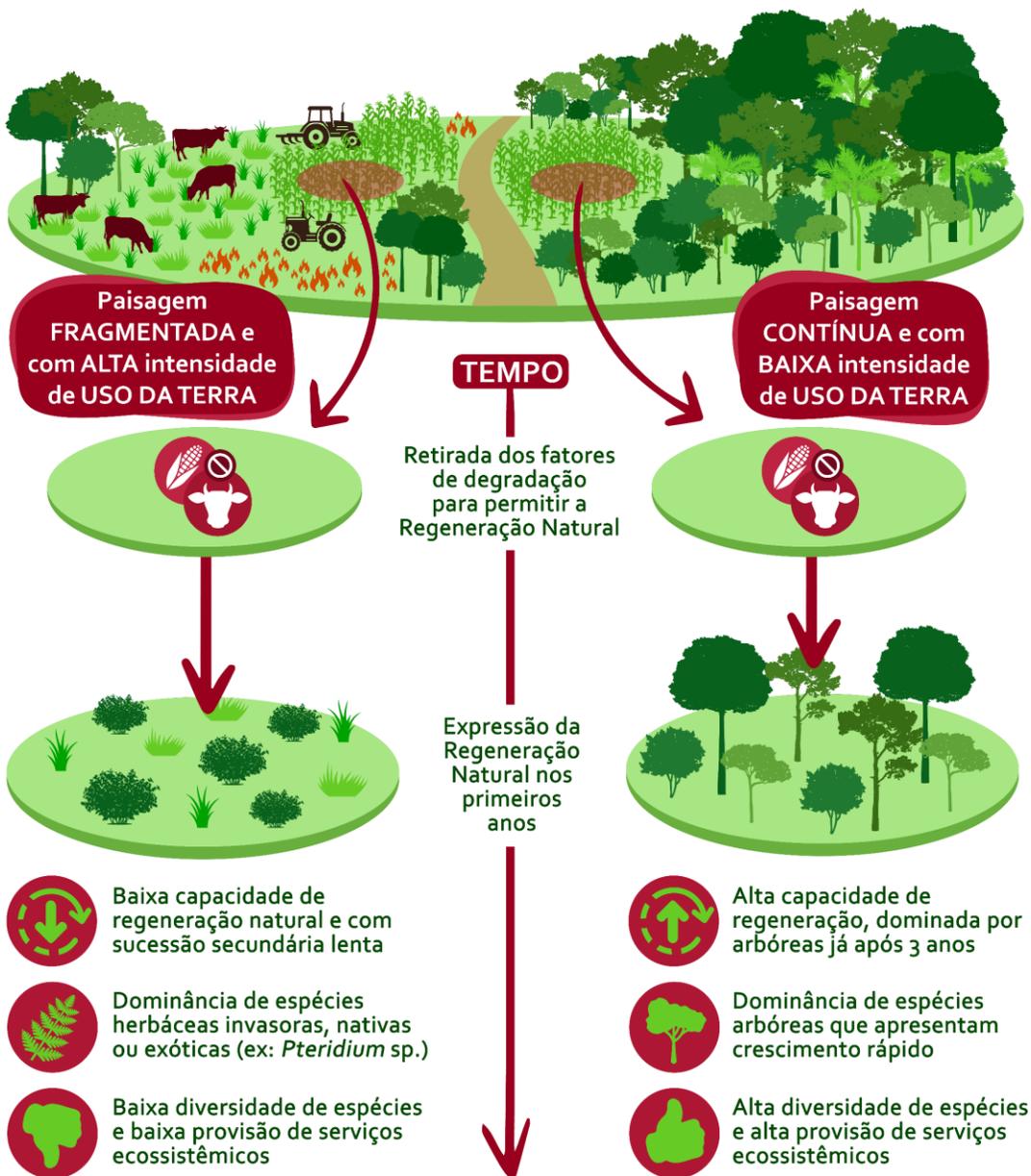


Figura 2. Esquema ilustrando dois exemplos de trajetórias que a regeneração natural pode seguir em diferentes condições da paisagem e históricos de uso do solo. À esquerda a regeneração natural acontece com baixa integridade devido à alta fragmentação da paisagem e intensidade do uso anterior da terra. À direita, a regeneração natural acontece com alta integridade ecológica pois está localizada em uma paisagem com extensa cobertura florestal e com um histórico de uso pouco intensivo do solo.

INDICADORES ECOLÓGICOS

Apresentamos a seguir indicadores ecológicos medidos em campo e valores de referência que permitem verificar a integridade ecológica da regeneração natural no bioma Amazônia.

INDICADORES DE ALTA INTEGRIDADE ECOLÓGICA NA AMAZÔNIA

A partir da análise de dados coletados em 448 florestas em regeneração na Amazônia (Figura 5), identificamos os indicadores que melhor distinguem os níveis de integridade ecológica e estimamos os valores de referência que representam as trajetórias sucessionais ótimas ao longo do tempo (entre 5 e 20 anos) e para todos os estados da Amazônia brasileira. Os métodos usados nestas análises estão descritos no final deste documento.

As métricas da vegetação arbórea que são mais negativamente afetadas pela degradação e, portanto, são bons indicadores de integridade ecológica são: biomassa, área basal, heterogeneidade estrutural (Coeficiente de Gini), e riqueza de morfoespécies. As demais métricas testadas não apresentaram bom desempenho como indicadores. Vale dizer que a métrica de densidade de árvores, que é muito utilizada em monitoramentos, não distingue bem a integridade ecológica de florestas regenerantes entre 5 e 20 anos de idade.

Os valores de referência apresentados na Tabela 1 e especializados nos mapas da Figura 3, representam trajetórias da regeneração natural que tem alta integridade ecológica, isto é, que não possuem limitação à sucessão ecológica e portanto, seguem trajetórias ótimas de sucessão. Estes valores de referência podem ser usados no monitoramento de florestas em regeneração (ver mapa de incerteza; Figura 4). Florestas em regeneração que apresentem valores mais baixos do que os valores de referência para determinado indicador e idade, estão aquém da trajetória ótima, ou seja, apresentam alguma limitação ao processo de sucessão e podem necessitar de práticas de manejo para acelerar a restauração.

INDICADORES ECOLÓGICOS

Os valores de referência variam com as condições ambientais da Amazônia, e isso deve ser levado em consideração no monitoramento. Os valores de referência estimados para as trajetórias sucessionais ótimas na Amazônia variaram principalmente com as condições do solo (principalmente densidade do solo e conteúdo de argila) (Figura 3).

Os indicadores área basal, heterogeneidade estrutural e biomassa foram os que mais variaram ao longo da Amazônia, com variação de respectivamente 51%, 35% e 40% entre os valores mínimos e máximos estimados na Amazônia (Figura 3). A riqueza de espécies variou apenas 11% entre os valores mínimos e máximos estimados ao longo da Amazônia (Figura 3). A tabela 1 apresenta os valores médios por estado e para toda a região Amazônica e os desvios padrão que indicam quanto que os valores variam ao redor da média. Os mapas da Figura 3 indicam as regiões com menores e maiores valores para cada indicador.

Florestas em regeneração que apresentem valores menores do que os valores de referência apresentados, ou seja, fora da faixa ótima (Exemplo linha 2 e 3, figura 6A), possuem baixa integridade ecológica e limitada capacidade de cumprir com os objetivos da recomposição da vegetação nativa. Estas florestas regenerantes de baixa integridade se beneficiariam de intervenções para acelerar ou incrementar o processo de sucessão secundária. Tais intervenções podem abranger desde o manejo de espécies invasoras até o plantio de enriquecimento. As decisões sobre a necessidade de manejo e sobre qual intervenção deve ser aplicada, devem ser apoiadas pela comparação dos valores de cada indicador com os valores de referência. Sugere-se utilizar pelo menos um indicador de cada categoria: estrutura, função e diversidade.

INDICADORES ECOLÓGICOS

Quando a RN apresentar indicadores com valores muito aquém dos valores de referência, ou quando as áreas não apresentarem nenhuma expressão de regeneração da vegetação, a regeneração natural não deve ser considerada como uma opção para restauração florestal (Exemplo linha 4 da figura 6A).

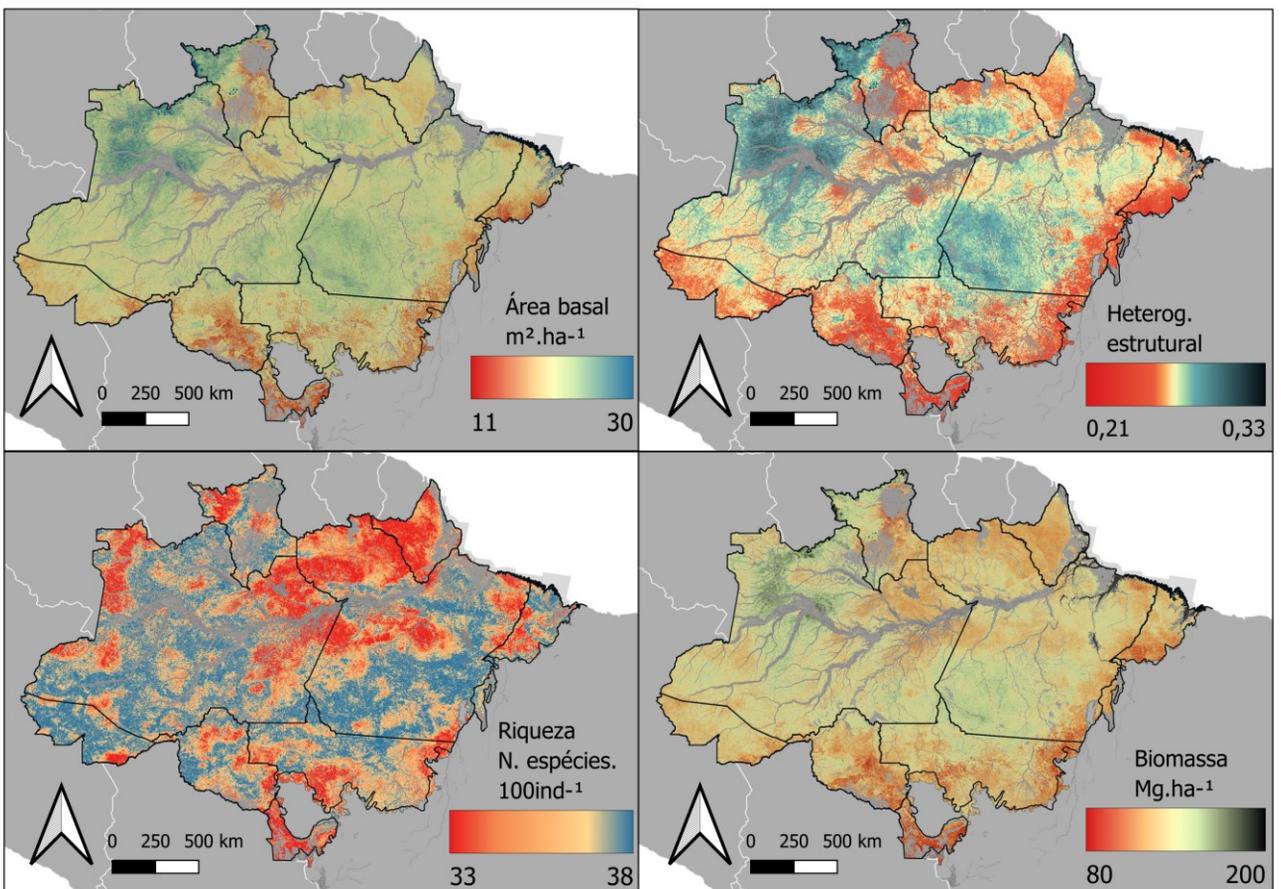


Figura 3. Mapas dos valores estimados para o potencial de alta integridade ecológica para a regeneração da floresta amazônica aos 20 anos de idade. Os valores indicam uma simulação do cenário ideal de regeneração natural de alta integridade, isto é, os valores dos indicadores em florestas que regeneram sob baixa intensidade de uso prévio do solo. Usamos indicadores ecológicos para estrutura (A) área basal; (B) Heterogeneidade estrutural), diversidade (C) Riqueza de espécies para 100 indivíduos amostrados e função (D) Biomassa aérea.

INDICADORES ECOLÓGICOS

INDICADORES E VALORES DE REFERÊNCIA SUGERIDOS

- Recomendamos o uso conjunto de pelo menos um indicador para cada categoria: Função, Estrutura e Diversidade.
- Recomendamos o uso da biomassa como indicador de função, área basal e heterogeneidade estrutural como indicadores de estrutura, e riqueza de morfoespécies como indicador de diversidade.
- Recomendamos o uso dos valores de referência, para cada indicador e estado, listados na Tabela 1, para a avaliação da integridade ecológica de florestas em regeneração com pelo menos 5 anos de idade, em áreas de terra firme na Amazônia.
- Florestas em regeneração que possuem indicadores ecológicos com valores iguais ou superiores aos valores médios (\pm desvio padrão) de referência, apresentados na tabela 1, podem ser consideradas como de alta integridade, e portanto, estão cumprindo a função de restauração do ecossistema original. A variação natural dos valores (Mapas da Figura 3) deve ser levada em consideração.

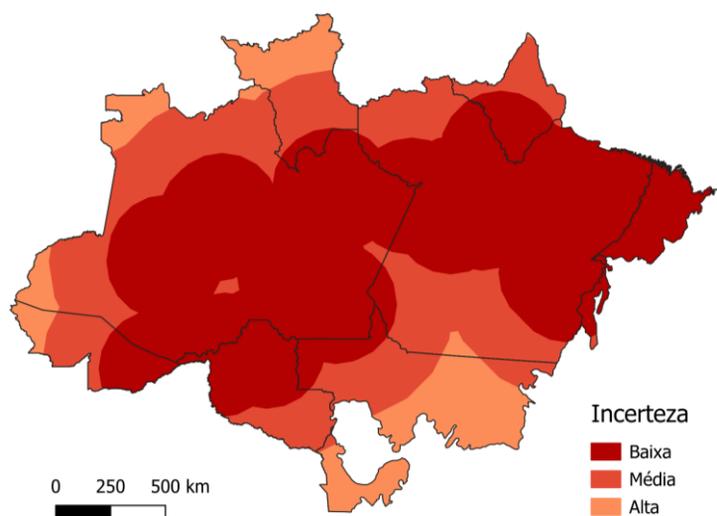


Figura 4. Mapa de incerteza dos valores de referência. Quanto mais próximo aos pontos de amostragem usados na modelagem (Figura 5), menor a incerteza sobre os valores de referência sugeridos na Tabela 1.

POR QUE ESTES INDICADORES?

- São de baixo custo e de simples amostragem.
- São mensuráveis em campo e têm valores de referência desde os 5 anos até a floresta madura. Portanto, se aplicam ao longo da trajetória sucessional.
- Possuem alta sensibilidade aos impactos antrópicos e são relativamente pouco afetados pela variação de condições ambientais na Amazônia.
- Estão associados a serviços ecossistêmicos como sequestro de carbono (biomassa), conservação da biodiversidade (riqueza de espécies) e disponibilidade de habitat para a fauna (índice de Gini de heterogeneidade estrutural).

Tabela 1. Média e variação (Desvio padrão; \pm DP) dos valores estimados para os indicadores para florestas em regeneração serem consideradas de alta integridade ecológica para cada estado do bioma Amazônia.

Idade da regeneração/ Estados	5 anos		10 anos		15 anos		20 anos	
	Média	\pm DP	Média	\pm DP	Média	\pm DP	Média	\pm DP
Área Basal (m²/ha)								
Acre	8,9	1,2	14,3	1,2	17,4	1,2	19,6	1,2
Amazonas	10,9	1,7	16,3	1,7	19,4	1,7	21,6	1,7
Amapá	9,5	1,3	14,8	1,3	17,9	1,4	20,2	1,7
Maranhão	8,4	2,1	13,7	2,1	16,9	2,2	19,6	3,8
Mato Grosso	8,9	2,1	14,2	2,1	17,4	2,1	19,6	2,1
Pará	10,5	1,6	15,8	1,6	18,9	1,6	21,2	1,7
Rondônia	8,3	2,1	13,6	2,1	16,8	2,1	19,0	2,1
Roraima	10,4	3,2	15,8	3,2	18,9	3,3	21,2	3,4
Tocantins	7,6	1,4	12,9	1,4	16,0	1,4	18,2	1,5
Média para a Amazônia	10,1	2,0	15,5	2,0	18,6	2,3	20,8	2,2
Heterogeneidade estrutural (índice de Gini; sem unidade)								
Acre	0,19	0,01	0,23	0,01	0,25	0,01	0,27	0,01
Amazonas	0,20	0,01	0,24	0,01	0,26	0,01	0,28	0,01
Amapá	0,20	0,01	0,23	0,01	0,25	0,01	0,27	0,01
Maranhão	0,19	0,01	0,23	0,01	0,25	0,02	0,27	0,03
Mato Grosso	0,19	0,01	0,23	0,01	0,25	0,01	0,27	0,01
Pará	0,20	0,01	0,24	0,01	0,26	0,01	0,28	0,01
Rondônia	0,19	0,01	0,23	0,01	0,25	0,01	0,26	0,01
Roraima	0,20	0,02	0,24	0,02	0,26	0,02	0,28	0,02
Tocantins	0,18	0,01	0,22	0,01	0,24	0,01	0,26	0,01
Média para a Amazônia	0,19	0,01	0,23	0,01	0,25	0,01	0,27	0,01
Riqueza em espécies (número de espécies/100 indivíduos)								
Acre	24	1	30	1	34	1	37	1
Amazonas	23	1	30	1	34	1	36	1
Amapá	21	1	28	1	32	1	34	1
Maranhão	23	1	29	1	33	1	36	1
Mato Grosso	23	1	29	1	33	1	36	1
Pará	23	2	29	2	33	2	36	1
Rondônia	23	1	30	1	34	1	36	1
Roraima	23	1	29	1	33	1	36	1
Tocantins	24	1	30	1	34	1	37	1
Média para a Amazônia	22,8	1,5	29,5	1,5	33,4	1,5	36,2	1,5
Biomassa (Mg/ha)								
Acre	51,5	6,8	91,3	6,8	114,6	6,8	131,1	6,9
Amazonas	59,3	9,9	99	9,7	108	6,6	124,9	8
Amapá	45	7,3	84,7	6,8	122,2	9,5	139	9,9
Maranhão	45,5	11,1	85,2	10,7	108,5	10,6	125,8	12,5
Mato Grosso	48,3	13	88,2	13	111,5	13	128	13
Pará	56,1	9,6	95,9	9,5	119,2	9,5	135,9	9,8
Rondônia	45,7	11,5	85,6	11,5	108,9	11,5	125,4	11,5
Roraima	57	14,8	96,3	14,1	119,4	13,9	137,5	16
Tocantins	44,4	7,5	84,2	7,3	107,5	7,3	124,2	7,8
Média para a Amazônia	54,5	11,5	94,9	11,4	117,5	11,3	134,3	11,7

RECOMENDAÇÕES FINAIS

Neste documento, fornecemos valores de referência para definir a integridade ecológica da regeneração natural de florestas de terra firme na Amazônia. Sugerimos que os órgãos ambientais utilizem esses indicadores em normativas legais e/ou manuais de monitoramento da regeneração natural usada como método de recomposição da vegetação nativa. Destacamos a necessidade de elaboração de protocolos de monitoramento que sejam padronizados para toda a Amazônia, a fim de facilitar a aplicação e permitir a validação e refinamento dos valores de referência.

Com base nos conceitos mais atuais de restauração e nas análises de dados de florestas em regeneração apresentadas neste documento, recomendamos:

1. Considerar a integridade ecológica da RN no monitoramento do passivo ambiental para garantir a efetiva restauração das funções e serviços ecossistêmicos;
2. Utilizar em conjunto medidas de biomassa, área basal, heterogeneidade estrutural, e riqueza de morfoespécies como indicadores conjuntos da integridade ecológica das florestas em regeneração (≥ 5 anos de idade).
3. Os valores de referência propostos são valores médios para a Amazônia brasileira e para cada estado. Estes valores foram derivados do maior conjunto de dados disponíveis no momento, mas ainda não cobrem toda a região, e quanto mais distante dos locais de amostragem, maior é a incerteza dos valores de referência (Figura 4). . Portanto, devem ser atualizados e refinados para cada região conforme sejam adquiridos novos dados. Sugerimos utilizar os dados gerados pelo monitoramento dos Projetos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRADAs) para validar e refinar os valores de referência aqui propostos. Este grupo de especialistas se coloca à disposição para auxiliar em análises de dados para validação e refinamento dos indicadores aqui propostos.

METODOLOGIA

Estas recomendações foram produzidas a partir do projeto de síntese científica REGENERA-Amazônia que analisou o maior banco de dados de florestas em regeneração disponível para a Amazônia e discutiu e refinou os resultados em workshops e discussões junto a representantes dos órgãos de meio ambiente dos estados da Amazônia, MMA, ICMBio e IBAMA.

Com o objetivo de identificar indicadores e valores de referência para avaliar a integridade ecológica da RN na Amazônia, foram realizadas as seguintes análises: (1) analisamos estatisticamente como os valores de sete métricas da vegetação variavam com o histórico de uso da terra, com as condições ambientais e ao longo do tempo de regeneração; (2) a partir da análise anterior foram gerados modelos matemáticos que permitem prever os valores de cada métrica de acordo com a idade de regeneração, o histórico de uso do solo e as condições ambientais; (3) a partir destes modelos, estimamos para toda a Amazônia os valores de cada indicador para as trajetórias sucessionais ótimas, que foram geradas atribuindo-se valores mínimos das variáveis de histórico de uso do solo (Giles et al. in prep.).

As métricas testadas estão relacionadas à estrutura da vegetação (área basal, densidade de caules, índice de heterogeneidade estrutural e diâmetro máximo), funcionamento do sistema (biomassa) e diversidade de espécies nativas (riqueza de espécies e índice de diversidade de Hill $q=1$). Estas métricas foram escolhidas pois são comumente usadas em inventários florestais e são derivadas de medidas fáceis de se obter no campo como densidade de indivíduos, diâmetro das árvores e número de (morfo) espécies.

METODOLOGIA

Todas as métricas foram calculadas a partir de 150.741 caules de indivíduos arbóreos acima de 5 cm de diâmetro medido à altura do peito (DAP), que foram amostrados em 448 parcelas alocadas em florestas em diferentes estágios sucessionais e distribuídas em 23 localidades em área de terra firme dentro do bioma Amazônia (Figura 5).

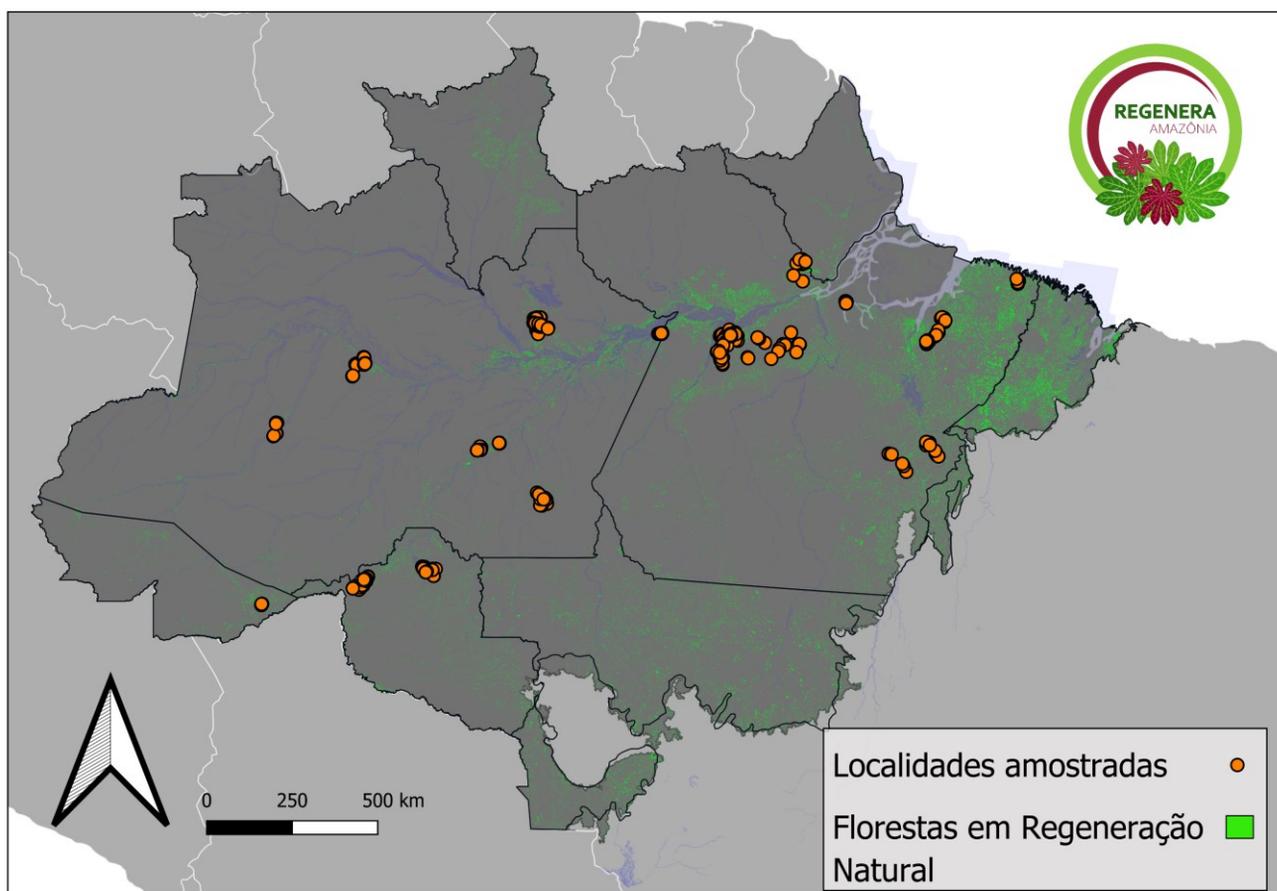


Figura 5. Localização das parcelas em florestas em regeneração utilizadas para definir os indicadores de integridade ecológica. O mapa mostra a cobertura por florestas em regeneração no ano de 2019 e a localização das 448 parcelas distribuídas em 23 locais na região amazônica.

METODOLOGIA

Indicadores ecológicos são variáveis que fornecem informações sobre a condição atual de um ecossistema. Nesse contexto, indicadores devem refletir mudanças na estrutura, diversidade e função da regeneração natural. Escolhemos os melhores indicadores dentre as métricas analisadas com base nos seguintes critérios: (i) sensibilidade aos impactos antropogênicos, representados pelo histórico de uso do solo (pois define a capacidade do indicador de distinguir florestas com diferentes níveis de integridade ecológica), e (ii) baixa dependência da localidade de amostragem (pois permite generalização para o bioma). Levamos em consideração a disponibilidade de dados e facilidade de aferição em campo. (Giles et al. in prep.).

Os modelos estatísticos construídos para descrever a relação de cada indicador com a idade de regeneração, histórico de uso do solo e condições ambientais (climática, edáfica, topográfica, etc) foram baseados em modelos mistos lineares. Após selecionar os melhores indicadores, utilizamos essas equações matemáticas para estimar os valores de cada indicador na trajetória sucessional ótima, que é representada por valores mínimos de histórico de uso do solo, e, posteriormente, extrair os valores de referência (Figura 6). Geramos um mapa para cada indicador (Figura 3), onde cada pixel contém o valor estimado para a trajetória sucessional ótima em determinada idade. A seguir, calculamos a média e o desvio padrão dos valores de cada indicador ecológico dentro de cada estado e para toda a Amazônia (Tabela 1) em quatro idades sucessionais: 5, 15, 10 e 20 anos.

METODOLOGIA

Os indicadores propostos aqui são aplicáveis à florestas em regeneração natural que estejam há pelo menos 5 anos protegidas dos fatores de degradação. Para avaliar o potencial de regeneração natural de áreas em uso agrícola ou degradadas sem interrupção dos fatores de degradação, sugere-se verificar os indicadores apresentados pela publicação “Recomendações para o monitoramento da restauração na Amazônia”, produzido pela Aliança pela Restauração da Amazônia (<https://aliancaamazonia.org.br/wp-content/uploads/2022/11/monitoramento-alianca-web2.pdf>).

Ressaltamos que essa é a primeira abordagem derivada de métricas quantitativas obtidas em parcelas de campo utilizando o maior banco de dados de florestas regenerantes disponíveis para a Amazônia. O conjunto de indicadores apresentados foram validados cientificamente e são considerados de fácil aquisição em campo.

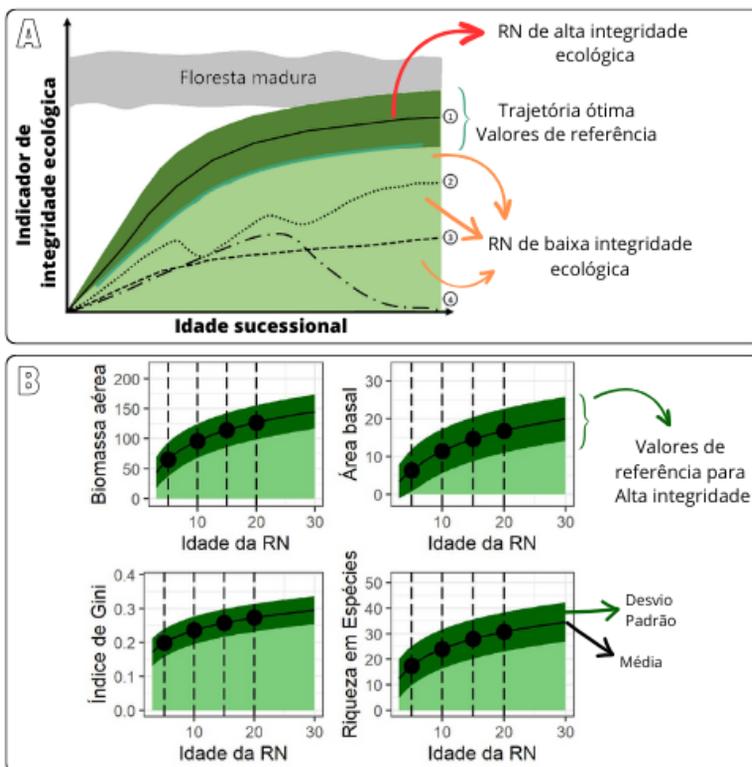


Figura 6. Exemplos de trajetórias sucessionais de alta e baixa integridade ecológica. A) Esquema conceitual para trajetória sucessionais da regeneração natural. B) Exemplo de limiar inferior dos valores de referência para cada indicador ecológico em florestas regenerando de 5, 10, 15 e 20 anos (linha vertical tracejada) representados pelos círculos cruzando a linha tracejada de idade. Biomassa aérea em $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$; Área Basal $\text{m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$; Índice de Gini (Heterogeneidade Estrutural); Riqueza em Espécies (Número de espécies para cada 100 indivíduos amostrados).

COMO MEDIR OS INDICADORES?

Para aplicar os valores de referência sugeridos aqui, devem ser feitas parcelas de amostragem em campo, onde deverá ser medido o diâmetro à altura do peito (DAP), e identificadas as espécies (ou morfoespécies), de todos os indivíduos arbóreos com DAP ≥ 5 cm. Quando um indivíduo possui mais de um caule, todos os caules ≥ 5 cm desse indivíduo devem ser medidos. O tamanho da parcela deve ser registrado e o número de parcelas deve ser proporcional à área em restauração (veja “Recomendações para o monitoramento da restauração na Amazônia”, da Aliança pela Restauração da Amazônia).

Área Basal

A área basal é a área seccional do tronco de uma árvore. É calculada com base na fórmula da área do círculo, a partir do DAP (em centímetros) de cada caule (≥ 5 cm) medido em campo. A área basal (medida em m²/ha) é calculada como a somatória da área basal de cada caule ≥ 5 cm medido dentro da parcela, dividido pela área da parcela (em hectare):

$$\text{Área Basal} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi * DAP^2}{40.000}}{\text{Área da parcela}}$$

COMO MEDIR OS INDICADORES?

Heterogeneidade estrutural (Coeficiente de Gini):

A heterogeneidade estrutural é medida pelo coeficiente de Gini, e é uma medida de desigualdade de tamanhos das árvores, ou seja, de variação de tamanho de DAPs das árvores amostradas. Essa métrica está relacionada à coexistência de árvores de diferentes tamanhos, idades e taxas de crescimento, e reflete a estratificação vertical da floresta e sua complexidade estrutural, os quais estão associados à disponibilidade de habitat para diferentes espécies da fauna. Essa métrica é correlacionada com a diversidade de espécies, sendo, portanto, um bom indicador de integridade ecológica.

O coeficiente de Gini varia de 0 a 1, sendo que maior o valor, mais desiguais são os DAPs, isto é, mais heterogênea é a estrutura da floresta. É calculado como a soma das diferenças no DAP de todos os pares de todas as árvores da parcela (N árvores), dividido por $2 * N^2 * \text{DAP médio de todas as árvores}$.

Biomassa

A biomassa arbórea acima do solo é um fator que determina em grande parte o funcionamento do ecossistema pois representa a produtividade da floresta e seu estoque de carbono, e está associada à produção de serapilheira e concentração de carbono orgânico no solo.

A biomassa foi estimada aplicando-se a equação alométrica proposta por Chave et al. (2014)⁸, que se baseia no maior conjunto de dados de árvores de florestas tropicais, incluindo espécies pioneiras e secundárias. Essa equação se baseia nas medidas de DAP, densidade da madeira (obtida do banco de dados TRY) e um índice de condição ambiental. A biomassa por parcela é calculada como a somatória da biomassa de cada árvore dividida pela área da parcela amostrada (em hectare), e tem como unidade Mg/ha.

COMO MEDIR OS INDICADORES?

Riqueza de espécies

A riqueza de espécies é simplesmente a contagem do número de espécies dentro de certa área. A riqueza de espécies depende do tamanho da amostra e de quão abrangente foi o inventário para registrar as espécies contidas na comunidade. Como o número de espécies depende mais do número de árvores medidas do que da área da parcela amostrada, a riqueza de espécies é expressa como o número de espécies encontradas em 100 indivíduos amostrados. Quando não é possível identificar a identidade de cada espécie (nome científico), pode-se separá-las por morfo-espécie. Cada morfo-espécie representa uma espécie diferente, que pode ser distinguida em campo, mas para a qual não se sabe o nome científico.

Pode-se selecionar 100 indivíduos em campo e contar quantas morfo-espécies são encontradas. Ou pode-se amostrar o número de espécies dentro de parcelas e depois aplicar análises de rarefação e extrapolação utilizando softwares estatísticos como o software R.

ATENÇÃO!

Os indicadores e valores de referência se referem à comunidade de árvores e palmeiras e não inclui outras formas de vida como ervas, epífitas e cipós. Os valores de referência recomendados só devem ser aplicados a áreas de terra firme da Amazônia Brasileira e a florestas em regeneração com pelo menos 5 anos de idade.

Para o monitoramento da regeneração com menos de cinco (5) anos de idade, recomendamos acessar as "Recomendações para o monitoramento da restauração na Amazônia", produzido pela Aliança pela Restauração da Amazônia.

LITERATURA CITADA

1. Poorter, L. et al. Multidimensional tropical forest recovery. 1–8 (2021).
2. Heinrich, V. H. A. et al. Large carbon sink potential of Amazonian Secondary Forests to mitigate climate change. *Nat. Res.* 1, 4–6 (2021).
3. Jakovac, C. C. et al. The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for the restoration of tropical forests. *Biol. Rev.* (2021) doi:10.1111/brv.12694.
4. Vieira, D. L. M. et al. Active Restoration Initiates High Quality Forest Succession in a Deforested Landscape in Amazonia. *Forests* 12, 1022 (2021).
5. Massoca, P. E. dos S., Jakovac, A. C. C., Bentos, T. V., Williamson, G. B. & Mesquita, R. de C. G. Dinâmica e trajetórias da sucessão secundária na Amazônia central. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi - Ciênc. Nat.* 7, 235–250 (2012).
6. Berenguer, E. et al. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. *Glob. Change Biol.* 20, 3713–3726 (2014).
7. Rosenfield, M. F. et al. Ecological integrity of tropical secondary forests: concepts and indicators. *Biol. Rev.* 98, 662–676 (2023).
8. Chave, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Glob. Change Biol.* 20, 3177–3190 (2014).
9. Giles, A. L. et al. Ecological indicators for evaluating Amazon forest regeneration. In prep.

COMO CITAR ESTE DOCUMENTO: REGENERA-Amazônia, 2023. Recomendações para o monitoramento da regeneração natural na Amazônia. Manaus, 24p. Disponível em <http://regenera-amaz.pdbff.org.br/publicacoes/>. DOI: 10.5281/zenodo.8347140

SOBRE ESTA NOTA TÉCNICA

Esta nota técnica foi elaborada pelo grupo de trabalho do Projeto de síntese científica REGENERA-Amazônia, financiado pelo Sinbiose/Cnpq e coordenado por Rita Mesquita (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA). Este documento é fruto da pesquisa científica e de dois workshops de discussão com representantes das organizações de meio ambiente dos estados da Amazônia (realizado em Belém 22-23 de junho de 2022) e com representantes do MMA, ICMBio e IBAMA (realizado em Brasília 22-23 de março de 2023).

Este documento foi organizado por André Giles (INPA; UFSC), Catarina C. Jakovac (UFSC), Rita Mesquita (INPA) e Ima Vieira (MPEG). São co-autores deste documento: André Schatz Pellicciotti (SEMA-ACRE), Alexandre Bonesso Sampaio (ICMBio), Daniel Mascia Viera (EMBRAPA), Paulo Massoca (Universidade de Indiana em Bloomington), Juliana Schietti de Almeida (UFAM), Milena Rosenfield (The Nature Conservancy), Danielle Celentano (Instituto Socioambiental/ISA), Geovani Marx Rosa (SEDAM-Rondônia), Igor Costa Lemes (SEMA-Amapá), Hélio Brito dos Santos Junior (SEMA-Pará), Luiz Edinelson Cardoso (SEMA-Pará), Raquel Caroline Alves Lacerda (IBAMA), Liliane Martins Minhós (IPAAM), Marciel José Ferreira (UFAM), João Siqueira (MapBiomas), Luís Oliveira Jr (IMAZON), Isis Felipe de Freitas e Mateus Motter Dala Senta e (MMA-Secretaria Nacional de Biodiversidade, Florestas e Direitos Animais), Pedro Brancalion (Esalq), Luiz Aragão (INPE), Danilo Roberti Alves de Almeida (ESALQ), Ana Albernaz (MPEG), Gil Vieira (INPA), Mario Marcos do Espírito Santo (UNIMONTES).

ORGANIZAÇÃO



FINANCIADORES



APOIO E EQUIPE



Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade



Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental

Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA



Formatação e design por

