



Identificando Áreas Prioritárias para Restauração Bioma Amazônia

AMAZÔNIA
2030 

FEVEREIRO 2022

Sobre o Amazônia 2030

Como desenvolver a Amazônia, aproveitando de forma sustentável seus recursos naturais?

Para responder a essa pergunta, quatro reconhecidas organizações de pesquisa brasileiras se juntaram para fazer o mais completo plano de ações para a Amazônia dar um salto de desenvolvimento humano e econômico preservando seus recursos naturais até 2030. Trata-se do projeto Amazônia 2030. O projeto é uma iniciativa conjunta do Instituto do Homem e do Meio Ambiente da Amazônia (Imazon) e do Centro de Empreendedorismo da Amazônia, ambos situados em Belém, com a Climate Policy Initiative (CPI) e o Departamento de Economia da PUC-Rio, localizados no Rio de Janeiro. Pesquisadores têm gerado conhecimento a partir de estudos empíricos, análises da literatura acadêmica e consultas documentais, bem como das experiências dos povos da floresta, empresários, empreendedores e agentes públicos, entre outras fontes. Esses documentos reunirão recomendações práticas, que poderão ser aplicadas por agentes privados e públicos.

Contato

Assessoria de Imprensa

O Mundo que Queremos

amazonia2030@omundoquequeremos.com.br

Amazônia 2030

contato@amazonia2030.org.br

Responsável pela Pesquisa

Instituto Internacional para Sustentabilidade

contato@iis-rio.org

Bernardo Strassburg

b.strassburg@iis-rio.org



Ficha Técnica

Autores

Bernardo Strassburg

Diretor Executivo, IIS

Paulo D. Branco

Diretor Técnico, IIS

Álvaro Iribarrem

Coordenador de Equipe, IIS

Agnieszka Latawiec

Diretora Executiva, IIS

Carolina Salcedo

Equipe Executora, IIS

Diogo Rocha

Equipe Executora, IIS

Eduardo Lacerda

Equipe Executora, IIS

Luiz Gustavo Oliveira

Equipe Executora, IIS

Raísa Vieira

Equipe Executora, IIS

Renata Capellão

Equipe Executora, IIS

Agradecimentos

Este trabalho é financiado por Instituto Clima e Sociedade (ICS).

Agradecemos aos responsáveis pelo Projeto Amazônia 2030 pela oportunidade de participar deste estudo, que trouxe grandes aprendizados aos pesquisadores do Instituto Internacional para Sustentabilidade (IIS). Agradecemos ao Instituto do Homem e do Meio Ambiente da Amazônia (Imazon) pela parceria, pelo compartilhamento de informações e pelas discussões ricas conduzidas durante a concepção e produção deste material.

Os dados e opiniões expressas neste trabalho são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente a opinião dos financiadores deste estudo.

Palavras-chave

Recuperação Florestal; Conservação da Biodiversidade; Mudanças Climáticas; Planejamento Espacial; Modelagem de Cenários; Amazônia Legal

Índice

| | |
|--|----|
| Sumário Executivo | 1 |
| INTRODUÇÃO | 6 |
| Recuperação florestal na Amazônia | 7 |
| Planejamento espacial como ferramenta para tomada de decisão sobre recuperação florestal na Amazônia | 8 |
| Áreas Passíveis de Recuperação | 11 |
| CRITÉRIOS PARA PRIORIZAÇÃO | 12 |
| Mitigação das mudanças do clima | 13 |
| Conservação da biodiversidade | 14 |
| Retorno Socioeconômico | 15 |
| Custo de Implementação | 16 |
| Custo de Oportunidade | 16 |
| Áreas Protegidas e Assentamentos | 17 |
| CENÁRIOS PARA RECUPERAÇÃO FLORESTAL | 18 |
| Definição de Cenários | 18 |
| Mapas de Gradientes | 19 |
| Áreas prioritárias: os primeiros 10% | 22 |
| MECANISMOS DE IMPLEMENTAÇÃO | 28 |
| CONCLUSÃO | 33 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 35 |
| APÊNDICE | 37 |
| Uso e cobertura do solo | 37 |
| Critérios para priorização | 39 |
| Mitigação das mudanças climáticas: potencial de sequestro de carbono | 39 |

| | |
|---|----|
| Conservação da biodiversidade: redução do risco de extinção de espécies | 40 |
| Potencial de retorno socioeconômico | 41 |
| Custo de Oportunidade da Terra | 45 |
| Custo de Implementação da Restauração | 46 |
| Pressão por Desmatamento | 47 |
| Variáveis de Desempate | 49 |
| Vegetação Secundária | 52 |
| Distribuição de Pesos Ótimos | 54 |

Lista de Figuras

- Figura 1. Gradiente de áreas prioritárias para recuperação florestal na Amazônia nos cenários de maximização dos critérios: (a) *Maximização do Potencial de Retorno Socioeconômico*, (b) *Mitigação das Mudanças do Clima*, (c) *Conservação da Biodiversidade* e (d) *Redução de Custos da recuperação florestal* 21
- Figura 2. Gradiente de áreas prioritárias para recuperação florestal na Amazônia no cenário *Multicritério* 22
- Figura 3. Destaque para os 10% das áreas mais prioritárias (aproximadamente 5,7 milhões de hectares) para recuperação florestal no bioma Amazônia nos cenários (a) *Maximização do Potencial de Retorno Socioeconômico*, (b) *Mitigação das Mudanças do Clima*, (c) *Conservação da Biodiversidade* e (d) *Redução de Custos*. Os gráficos de teia representam o ganho obtido para cada critério considerado em cada cenário 24
- Figura 4. Áreas prioritárias para recuperação florestal no bioma Amazônia no cenário *Multicritério* (10% da área passível de recuperação na Amazônia). O gráfico de teia representa o ganho obtido para cada critério considerado no cenário em questão 25
- Figura 5. Comparação entre os custos de oportunidade, implementação e custo total entre os diferentes cenários construídos considerando a priorização de 10% das áreas passíveis de recuperação da Amazônia 27
- Figura 6. Variáveis de uso e cobertura do solo agregados nas 3 classes (a) áreas não-restauráveis, (b) áreas naturais e (c) áreas passíveis de recuperação 38
- Figura 7. Mapa da camada de custo de oportunidade no bioma Amazônia 46
- Figura 8. Mapa da camada de custo de implementação da restauração no bioma Amazônia 47
- Figura 9. Áreas passíveis de recuperação localizadas dentro de áreas protegidas (Terras Indígenas e Unidades de Conservação, com exceção de Áreas de Proteção Permanente) no bioma Amazônia 48

| | |
|---|----|
| Figura 10. Áreas passíveis de recuperação localizadas dentro de assentamentos rurais no bioma Amazônia | 49 |
| Figura 11. Áreas de pressão por desmatamento | 51 |
| Figura 12. Ponto mínimo do custo total da restauração considerando a área total sob pressão dividido pela área total restaurada | 52 |
| Figura 13. Localização da vegetação secundária com idade mínima de 6 anos nas zonas de ocupação do bioma Amazônia, em 2019 | 53 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Reclassificação realizada sobre as classes de uso e cobertura do solo do MapBiomas para o projeto Amazônia 2030 | 11 |
| Tabela 2. Percentual de ganho em benefícios em cada cenário, em comparação ao potencial máximo de cada critério. As barras verdes ilustram a variação do percentual de cada critério, alcançado nos diferentes cenários. Todos os valores são referentes à recuperação de 10% da área passível de recuperação na Amazônia | 25 |
| Tabela 3. Custos de implementação, de oportunidade e custos totais de cada cenário construído para priorização de 10% das áreas passíveis de recuperação da Amazônia | 25 |
| Tabela 4. Políticas públicas com potencial de incorporação dos mapas de áreas prioritárias para recuperação florestal na Amazônia | 29 |
| Tabela 5. Potencial de sequestro de carbono (em gigatoneladas), custos totais da recuperação florestal (oportunidade e implementação) e preço de equilíbrio do carbono nos diferentes cenários otimizados, considerando a priorização de 10% da área passível de recuperação no bioma Amazônia, que corresponde a aproximadamente 5,7 milhões de hectares | 32 |
| Tabela 6. Indicadores usados no IRT original versus o índice que foi construído | 43 |

Lista de Siglas

| | |
|------------|---|
| CDB | Convenção sobre Diversidade Biológica |
| COP 26 | 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima |
| CRA | Cotas de Reserva Ambiental |
| Floresta+ | Programa Nacional de Pagamentos por Serviços Ambientais |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| IRT | Índice de Renda e Trabalho |
| IVS | Índice de Vulnerabilidade Social |
| LPVN | Lei de Proteção da Vegetação Nativa |
| MapBiomias | Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil |
| Mha | Milhões de Hectares |
| MMA | Ministério do Meio Ambiente |
| PEA | População Economicamente Ativa |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| Planaveg | Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa |
| PNRBH | Programa Nacional de Revitalização de Bacias Hidrográficas |
| PRADAs | Projetos de Recomposição de Área Degradada e Alterada |
| Prodes | Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite |
| Proveg | Política Nacional para Recuperação da Vegetação Nativa |
| PSA | Pagamento por Serviços Ambientais |
| RL | Reserva Legal |
| SAF | Sistema Agroflorestal |
| SICAR | Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural |
| TIs | Terras Indígenas |
| UCs | Unidades de Conservação |

Sumário Executivo

A restauração de ecossistemas consiste numa ferramenta poderosa, que pode contribuir para a obtenção de todos os *Objetivos do Desenvolvimento Sustentável* (Herrick 2019), além de atuar de maneira eficaz para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas e a conservação da biodiversidade (Strassburg et al. 2020). Por estas razões, o período de 2021 a 2030 foi declarado pela Organização das Nações Unidas (ONU) como a *Década da Restauração de Ecossistemas*.

No Brasil, a meta estabelecida através do Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg 2017), e incluída no compromisso brasileiro junto ao Acordo de Paris, é recuperar 12 milhões de hectares (Mha) de vegetação nativa em todos os biomas brasileiros até 2030. Diante das elevadas taxas de desmatamento e do potencial de regeneração natural em paisagens ainda majoritariamente conservadas, a recuperação florestal se destaca como uma agenda urgente na Amazônia. Ela deve ser implementada em uma abordagem de gestão integrada de paisagem, que associa o combate ao desmatamento e à degradação florestal com a adoção de boas práticas agropecuárias.

O projeto Amazônia 2030, no qual o presente trabalho se insere, prevê a elaboração de um conjunto de recomendações precisas para adoção imediata por tomadores de decisão privados (como empresários, empreendedores, investidores e bancos), tomadores de decisão públicos (como dos poderes Executivo e Legislativo, assim como órgãos das esferas municipal, estadual e federal) e agentes de cooperação e investimento internacional. Nesse contexto, o trabalho apresentado neste documento irá contribuir com a elaboração de mapas de priorização espacial de áreas para recuperação florestal que possam otimizar a relação custo-benefício.

Os benefícios e custos decorrentes da recuperação da vegetação nativa podem variar significativamente para uma dada paisagem. O planejamento espacial sistemático de áreas prioritárias para recuperação florestal é essencial para identificar soluções que maximizem benefícios (por exemplo, conservar biodiversidade e mitigar mudanças climáticas) e minimizem os custos (econômicos, políticos ou sociais) de forma simultânea, considerando alvos/metapas previamente definidos (Moilanen et al. 2009). Nesse sentido, é de extrema importância que tal

planejamento considere múltiplos cenários que permitam explorar diferentes aspectos socioambientais da paisagem, elucidando os ganhos e as perdas em cada um, bem como suas sinergias.

A Priorização Espacial *Multicritério* permite comparar uma gama de soluções possíveis para auxiliar na tomada de decisão voltada à recuperação florestal. Através deste tipo de abordagem, é possível simular cenários otimizando a gestão integrada da paisagem, conciliando o uso da terra e conservação da natureza e seus benefícios para as pessoas através da recuperação da vegetação nativa. Conseqüentemente, a Priorização Espacial *Multicritério* constitui uma ferramenta valiosa capaz de fornecer evidências e orientações práticas para profissionais da restauração, proprietários rurais e tomadores de decisão sobre os benefícios proporcionados pela recuperação de paisagens florestais.

A identificação das áreas prioritárias para a recuperação florestal no bioma Amazônia foi feita através de uma Priorização Espacial *Multicritério* baseada em Programação Linear Inteira (Strassburg et al. 2019). Os resultados da otimização espacial multicritério dependem diretamente da definição (i) dos objetivos da recuperação florestal, ou seja, dos benefícios esperados e dos custos a reduzir, definidos como critérios no processo de otimização; (ii) das particularidades impostas para a recuperação das áreas como, por exemplo, a atribuição de importância diferencial a áreas protegidas e assentamentos rurais e (iii) dos cenários alternativos que foram construídos.

Este documento apresenta cenários alternativos, incluindo algumas soluções custo-efetivas, para apoiar o planejamento da recuperação florestal no bioma Amazônia, com foco em (i) conservação da biodiversidade, (ii) mitigação das mudanças do clima, (iii) retorno socioeconômico e (iv) redução dos custos da recuperação florestal, considerando tanto os custos de implementação da recuperação como também os custos de oportunidade da terra. Foram utilizados diferentes cenários para identificação das áreas prioritárias, incluindo cenários orientados para otimizar um único critério e outros orientados a encontrar soluções de conciliação, ou seja, cenários que visam a otimizar múltiplos benefícios simultaneamente a um custo ótimo. Por fim, foi feita a quantificação dos custos e benefícios estimados para cada cenário, identificando as relações de *perde-ganha (trade-offs)* e sinergias entre estes. No Apêndice estão detalhadas a metodologia, base de dados usada e descrição das interconexões entre os cenários e modelos escolhidos.

A partir do mapeamento de áreas passíveis de recuperação florestal no bioma Amazônia no território brasileiro, foram estimados os retornos potenciais de acordo com os benefícios e custos associados à recuperação destas áreas. Especificamente, os modelos gerados simulam a

recuperação de áreas convertidas, selecionando a cada passo as áreas com maior potencial de maximizar a razão entre benefícios e custos. Ao final, foi gerado um gradiente de prioridades para a recuperação florestal, indicando as áreas 10% mais prioritárias, 20%, 30% e assim sucessivamente, até chegar na recuperação total da área disponível.

Os resultados da otimização espacial multicritério utilizando cenários alternativos para recuperação florestal na Amazônia indicam que a recuperação dos 10% de áreas mais prioritários possibilitaria sequestrar até 2,6 bilhões de toneladas de CO₂ da atmosfera no cenário de *Maximização da Mitigação das Mudanças Climáticas*. Nos cenários que focam exclusivamente em um único critério, como nos cenários de *Redução dos Custos*, *Maximização da Conservação da Biodiversidade* ou *Potencial de Retorno Socioeconômico*, este potencial é reduzido para 333,6 milhões, 990 milhões e 1,69 bilhão de toneladas de CO₂, respectivamente. O cenário *Multicritério*, orientado a encontrar soluções de conciliação, busca uma solução balanceada entre os três benefícios (sequestro de carbono, redução do risco de extinção de espécies e retorno socioeconômico) e os custos (implementação e oportunidade) simultaneamente. A recuperação florestal realizada a partir do resultado deste cenário permitiria sequestrar 931 milhões de toneladas de CO₂ da atmosfera. Para efeito de comparação, foi simulado um cenário sem priorização espacial, onde uma área correspondente a 10% da área antrópica total seria recuperada de forma uniforme ao longo de todo o bioma. Esse cenário apresenta potencial de sequestrar 1,3 bilhão de toneladas de CO₂.

Em relação ao potencial de redução do risco de extinção da biodiversidade, foram avaliadas 850 espécies. A recuperação florestal de 10% da área antrópica do bioma, utilizando o mapa de prioridades que leva em conta apenas o critério da conservação de biodiversidade, poderia reduzir a zero o risco de extinção de 24 espécies e reduzir em 25% o risco de extinção de outras 544 espécies. O cenário *Multicritério*, que leva em conta todos os outros benefícios além dos custos, apresenta potencial para reduzir a zero o risco de extinção de uma espécie, mas diminui em 25% ou mais o risco de extinção de outras 422 espécies.

O custo total é a soma de duas partes referentes ao custo de oportunidade da terra e ao custo de implementação da recuperação florestal. No cenário que otimiza apenas a redução dos custos, a recuperação da área correspondente aos 10% mais prioritários tem um custo agregado de aproximadamente US\$ 1,7 bilhão. No cenário *Multicritério* o custo total é de US\$ 9,8 bilhões. Em um cenário onde nenhum critério é priorizado (cenário *Uniforme*) temos um custo bem mais elevado: US\$ 33 bilhões.

O cenário *Multicritério* apresentou o segundo maior potencial de retorno socioeconômico (52% do potencial estimado para o cenário que maximiza apenas o retorno socioeconômico) e o terceiro maior potencial de redução no risco de extinção de espécies (55% do potencial estimado para o cenário que maximiza apenas a conservação da biodiversidade) quando comparado aos demais cenários. Quando comparado ao cenário *Uniforme*, superou de maneira significativa o ganho obtido em ambos os critérios mencionados acima. Além disso, ao comparar os custos entre os cenários simulados, o cenário *Multicritério* se mostrou extremamente vantajoso, representando uma economia de aproximadamente US\$ 7,64 bilhões, quando comparado ao cenário controle.

Os resultados apresentados aqui ilustram como a Priorização Espacial *Multicritério* oferece subsídios para a tomada de decisão para recuperação florestal de forma a economizar recursos financeiros ao mesmo tempo em que beneficia espécies ameaçadas de extinção e/ou endêmicas, pessoas em situação de vulnerabilidade social e a mitigação de mudanças climáticas. Os mecanismos de implementação destes resultados são diversos, como incentivos ao cumprimento da Lei de Proteção da Vegetação Nativa (Lei nº 12.651/2012) e programas de pagamento por serviços ambientais.

Outro aspecto explicitado por estes resultados é o grande potencial econômico de um programa de restauração em larga escala no bioma amazônico. Se bem planejado, tal programa poderia entregar múltiplos benefícios locais, regionais e globais, enquanto gera empregos e receitas. Apenas a receita potencial ligada ao financiamento climático seria suficiente para cobrir os custos de implementação e de oportunidade, e ainda gerar um excedente passível de ser aplicado na busca de caminhos de desenvolvimentos alternativos. Como ilustração, o cenário que concilia a mitigação climática e a conservação da biodiversidade geraria uma receita de US\$ 23,4 bilhões a preços relativamente conservadores (US\$ 10/ t CO₂). Aproximadamente metade deste valor seria necessária para cobrir os custos de implementação e de oportunidade dos fazendeiros que se engajarem neste processo. Do excedente, uma parcela significativa poderia financiar políticas públicas que contribuam para o desenvolvimento sustentável da Amazônia brasileira.

Além do planejamento espacial na paisagem, a implementação de um projeto de recuperação florestal deve levar em consideração não apenas os seus benefícios e como otimizá-los, mas também a escala de atuação do projeto, de modo a definir estratégias de ação que possam ser monitoradas e adaptadas ao longo do seu desenvolvimento. Para que os resultados da Priorização Espacial *Multicritério* possam de fato dar suporte à tomada de decisão e ao planejamento da recuperação florestal, é fundamental que haja participação e aceitação das partes interessadas. É necessário haver engajamento dos atores-chave para a definição dos benefícios esperados a partir da recuperação florestal a fim de incorporar o máximo da realidade local às soluções propostas para

o planejamento espacial e aumentar as chances de sucesso de projetos de recuperação de paisagens florestais.

Introdução

A recuperação de áreas desmatadas e degradadas representa uma prioridade para a superação de desafios globais, como a mitigação das mudanças do clima e a crise da biodiversidade, bem como para a conquista dos objetivos de desenvolvimento sustentável.¹ Dada a importância dessa agenda, o período de 2021 a 2030 foi declarado pela Organização das Nações Unidas (ONU) como a *Década da Restauração de Ecossistemas*.

No Brasil, a meta inicial estabelecida no Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg), que previa a recuperação de 12 milhões de hectares de vegetação nativa em todos os biomas brasileiros até 2030, foi ampliada durante a 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (COP 26). O governo brasileiro agora compromete-se a recuperar 30 milhões de hectares de pastagens degradadas e a restaurar 18 milhões de hectares de florestas.

A Amazônia brasileira ocupa quase 60% do território nacional (IBGE 2019) e a recuperação florestal consiste numa questão estratégica: ao mesmo tempo que a região tem experimentado elevadas taxas de desmatamento nos últimos anos, ela conta também com um alto potencial de regeneração natural do bioma.

Diante de um cenário desafiador, mas que aponta também oportunidades, este estudo tem por objetivo identificar áreas prioritárias para a recuperação da vegetação nativa.² Dentro do escopo do Amazônia 2030 (AMZ 2030), ele busca subsidiar o trabalho dos atores envolvidos no processo de planejamento e de tomada de decisão ao propor critérios que maximizam os benefícios

¹ Os objetivos de desenvolvimento sustentável visam a acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir o bem-estar das pessoas. Para mais detalhes, acessar brasil.un.org/pt-br/sdgs.

² Neste documento utilizamos o termo recuperação florestal, alinhado à Política Nacional para Recuperação da Vegetação Nativa (Proveg 2017). A restauração florestal tem como objetivo retornar uma determinada área ao mesmo tipo de cobertura vegetal que existia antes da sua degradação/conversão. Ou seja, fazer com que esta volte a apresentar valores de referência em termos de estrutura e função florestal, assim como de riqueza e abundância nos diferentes níveis de organização da biodiversidade. A restauração florestal pode envolver diferentes níveis de intervenção humana, desde a condução da regeneração natural até o plantio de mudas e sementes. Já quando se fala em recuperação florestal, não há necessariamente a intenção de retornar a área ao seu estado original pré-conversão. Nesse caso, a área degradada pode ser recuperada por meio de métodos adequados ao bioma (florestal, savana, campo) através de diferentes níveis de intervenção humana que variam desde a condução da regeneração natural até a implantação de um sistema agroflorestal (SAF).

socioeconômicos para a biodiversidade e para a mitigação das mudanças climáticas e que minimizam os custos.

Recuperação florestal na Amazônia

Atualmente, a Amazônia brasileira possui 82,1% de vegetação nativa, sendo 78,4% de cobertura florestal (MapBiomas 2021). Apesar desta alta porcentagem, o desmatamento na região voltou a crescer em 2015 após períodos de redução (2004-2012) e de estabilização (2013-2014). Segundo estimativas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cerca de 9 milhões de hectares de florestas primárias foram perdidas devido ao desmatamento na Amazônia Legal na última década. A maior perda aconteceu no período recente, entre agosto de 2020 e julho de 2021, quando cerca de 1,3 milhão de hectares foram desmatados, segundo a estimativa do INPE. Trata-se de um aumento de 22% na taxa de desmatamento em relação ao ano anterior e também o maior número desde o ano de 2006, segundo as medições dos satélites do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (Prodes).

Estimativas de 2017 apontam para uma cobertura de 12 milhões de hectares de florestas secundárias na Amazônia (Pinto et al. 2021). Isto é, áreas desmatadas e que foram abandonadas e agora são florestas secundárias. Porém, essas florestas secundárias também sofrem forte pressão antrópica. Estima-se que cerca de 20 milhões de hectares de florestas secundárias tenham sido convertidos entre 1988 e 2017, e que, sem a devida proteção, menos de 20% se manterão nos próximos 20 anos (Nunes et al. 2020, 20). Adicionalmente, o bioma Amazônia possui um passivo ambiental total de 3,6 milhões de hectares de Reserva Legal (RL) e 1,1 milhão de hectares de áreas de proteção permanente (APP), de acordo com a Lei de Proteção da Vegetação Nativa (LPVN) (Guidotti et al. 2017). Muitas dessas áreas estão localizadas nas áreas próximas à fronteira agrícola.

A meta específica do Planaveg para o bioma Amazônia prevê recuperar 4,8 milhões de hectares até 2030 e, atualmente, as três principais técnicas de recuperação aplicadas na Amazônia são: i) sistemas agroflorestais (SAFs), ii) plantio de mudas e sementes, e iii) regeneração natural, sendo também possível a combinação destas três técnicas (Rodrigues et al. 2019). Em situações subótimas, a condução da regeneração natural pode acelerar o processo de sucessão, aumentando a taxa de recobrimento e a diversidade de espécies nativas, grupos sucessionais, funcionais e formas de crescimento, além de ter baixo custo (Jakovac et al. 2014); (Rezende e Vieira 2019).

Durante o planejamento da recuperação florestal, algumas características socioeconômicas da região amazônica devem ser consideradas para garantir o uso sustentável dos recursos naturais. A

recuperação com aproveitamento econômico de produtos madeireiros e não madeireiros, seja através de SAFs, plantios ou mesmo da condução da regeneração natural, é, portanto, uma oportunidade para fomentar o desenvolvimento sustentável e reduzir a pressão de degradação sobre as formações naturais. A agenda da recuperação florestal é urgente na Amazônia e deve ser implementada em uma abordagem de gestão integrada da paisagem, associada ao combate ao desmatamento e à degradação florestal, bem como à adoção de boas práticas agropecuárias.

Planejamento espacial como ferramenta para tomada de decisão sobre recuperação florestal na Amazônia

Os benefícios e custos decorrentes da recuperação da vegetação nativa podem variar significativamente em uma dada paisagem. Para efetivar uma recuperação na escala da paisagem, é preciso identificar os atores que irão se engajar nesse processo, e achar maneiras de cobrir seus custos.

O planejamento espacial sistemático de áreas prioritárias para recuperação florestal é essencial para identificar soluções que maximizem benefícios (como redução do risco de extinção de espécies e mitigação de mudanças climáticas) e minimizem os custos (por exemplo, econômicos, políticos ou sociais) de forma simultânea considerando alvos/metaspriviamente definidos (Moilanen et al. 2009).

Nesse sentido, é de extrema importância que esse planejamento considere múltiplos cenários que permitam explorar diferentes aspectos socioambientais da paisagem, elucidando os ganhos e as perdas em cada um, bem como suas sinergias. Entender as diferentes vantagens e desvantagens de cada cenário na lógica de financiamento acima é uma importante ferramenta para governos regionais decidirem qual o plano de implementação para a recuperação da vegetação nativa de suas paisagens.

A Priorização Espacial *Multicritério* permite comparar uma gama de soluções possíveis para auxiliar a tomada de decisão voltada à recuperação florestal. Através deste tipo de abordagem, é possível simular cenários otimizando a gestão integrada da paisagem, conciliando os diferentes usos da terra e a conservação da natureza e seus benefícios para as pessoas através da recuperação da vegetação nativa. Conseqüentemente, a Priorização Espacial *Multicritério* constitui uma ferramenta valiosa capaz de fornecer evidências e orientações para profissionais da restauração, proprietários rurais e tomadores de decisão sobre os benefícios proporcionados pela recuperação de paisagens florestais.

Essa abordagem vem sendo aplicada pelo IIS em cinco dos seis biomas brasileiros, como a Mata Atlântica (Strassburg et al. 2019) e, mais recentemente, para a Amazônia no âmbito do projeto “Pró-restaura: desvendando as oportunidades comerciais, financeiras e econômicas da Restauração Florestal e de Paisagem no Brasil”. Este projeto teve como principal objetivo fornecer evidências e orientações práticas para profissionais da restauração, proprietários rurais e tomadores de decisão sobre os benefícios fornecidos pela recuperação de paisagens florestais. Por ser uma abordagem em constante atualização e aperfeiçoamento, novos critérios e variáveis puderam ser incluídos na Priorização Espacial *Multicritério* no âmbito do projeto Amazônia 2030 para encontrar soluções ainda mais eficientes para a recuperação florestal na Amazônia.

As soluções analisadas nesse estudo podem ser de grande interesse para diferentes atores na paisagem. Por conta disso, pode-se argumentar que alguns dos cenários incluídos aqui servem como uma representação da atuação “não perturbada”, isto é, se a interação com outros atores pudesse ser desprezada. Especificamente, é razoável esperar que se a recuperação atendesse apenas à lógica de tomada de decisão dos proprietários rurais, um cenário de minimização de custos seria uma boa representação da atuação desses atores. De maneira similar, empresas de recuperação florestal buscando ganhar escala com as projeções de aumento do preço do carbono fariam uma recuperação otimizando a relação carbono sequestrado versus custos.

Grandes empresas internacionais, como a Verra, já certificaram e comercializaram um volume superior a 600 milhões de toneladas de carbono obtidos por milhares de projetos, facilitando o acesso dessas empresas de recuperação ao mercado voluntário global. Para efeito de comparação, a restauração de 10% de toda a área desmatada na Amazônia no cenário *Multicritério* apresentado nesse estudo sequestraria aproximadamente 930 milhões de toneladas de carbono. Como demonstrado aqui, todos os cenários de recuperação de 10% de toda a área desmatada da Amazônia, mesmo os mais caros, são financeiramente compensados através da certificação e venda dos créditos de carbono obtidos com essa atividade, a um preço inferior a US\$ 12 por tonelada de CO₂.³

Tanto o poder público quanto empresas com compromisso socioambiental podem usar os cenários que incluem essa variável como objetivo, a fim de garantir que a recuperação traga benefícios

³ Para comparação, no dia 14 de dezembro de 2021, uma matéria no Estado de S. Paulo apontava um preço médio no mercado voluntário de US\$ 12 por tonelada de CO₂, e projeção de US\$ 30 por tonelada de CO₂ até 2022. Segundo dados coletados pelo *think tank* Ember (ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/), as opções futuras de CO₂ foram negociadas a uma cotação superior a US\$ 40 no mercado norte-americano em novembro de 2021, e acima de 40 libras no mercado do Reino Unido.

sociais. A partir daí, as três esferas de governo podem obter, através da diferença de custos entre a recuperação com fins sociais e aquela baseada na minimização de gastos, uma estimativa, em nível de paisagem, do eventual desembolso com a mudança de prática dos proprietários rurais do ponto de vista econômico. De forma similar, a diferença entre os custos no cenário de recuperação com fins sociais e aquele baseado na relação entre carbono sequestrado versus custos pode servir de estimativa para estimular o engajamento na mudança de comportamento das empresas de restauração. Finalmente, doadores bilaterais (por exemplo, IKI, NICFI, USAID) e/ou multilaterais (como GEF) podem estar dispostos a ajudar os governos locais nesse engajamento. A composição de interesses entre governos nacionais e/ou estaduais, atores internacionais, empresas de restauração e proprietários rurais é mais bem descrita por um cenário de otimização usando todos os critérios anteriores, e pode servir como base de negociação para encontrar mecanismos que garantam o engajamento de todos esses atores em um cenário *Multicritério*.

Um dos mecanismos mais promissores para financiar a recuperação da vegetação nativa em larga escala é a certificação e venda de créditos de carbono relacionados a essa ação. Nesse contexto, governos (nacional e/ou estaduais) captam recursos frente a grandes doadores internacionais, os quais os permitem compensar o custo de oportunidade das áreas recuperadas e o custo de recuperação dessas áreas através de programas de pagamento por serviços ambientais (PSA), por exemplo.

O valor da tonelada de carbono sequestrado nesse mercado voluntário é um assunto ainda em construção, com muitas iniciativas de precificação levando em conta diferentes metodologias e critérios surgindo nos últimos dois anos (World Bank 2020). Alguns padrões, como o VCS da Verra, levam em consideração benefícios adicionais que aquela tonelada de carbono agrega, particularmente aqueles relacionados à biodiversidade e a impactos sociais, levando a uma diferenciação na qualidade e potencialmente no preço desses créditos certificados.

Dentre as demais aplicações possíveis dos resultados obtidos em análises de priorização de áreas para restauração, podemos citar como exemplos: i) o incentivo ao cumprimento da LPVN através da indicação de áreas custo-efetivas para alocação de RL na escala da propriedade, considerando a possibilidade de compensação dos passivos em outras propriedades rurais; ii) a identificação de áreas para compensação em processos de licenciamento ambiental de atividades com uso de recursos naturais e potencial poluidor e a identificação de áreas importantes para a conservação dos benefícios da natureza para as pessoas, incluindo modelos de pagamento por serviços ambientais; iii) indicação de locais importantes para a implementação de abordagens que fortaleçam a conectividade ecológica, como, por exemplo, corredores ecológicos e mosaicos de unidades de

conservação; iv) a diminuição de conflitos sobre o uso da terra através da escolha de áreas com menor custo de oportunidade e um bom potencial de retorno ambiental para a recuperação florestal.

Áreas Passíveis de Recuperação

O mapeamento do uso e cobertura do solo é fundamental para dar suporte à tomada de decisão relacionada à recuperação da vegetação nativa. Esse mapeamento é necessário para auxiliar a identificação de áreas passíveis de recuperação e a construção de indicadores ambientais. Para tanto, é necessário que tal mapeamento de uso e cobertura do solo apresente grande acurácia.

O MapBiomass disponibiliza gratuitamente uma série temporal histórica de mapas anuais para todos os biomas brasileiros, baseada em imagens de satélite Landsat, com acurácia global da classificação de 89% (Souza et al. 2020). Os dados do MapBiomass são apresentados na forma de uma coleção de mapas. Todos eles são disponibilizados com resolução espacial de 30 metros em uma projeção planificada.

Para fins do projeto, as classes de uso e cobertura do solo disponibilizadas pelo MapBiomass foram reclassificadas de acordo com as classes da Tabela 1, resultando na seguinte classificação para a Amazônia: natural, restaurável e não restaurável. Além disso, áreas com vegetação secundária (Nunes et al. 2020) com idade maior ou igual a seis anos foram incluídas como áreas passíveis de recuperação.

Tabela 1. Reclassificação realizada sobre as classes de uso e cobertura do solo do MapBiomias para o projeto Amazônia 2030

| Classe original do MapBiomias | Reclassificação |
|--------------------------------------|------------------------|
| Formação Florestal | Natural |
| Formação Campestre | Natural |
| Formação Savânica | Natural |
| Mangue | Natural |
| Área Úmida Natural não Florestal | Natural |
| Agricultura | Restaurável |
| Cultura Anual e Perene | Restaurável |
| Cultura Semi-Perene | Restaurável |
| Pastagem | Restaurável |
| Mosaico de Agricultura e Pastagem | Restaurável |
| Floresta Plantada | Restaurável |
| Corpos D'água | Não Restaurável |
| Rio, Lago e Oceano | Não Restaurável |
| Aquicultura | Não Restaurável |
| Apicum | Não Restaurável |
| Outra Formação Natural não Florestal | Não Restaurável |
| Afloramento Rochoso | Não Restaurável |
| Praia e Duna | Não Restaurável |
| Infraestrutura Urbana | Não Restaurável |
| Mineração | Não Restaurável |
| Outra Área não vegetada | Não Restaurável |
| Não observado | Não Restaurável |

Fonte: Elaboração Própria

Critérios para Priorização

No presente trabalho, a seleção dos critérios utilizados nos exercícios de priorização de áreas para recuperação florestal no bioma Amazônia se deu com vistas a abranger diferentes aspectos associados ao manejo sustentável da paisagem no bioma de forma custo-efetiva. Nesta seção descreve-se como foi feita a definição das áreas passíveis de recuperação florestal no bioma Amazônia e os benefícios e custos considerados na construção dos cenários propostos na seção Critérios para Recuperação Florestal.

Mitigação das mudanças do clima

Altas concentrações de CO₂ na atmosfera são responsáveis pelo efeito estufa, o qual leva ao aumento da temperatura média global causando diversas consequências para o clima, para a biodiversidade, para a manutenção de benefícios da natureza para as pessoas (serviços ecossistêmicos) e à qualidade de vida da população humana. Através da fotossíntese, as plantas absorvem CO₂ da atmosfera e utilizam o carbono para formar suas estruturas de sustentação, como galhos, raízes e troncos. Por meio desse processo, as florestas estocam grandes quantidades de carbono na madeira das árvores, evitando que este seja liberado na atmosfera e contribuindo assim para a regulação climática.

Dessa forma, a recuperação florestal contribui para o aumento das taxas de sequestro de carbono e para o combate às mudanças do clima e os seus impactos. Quando as árvores morrem e sua biomassa é decomposta, parte desse carbono é devolvida à atmosfera e parte é transformada em matéria orgânica do solo. Essa matéria orgânica, além de ainda estocar parte do carbono da biomassa, é essencial para manter o solo saudável, com umidade, nutrientes e microrganismos.

Para esse estudo, o benefício de carbono foi quantificado na forma de potencial de sequestro de carbono da atmosfera, isto é, o total de toneladas de carbono que seriam sequestradas como resultado da recuperação de determinada área em detrimento de outra. Essa informação é crucial para estimar os totais de sequestro de carbono em cada cenário e, por consequência, a potencial

receita que se pode adicionar ao orçamento de um projeto de recuperação proposto para as grandes agências financiadoras.

Conservação da biodiversidade

A biodiversidade compreende todos os organismos vivos e os ecossistemas onde estes vivem, sejam aquáticos ou terrestres. Essa diversidade de seres vivos e sua interação com o meio físico e biótico são fundamentais para a manutenção dos processos ecológicos e, conseqüentemente, para a manutenção da vida na Terra. Tais interações contribuem, por exemplo, para o funcionamento dos ciclos biogeoquímicos (como ciclos da água, do carbono e do nitrogênio), e para a manutenção da estrutura das comunidades e funcionamento dos ecossistemas (por exemplo, herbivoria, polinização, predação e competição). A recuperação florestal pode contribuir diretamente para a conservação da biodiversidade através do aumento da quantidade e da qualidade de habitat para as espécies, bem como através do aumento da conectividade entre remanescentes florestais em paisagens fragmentadas.

Para esse estudo, o benefício para conservação da biodiversidade foi calculado considerando a variável de redução do potencial do risco de extinção de espécies decorrente da recuperação florestal na Amazônia. Com base na relação entre a área de habitat ocupada pelas espécies e o respectivo risco de extinção, essa variável nos permite quantificar o impacto da recuperação de uma determinada unidade de planejamento no aumento da distribuição atual de uma determinada espécie,⁴ e conseqüentemente, no seu risco de extinção devido ao ganho de habitat (Strassburg et al. 2019). Ao representar o risco de extinção das espécies e levar em conta esta variável nos processos de priorização da recuperação e de tomada de decisão, teremos uma representação, em escala, das metas da Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB).

Apesar de sermos capazes de quantificar o benefício para a biodiversidade relacionado à recuperação da vegetação nativa, ainda não possuímos um método eficaz para comparar diretamente esses ganhos com o custo relacionado às atividades de recuperação. Uma forma de internalizar esse benefício adicional da recuperação se dá através de prêmios sobre o valor da tonelada de carbono sequestrada. Isso é, faz diferença para o preço pago pelo carbono os benefícios

⁴ Em Planejamento Sistemático para Conservação a unidade de análise é chamada de "unidade de planejamento", que representa um segmento da região de planejamento em questão. A unidade de planejamento não necessariamente representa uma unidade de gestão política ou de governança. Nesta análise, as unidades de planejamento são definidas por segmentos quadrilaterais com área aproximada de 1km².

adicionais que a atividade que o gerou pode trazer. Esse mecanismo é particularmente útil para governos engajarem outros atores na paisagem, especificamente, proprietários rurais e empresas de recuperação, garantindo que esses benefícios para a sociedade sejam incluídos na tomada de decisão sobre quais áreas serão restauradas. Essa estratégia funciona particularmente bem no mercado voluntário, em que grandes doadores podem ser convencidos a pagar um maior valor pela tonelada de carbono se os benefícios adicionais forem mensuráveis, como é o caso da biodiversidade neste estudo, e de outros benefícios também incluídos aqui, como o retorno socioeconômico.

Retorno Socioeconômico

Além dos benefícios para o meio ambiente, a recuperação florestal traz consigo potenciais benefícios sociais e econômicos para a população através da geração de emprego e renda, melhoria na saúde e no bem-estar das pessoas, além da valorização da identidade cultural local. A geração de emprego e renda pode se dar através de atividades diretamente relacionadas ao processo de execução da recuperação da vegetação nativa local, como coleta e processamento de sementes, produção e comercialização de mudas, implementação e manutenção dos plantios. Outras possíveis fontes de renda advêm do turismo rural, da comercialização de produtos madeireiros e não madeireiros, da criação de abelhas para a produção de mel, própolis e cera, entre outros. Além disso, a adoção de práticas agropecuárias sustentáveis que reduzem os impactos ambientais pode agregar ainda mais valor aos produtos comercializados, como, por exemplo, através de certificações ambientais. Proprietários rurais podem receber compensações financeiras por manter a floresta em pé e/ou recuperar floresta através de programas de pagamento por serviços ambientais (PSA) ou do mecanismo de cotas de reserva ambiental (CRA), instituído pela LPVN. Dessa forma, projetos de recuperação florestal têm o potencial de contribuir significativamente para a promoção da agropecuária sustentável e do crescimento econômico inclusivo e sustentável, erradicação da pobreza e promoção da segurança alimentar, saúde e bem-estar da população.

O benefício socioeconômico advindo da recuperação da vegetação nativa na área de estudo foi quantificado considerando informações do Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) (Costa e Marguti 2015), custo de implementação da recuperação e potencial de regeneração natural.

Custo de Implementação

O custo de implementação da recuperação da vegetação nativa pode variar até 114 vezes dependendo do tipo de técnica utilizada (Benini et al. 2017). Considerando esta variação significativa, a escolha da técnica de recuperação a ser utilizada destaca-se como crucial para determinar a viabilidade dos programas de recuperação da vegetação nativa (Benini et al. 2017). Esses custos são intrinsecamente relacionados ao potencial das áreas de se regenerar naturalmente, de modo que o custo de implementação das técnicas de recuperação tende a aumentar conforme diminui o potencial de regeneração natural da área a ser recuperada (Strassburg et al. 2019). Como consequência, o potencial de regeneração natural afeta direta e negativamente o custo de implementação da recuperação.

A recuperação através da regeneração natural consiste no isolamento da área a ser recuperada para proteção de fatores de degradação (Crouzeilles et al. 2017); (Shono et al. 2007); (Zahawi et al. 2014), podendo ou não ser conduzida (por exemplo, através do controle de espécies invasoras e de fogo). Esta técnica pode reduzir os custos associados às ações de recuperação em mais de 70% quando comparada ao plantio total com mudas (Crouzeilles et al. 2020), se destacando, portanto, como a forma mais custo-efetiva para dar escala à recuperação da vegetação nativa. Apesar do menor custo, nem todas as áreas podem ser recuperadas naturalmente visto que o sucesso desta técnica depende de diversos fatores, como a proximidade de fontes de sementes e propágulos e as condições de fertilidade do solo (Jakovac et al. 2015).

Para esse estudo, o custo associado à implementação da recuperação da vegetação nativa foi estimado seguindo os valores indicados em Benini et al. (2017). Em áreas com baixo potencial de regeneração foi atribuído o valor de maior custo de implementação para o bioma Amazônia; em áreas com alto potencial de regeneração foram atribuídos os menores custos; e nas áreas com médio potencial de regeneração foi atribuído o valor de custo médio.

Custo de Oportunidade

O custo de oportunidade da terra pode ser entendido como a renda de que se abre mão ao se optar pela recuperação da vegetação nativa em detrimento de um uso econômico dela, como a agricultura, pecuária ou silvicultura. Este custo representa o menor valor monetário que o proprietário da terra estaria disposto a receber para renunciar ao atual uso da terra. Ao se designar

uma extensão de terra para regeneração da vegetação, por exemplo, o custo de oportunidade incorrido será a renda que poderia ser obtida nessa terra em atividades agropecuárias.

O custo de oportunidade da terra é vital no Planejamento Espacial *Multicritério*, porque evita que a alocação da recuperação seja sobreposta no espaço com áreas de alta aptidão agrícola. Ou seja, o planejamento espacial considera que áreas com alto custo de oportunidade só seriam aptas para recuperação se seus benefícios fossem ainda maiores, o que reduziria eventuais conflitos locais pelo uso da terra.

Áreas Protegidas e Assentamentos

Atualmente, o bioma Amazônia tem cerca de 44% da área protegida em Unidades de Conservação (UC), Terras Quilombolas e Terras Indígenas (TIs) e aproximadamente 14%, em assentamentos. Apesar da noção de proteção, na prática, a manutenção da floresta nativa nessas áreas é controversa. Em 2020, por exemplo, registrou-se um incremento de desmatamento acumulado no ano de aproximadamente 3,5% nessas áreas em relação ao ano anterior (Prodes).

A fim de promover uma valorização social da recuperação, adicionamos valor ao que denominamos como assentamentos e áreas protegidas (Unidades de Conservação - com exceção das Áreas de Proteção Ambiental e Terras Indígenas). A localização dessas áreas foi definida de acordo com o mapeamento fundiário realizado pelo Imazon (Santos et al. 2021).

A inclusão destas áreas no processo de priorização é realizada a partir da adição de um valor fixo ao benefício total apresentado por elas. O valor adicional é definido a fim de que as áreas protegidas e assentamentos sejam consideradas como uma variável de desempate, ou seja, havendo duas áreas de igual benefício, sendo uma delas compreendida em assentamentos ou áreas protegidas, esta última será escolhida pela priorização. Também é importante notar que dentro de assentamentos nossos cenários consideram que a recuperação se dê em consórcio com sistemas agroflorestais, daí o desempate a favor dessas áreas no processo de priorização.

Cenários para Recuperação Florestal

Definição de Cenários

A utilização de cenários permite a comparação entre diferentes estratégias e objetivos da recuperação florestal. Foram definidos os principais cenários de interesse levantados para a priorização das áreas para recuperação no bioma Amazônia, considerando os critérios apresentados anteriormente e alvos de recuperação. São eles:

- Cenário *Uniforme* - A inclusão deste cenário teve como objetivo simular a recuperação da vegetação nativa de forma uniforme no bioma, funcionando como um caso de controle para o planejamento sistemático. Além disso, esse cenário serve também como ilustração para o caso de haver incentivos ilimitados para a recuperação, sem necessidade de qualquer direcionamento dela na paisagem. Cada unidade teria o mesmo incentivo e, portanto, recuperaria a mesma quantidade relativa de vegetação. Em outras palavras, nesse cenário cada unidade de planejamento recebeu o mesmo percentual de recuperação;
- Cenários *Maximização individual de benefícios* - Nesses cenários apenas um dos três benefícios foi considerado, ignorando os custos. Desta forma, o potencial máximo de cada um dos benefícios será sempre alcançado em seus respectivos cenários, sendo eles: (i) "conservação da biodiversidade", que visa a otimizar a redução no risco de extinção das espécies ameaçadas de extinção e/ou endêmicas do bioma Amazônia; (ii) "mitigação de mudanças do clima", que visa a otimizar o potencial de sequestro de carbono; (iii) retorno socioeconômico, que visa a aumentar a geração de emprego e renda. Esses cenários permitem também calcular quão custosa seria a recuperação visando apenas um desses benefícios;
- Cenário *Redução de custos* - Neste cenário, apenas a redução dos custos de oportunidade e de implementação da recuperação da vegetação nativa foram otimizados. Desta forma, o potencial máximo para a redução de custos da recuperação será alcançado. Esse cenário serve como indicador para a atuação esperada dos proprietários rurais na paisagem, se houvesse incentivos suficientes para que eles buscassem recuperá-la. A inclusão do cenário de redução de custos é útil também para a comparação de desempenho (em termos de

custos associados) de cenários que otimizam critérios específicos, uma vez que mesmo nesse cenário se pode calcular os benefícios associados à recuperação nele;

- Cenário *Multicritério* ou *Custo efetivo* - Neste cenário foi otimizada a relação entre os benefícios e custos apresentados. Além disso, utilizou-se como critério de desempate as unidades de planejamento que estivessem localizadas em unidades de conservação, terras indígenas e assentamentos. Essa relação custo-benefício é construída usando critérios de diferentes naturezas e que não podem ser comparados diretamente. Por consequência, é inevitável que essa relação seja construída de forma subjetiva, e que o melhor uso desse cenário venha do entendimento dessa subjetividade intrínseca e que seja feito o alinhamento dela com os diferentes atores e interesses na paisagem. Por exemplo, como comparar 1 tonelada de CO₂ sequestrado com a redução de 10% no risco de extinção de uma espécie? As variáveis descritas acima são capazes de quantificar esses ganhos, mas não de compará-los. Seguindo o mesmo exemplo hipotético, o ideal seria que coubesse aos agentes na paisagem decidir o que vale mais para eles: 1 tonelada de carbono sequestrado ou a redução de 10% no risco de extinção de uma espécie.

Para cada cenário foi gerado um mapa com o ranking das áreas prioritárias para recuperação da vegetação nativa. Esse exercício foi elaborado através da ordenação de todas as unidades de planejamento em frações de 10% em 10%, até que 100% das áreas passíveis de recuperação tenham sido ordenadas de acordo com a sua prioridade de recuperação.

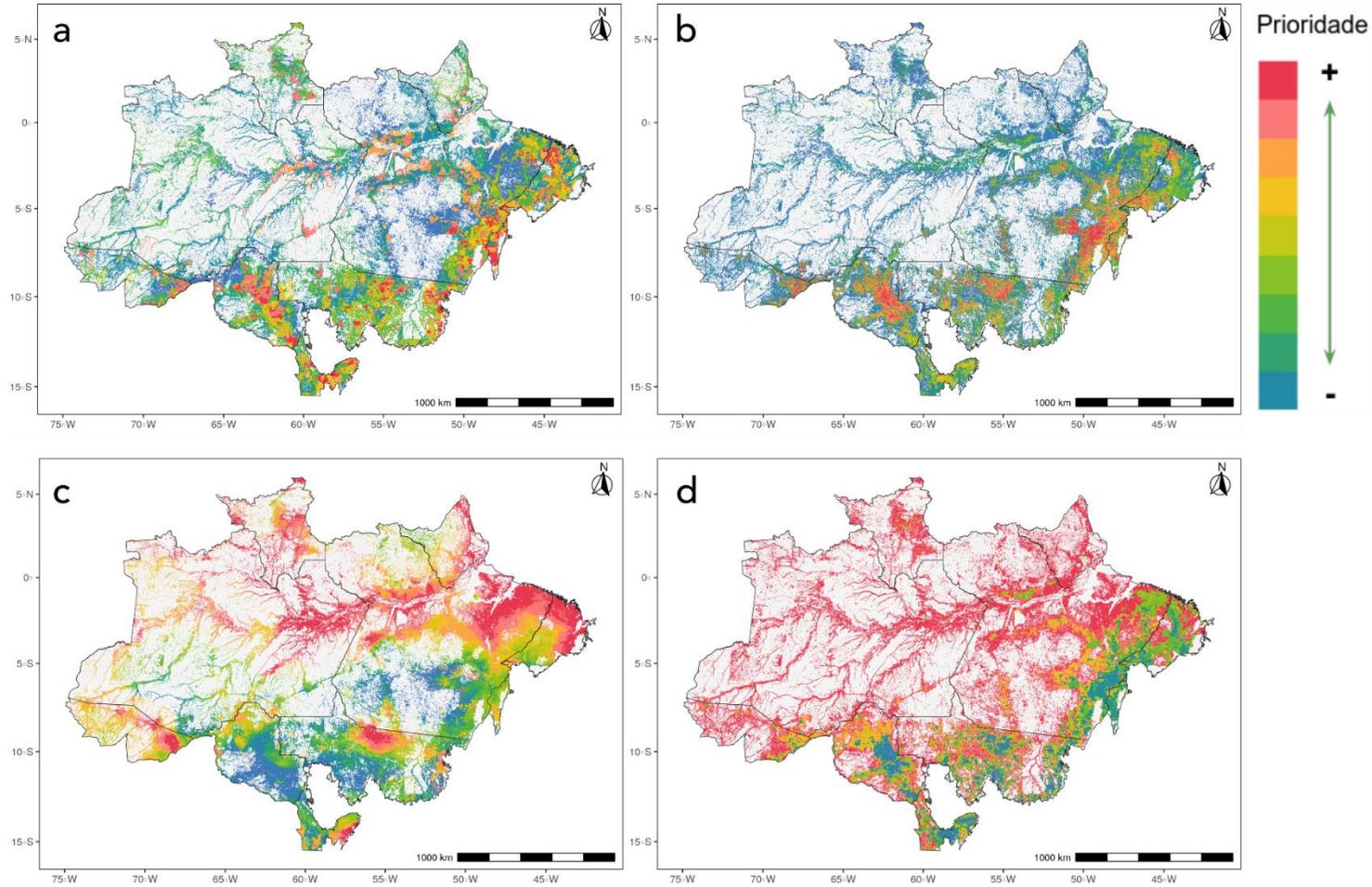
Mapas de Gradientes

Os mapas apontam por onde começar a implementação da recuperação da vegetação nativa ao levar em conta os cenários com as diferentes combinações dos critérios escolhidos. As unidades de planejamento com alta prioridade para uma dada combinação estão em vermelho e a prioridade decresce ao passo em que a cor atribuída à unidade é mais azulada (Figuras 1 e 2).

Além disso, é possível perceber, a partir da delimitação por estados, que há regiões de alta prioridade em todos os estados do bioma Amazônia no caso da combinação multicritério (cenário *Multicritério*) (Figura 2). Ainda que esse não fosse o caso, qualquer sub-região de um mapa de gradientes pode olhar a classificação de seus *pixels* e identificar entre eles quais seriam os de maior prioridade dentro daquela sub-região. Isso permite que o mesmo mapa possa ser usado em diferentes contextos e escalas.

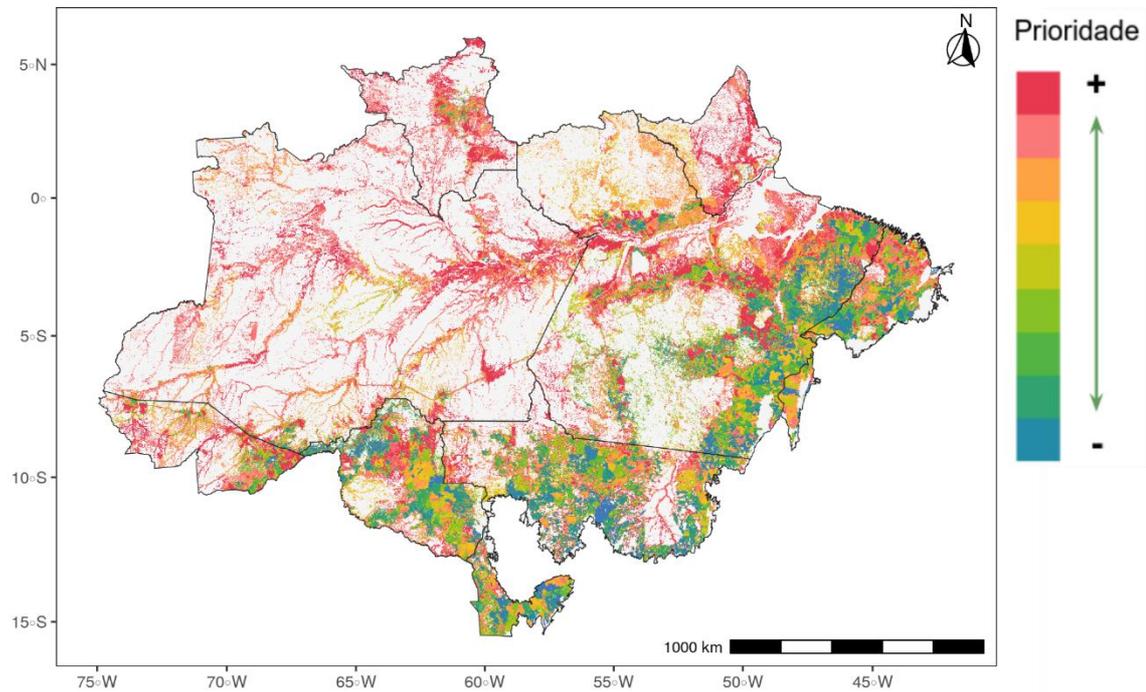
Entretanto, uma das principais possibilidades de uso destes mapas por tomadores de decisão é a compatibilização de expectativas. A partir dos mapas, é possível estabelecer um plano realista para a recuperação florestal: se o orçamento planejado não puder cobrir mais de 10% da área restaurável, por exemplo, é recomendado buscar apenas as áreas em tom mais vermelho do mapa e priorizar recuperá-las a fim de se obter maiores benefícios em termos socioeconômicos e ecológicos. Além disso, na prática, espera-se que nem todas as áreas dentro de um mesmo patamar de prioridade possam ser recuperadas devido a restrições locais. Um mapa de gradientes permite buscar a próxima região de interesse para o caso de nem todas as áreas mais prioritárias poderem ser recuperadas. Por exemplo, uma propriedade dentro da área mais prioritária pode se recusar a ter sua área totalmente recuperada. Nesse caso, pode-se buscar no próximo patamar de prioridade áreas a serem restauradas que compensem essa falha em recuperar a propriedade em questão.

Figura 1. Gradiente de áreas prioritárias para recuperação florestal na Amazônia nos cenários de maximização dos critérios: (a) *Maximização do Potencial de Retorno Socioeconômico*, (b) *Mitigação das Mudanças do Clima*, (c) *Conservação da Biodiversidade* e (d) *Redução de Custos da recuperação florestal*



Fonte: *Elaboração Própria*

Figura 2. Gradiente de áreas prioritárias para recuperação florestal na Amazônia no cenário *Multicritério*



Fonte: *Elaboração Própria*

Um outro caso de uso desses resultados está relacionado a sua aplicação dentro de apenas um estado onde pode não haver regiões de alta prioridade. Por exemplo, no caso do mapa de prioridades para a conservação de biodiversidade (Figura 1 [c]), nenhuma região de alta prioridade está contida no estado do Tocantins. Nesse contexto é possível, ainda, redimensionar as prioridades a fim de identificar as regiões em que ela é mais alta dentro do subconjunto contido na delimitação do estado, usando este mesmo mapa, sem necessidade de nova execução da otimização.

Áreas prioritárias: os primeiros 10%

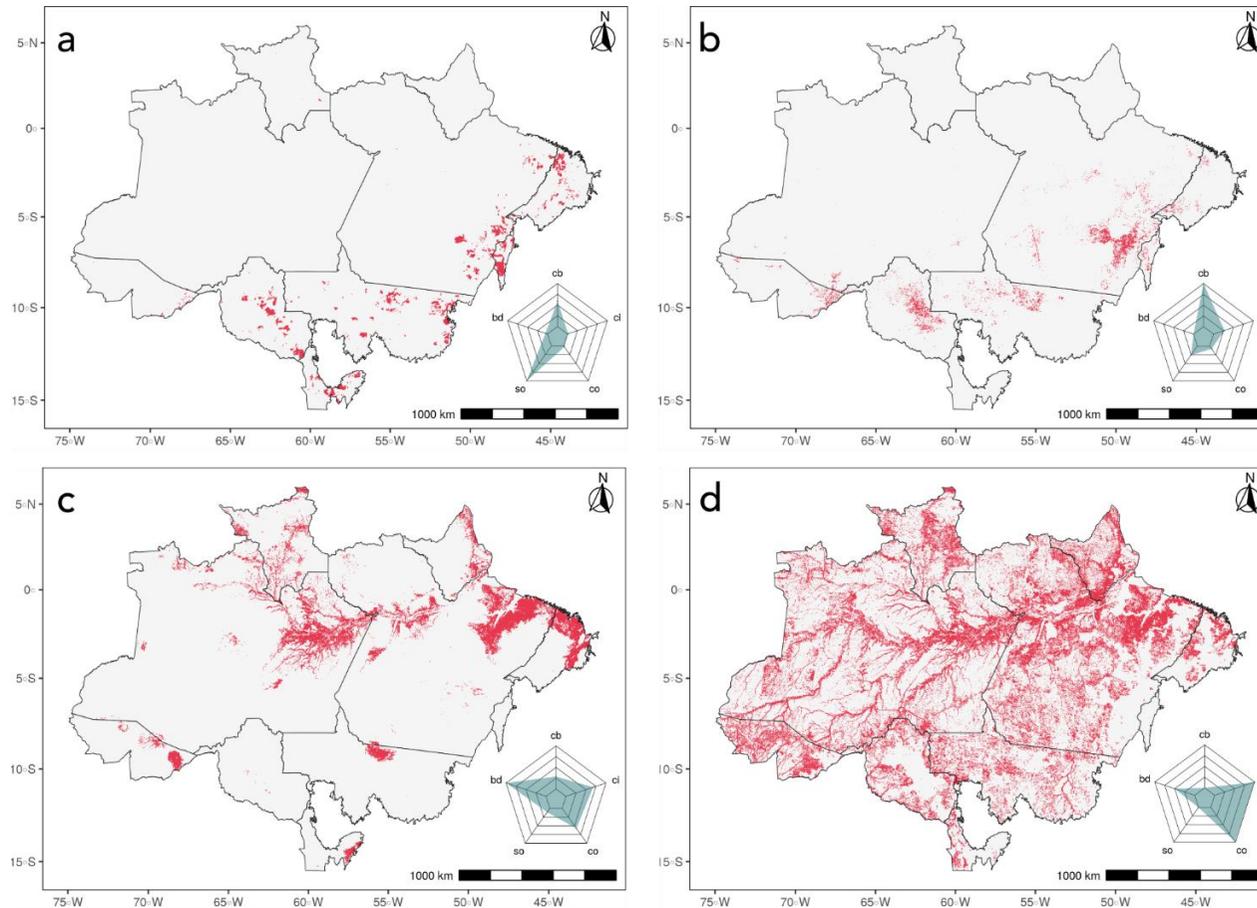
Os resultados apresentados evidenciam a prioridade de cada unidade de planejamento dentro de um contexto em que a recuperação é realizada em todo o bioma. As aplicações dessa abordagem foram então explicitadas também na seção Mecanismos de Implementação. Entretanto, para fins de comparação e a fim de demonstrar as diferenças no potencial de implementação entre os cenários, é relevante observar a área de maior prioridade: os 10% de área restaurável que guardam o maior benefício para cada variável.

O exercício de priorização de áreas para a recuperação com diferentes cenários apresenta padrões distintos de distribuição a depender do critério avaliado (Figura 3). Podemos notar, por exemplo, que as áreas prioritárias para os casos de mitigação de mudanças climáticas (Figura 4.3 [b]) e potencial de retorno socioeconômico (Figura 4.3 [a]) se concentram, em grande parte, na área comumente chamada de *arco do desmatamento*,⁵ o que denota uma sinergia entre esses critérios. Por outro lado, para a redução do risco de extinção de espécies, as áreas prioritárias para recuperação de vegetação nativa estão concentradas mais ao norte e nas margens do rio Amazonas (Figura 4.3 [c]). Estas observações evidenciam relações de *perde-e-ganha* entre os critérios utilizados e apontam a necessidade de um cenário *Multicritério* (ou *Custo efetivo*) que leve em consideração todas essas relações além das sinergias citadas anteriormente.

Como esperado, as áreas prioritárias nos cenários de *Maximização de Benefícios* apresentam o maior valor agregado para tais benefícios. O mesmo pode ser observado no cenário de *Redução de Custos*. Isso pode ser verificado a partir dos gráficos de teia colocados na parte inferior dos mapas, à direita (Figuras 3 e 4). Essas figuras apresentam a performance para cada uma das variáveis de entrada onde o pentágono mais central representa pior performance (menor valor para os benefícios e maior valor para os custos) e o pentágono mais exterior representa a melhor performance possível para os benefícios (maior valor) e para os custos (menor valor possível).

⁵ O termo *arco do desmatamento* refere-se a uma região em que o desmatamento se concentra historicamente e também onde estão focadas políticas públicas de combate do Ministério do Meio Ambiente. É um território que vai do oeste do Maranhão e sul do Pará em direção a oeste, passando por Mato Grosso, Rondônia e Acre. Nesta região, concentra-se aproximadamente 75% do desmatamento do bioma Amazônia.

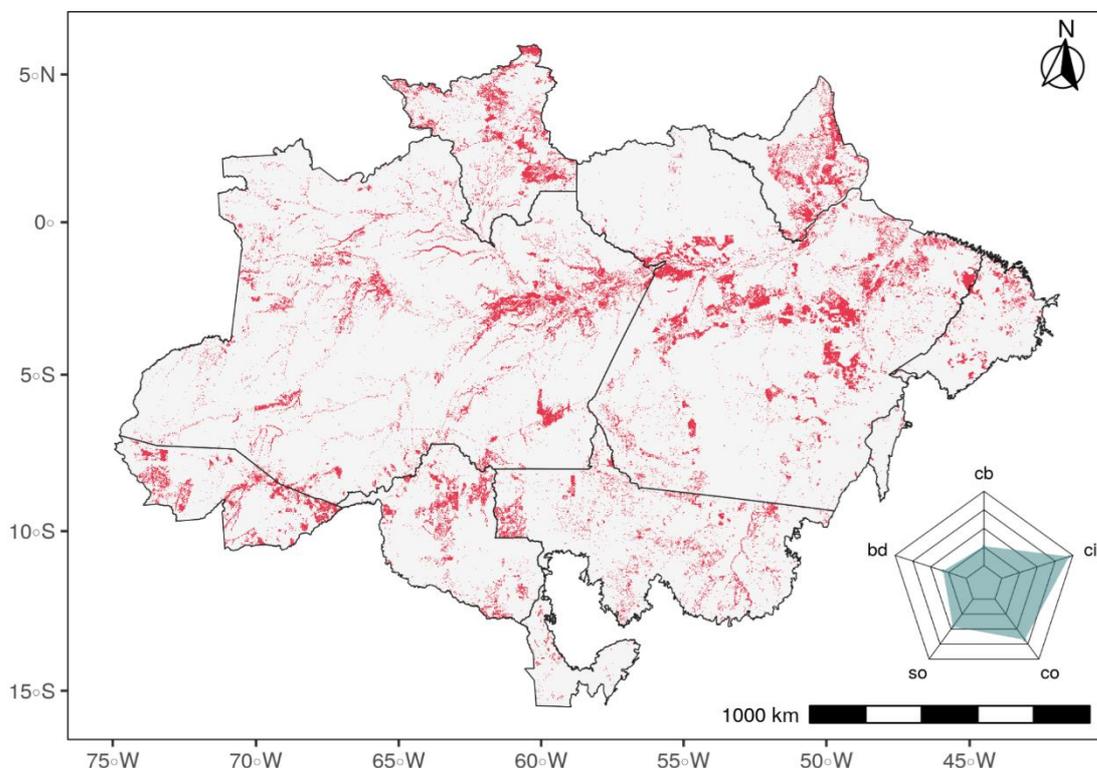
Figura 3. Destaque para os 10% das áreas mais prioritárias (aproximadamente 5,7 milhões de hectares) para recuperação florestal no bioma Amazônia nos cenários (a) *Maximização do Potencial de Retorno Socioeconômico*, (b) *Mitigação das Mudanças do Clima*, (c) *Conservação da Biodiversidade* e (d) *Redução de Custos*. Os gráficos de teia representam o ganho obtido para cada critério considerado em cada cenário



Fonte: *Elaboração Própria*

O cenário *Multicritério* buscou uma solução balanceada entre os três benefícios (sequestro de carbono, redução do risco de extinção de espécies e retorno socioeconômico) e os custos (implementação e oportunidade) simultaneamente (Figura 4). Este cenário apresentou o segundo maior potencial de retorno socioeconômico (52% do potencial estimado para o cenário que maximiza apenas o retorno socioeconômico) e o terceiro maior potencial de redução no risco de extinção de espécies (55% do potencial estimado para o cenário que maximiza apenas a conservação da biodiversidade) quando comparado aos demais cenários (Tabela 2). Em relação ao cenário *Uniforme*, superou de maneira significativa o ganho obtido em ambos os critérios mencionados acima. Além disso, ao comparar os custos entre os cenários simulados, o cenário *Multicritério* se mostrou extremamente vantajoso, representando uma economia de aproximadamente R\$ 43 bilhões por ano, quando comparado ao cenário *Controle* (Tabela 3).

Figura 4. Áreas prioritárias para recuperação florestal no bioma Amazônia no cenário *Multicritério* (10% da área passível de recuperação na Amazônia). O gráfico de teia representa o ganho obtido para cada critério considerado no cenário em questão



Fonte: Elaboração própria

Tabela 2. Percentual de ganho em benefícios em cada cenário, em comparação ao potencial máximo de cada critério. As barras verdes ilustram a variação do percentual de cada critério, alcançado nos diferentes cenários. Todos os valores são referentes à recuperação de 10% da área passível de recuperação na Amazônia

| Cenários | Ganho em benefícios | | |
|--------------------------------|----------------------|--|------------------------|
| | Sequestro de Carbono | Redução no risco de extinção de espécies | Retorno Socioeconômico |
| Uniforme | 0.50 | 0.40 | 0.28 |
| Mitigação de mudanças do clima | 1.00 | 0.33 | 0.34 |
| Conservação da biodiversidade | 0.38 | 1.00 | 0.21 |
| Retorno socioeconômico | 0.64 | 0.37 | 1.00 |
| Redução dos custos | 0.13 | 0.67 | 0.11 |
| Compromisso | 0.35 | 0.55 | 0.52 |

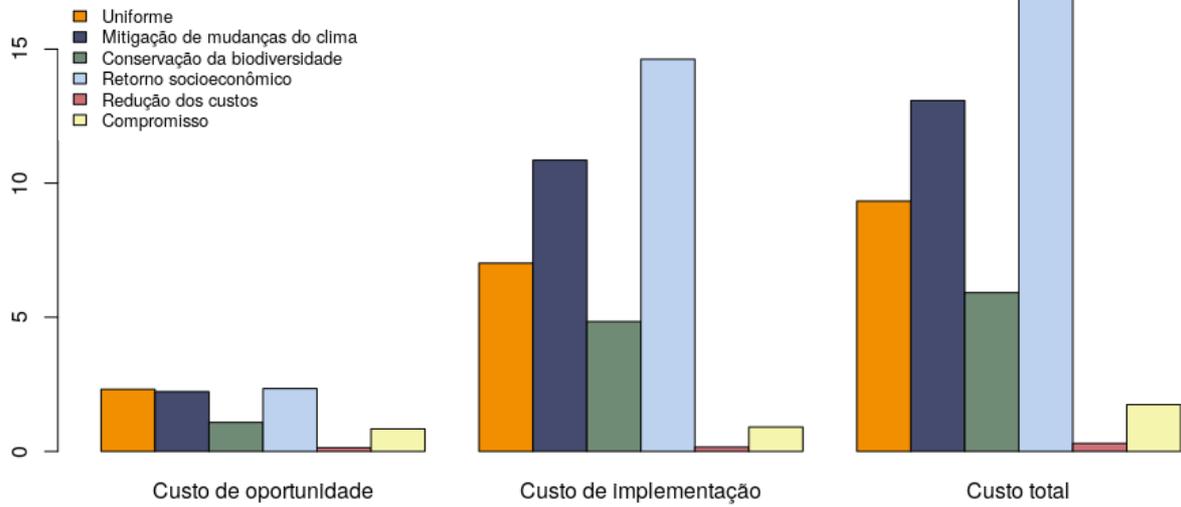
Fonte: Elaboração própria

Tabela 3. Custos de implementação, de oportunidade e custos totais de cada cenário construído para priorização de 10% das áreas passíveis de recuperação da Amazônia

| Cenários | Custo em bilhões de US\$/ano | | |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------|
| | Custo de oportunidade | Custo de implementação | Custo total |
| Uniforme | 2,31 | 7,02 | 9,33 |
| Mitigação de mudanças do clima | 2,23 | 10,86 | 13,08 |
| Conservação da biodiversidade | 1,08 | 4,84 | 5,92 |
| Retorno socioeconômico | 2,34 | 14,62 | 16,96 |
| Redução dos custos | 0,14 | 0,16 | 0,30 |
| Compromisso | 0,84 | 0,91 | 1,74 |

Fonte: Elaboração própria

Figura 5. Comparação entre os custos de oportunidade, implementação e custo total entre os diferentes cenários construídos considerando a priorização de 10% das áreas passíveis de recuperação da Amazônia



Fonte: Elaboração própria

Mecanismos de Implementação

O Planejamento Espacial *Multicritério* é de grande utilidade no processo de construção e aprimoramento de políticas públicas e também em processos de tomada de decisão no âmbito do poder público, do setor privado e da sociedade civil. Os resultados gerados possibilitam aplicações de natureza inovadora e englobam, por exemplo, adequações à LPVN, compensação ambiental, conservação da biodiversidade ou pagamento por serviços ambientais (PSA). Uma lista de exemplos de políticas públicas com potencial de incorporação dos resultados é apresentada na Tabela 4. O exemplo mais explícito de política pública com potencial de incorporação dos mapas de áreas prioritárias para recuperação florestal é o Planaveg. Com uso do Planejamento Espacial *Multicritério* apresentado aqui, é possível apontar as áreas no bioma que trarão maior retorno para a biodiversidade e para mitigação de mudanças climáticas com o menor custo de recuperação. Além disso, com essas informações em mãos, pode-se elencar critérios para priorizar propriedades rurais que serão beneficiadas com crédito rural e outras formas de financiamento usando os critérios otimizados na modelagem como parte dos critérios usados nas políticas de financiamento.

Outra possibilidade de uso em políticas públicas é no incentivo ao cumprimento da LPVN. A incorporação dos resultados no Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR) poderá auxiliar a identificar se as propriedades rurais cadastradas estão ou não inseridas em áreas prioritárias para recuperação no bioma; orientar a melhor forma de regularização das áreas com déficit de acordo com a LPVN; detectar quais propriedades têm prioridade para receber incentivos financeiros. Além disso, podem também contribuir na análise dos Projetos de Recomposição de Área Degradada e Alterada (PRADAs), tanto do ponto de vista locacional como na definição de modelos de restauração, incorporando variáveis como conectividade ecológica, resiliência ecológica, composição, balanço entre função ecológica e econômica, dentre outras.

Recentemente foi aprovada a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais no Brasil (Lei nº 14.119/2021). No caso do PSA, os dados e resultados gerados no âmbito do Amazônia 2030 poderão ser utilizados para calibrar o nível de pagamento de acordo com a importância de uma determinada propriedade rural para a conservação da biodiversidade após a recuperação florestal e custo de oportunidade de agentes individuais, gerando um expressivo ganho de eficiência e

adicionalidade nos recursos utilizados, ou seja, maximizando o retorno no investimento. O Ministério do Meio Ambiente (MMA) instituiu em 2020 o Programa Nacional de Pagamentos por Serviços Ambientais, o Floresta+ (Portaria MMA nº 288/2020). Ele tem como objetivo fomentar o mercado privado de pagamentos por serviços ambientais em áreas mantidas com cobertura de vegetação nativa e a contribuir para a articulação de políticas públicas de conservação e proteção da vegetação nativa e de mudança do clima.

Um projeto-piloto do programa está sendo implementado na Amazônia.⁶ O papel do governo brasileiro é dar uma estrutura básica a esse mercado voluntário de serviços ambientais, estabelecendo, por exemplo, critérios mínimos de elegibilidade, de modo a trazer credibilidade aos projetos, segurança jurídica aos pagadores e a justa recompensa a quem protege e mantém os recursos naturais. Os resultados da Priorização Espacial *Multicritério* podem ser usados como um dos critérios para priorizar áreas a serem selecionadas como beneficiárias para o Programa Floresta+, gerando um expressivo ganho de eficiência e adicionalidade nos recursos utilizados.

⁶ O projeto-piloto Floresta+ Amazônia é composto por quatro modalidades: Conservação, Recuperação de Floresta Nativa, Inovação e Comunidades, as quais são baseadas em PSA. Serão beneficiados proprietários rurais, indígenas e comunidades tradicionais da Amazônia para produção mais sustentável, reconhecendo o papel de públicos-chave para a conservação da floresta no país.

Tabela 4. Políticas públicas com potencial de incorporação dos mapas de áreas prioritárias para recuperação florestal na Amazônia

| Política pública | Esfera do poder executivo |
|---|----------------------------------|
| Política Nacional para Recuperação da Vegetação Nativa (Proveg, - Decreto nº 8.972/2017) e Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) | Federal |
| Lei de Proteção da Vegetação Nativa (Lei nº 12.651/2012) e seus diferentes módulos e instrumentos | Federal |
| Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC - Lei nº 12.187/2009) | Federal/Estadual |
| Plano Setorial de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono - Plano ABC (PNMC - Lei nº 12.187/2009) | Federal |
| Plano SAFRA (Lei nº 8.171/1991) | Federal |
| Pagamento por Serviços Ambientais (Lei nº 14.119/2021) | Federal/Estadual/Municipal |
| Floresta+ (Portaria MMA nº 288/2020) | Federal |
| Licenciamento e Compensação Ambiental (Lei nº 13.668/2018): Banco de áreas para compensação ambiental | Federal/Estadual |
| Licenciamento e Recomposição Florestal (Lei nº 13.668/2018 e Lei nº 12.651/2012): Banco de áreas para recomposição florestal | Federal/Estadual |
| Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE – Decreto nº 4.297/2002) | Federal/Estadual |
| Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (Lei nº 9.985/2000) e Sistemas Estaduais de Unidades de Conservação | Federal/Estadual |
| Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC – Decreto nº 9.841/2019) | Federal |
| Política e Plano Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), especialmente no Programa Nacional de Revitalização de Bacias Hidrográficas | Federal |
| Programas de financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) | Federal |
| Manual de Crédito Rural e definição de critérios ambientais/normas necessárias para a obtenção do crédito rural | Federal |

Fonte: *Elaboração própria*

Além do poder público, um outro ator importante no bioma nos próximos anos será a imagem das empresas de restauração do setor privado. É razoável esperar que sua atuação na paisagem se dê seguindo o cenário de otimização da relação sequestro de carbono versus custos, pois ele é o que melhor ilustra a otimização do retorno econômico dessa atuação. Nesse cenário, considerando a implementação do mercado de carbono no país, o preço da tonelada de carbono certificado necessário para pagar os custos da recuperação de 10% da área desmatada é de US\$ 0,70 por tonelada de CO₂. Isso significa que uma recuperação nesse cenário traria hoje um lucro de aproximadamente US\$ 10 para cada tonelada de CO₂ que essas empresas conseguirem certificar.

Governos locais interessados em influenciar a atuação dessas empresas na paisagem poderiam obter estimativas do custo em termos de lucro renunciado, necessário para subsidiar a tomada de decisão racional econômica. Alguns exemplos: se os governos optassem por articular com essas empresas para atuar de forma a maximizar o benefício social da recuperação, eles deveriam buscar formas de compensar a perda de US\$ 9,33 por tonelada de CO₂ certificada que as empresas teriam ao fazer uma recuperação seguindo o cenário de retorno socioeconômico, cujo preço de equilíbrio é de US\$ 10,03 por tonelada de CO₂ (Tabela 5).

Diversos financiadores poderiam ajudar os governos locais a implementar diferentes cenários, de acordo com seus interesses. Por exemplo, um financiador interessado apenas em mitigar as mudanças climáticas poderia financiar a diferença de US\$ 4,26 por tonelada de CO₂ necessária para custear a restauração compatível com o cenário que prioriza a mitigação de mudanças climáticas. Já para um financiador interessado na agenda da biodiversidade, o cenário que foca no benefício “se pagaria” com um prêmio de US\$ 5,26 por tonelada de CO₂ capturado.

No entanto, o cenário que mais sequestra carbono é também mais caro do que aquele que otimiza sequestro de carbono e benefício para a biodiversidade. Isto faz com que o prêmio sob o preço da tonelada de CO₂ que compense a recuperação de 10% da vegetação antrópica nesse segundo seja de US\$ 4,25. Isso mostra que, para a Amazônia, os dois objetivos têm grande interseção para suas áreas de interesse.

Por fim, a inclusão da consideração sobre os custos da restauração torna bem menos custosa a mudança da atuação do setor privado no bioma. Para garantir que a recuperação siga o cenário *Multicritério* apresentado aqui, seria necessário um prêmio no preço da tonelada de CO₂ certificada de apenas US\$ 1,16, um aumento de menos de 10% em relação ao valor de US\$ 12 sendo negociado hoje.

Os argumentos acima explicitam os benefícios de se considerar múltiplos critérios no planejamento da recuperação. O cenário *Multicritério*, por considerar os custos, “se paga” com um valor para a tonelada de CO₂ igual a US\$ 1,86 - muito menor do que o cenário de mitigação de mudanças do clima.

Estes resultados também reforçam o potencial de geração de renda para a região de um programa de restauração em larga escala. Utilizando valores relativamente conservadores (US\$ 10/t CO₂), nos cenários de *Mitigação das Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade*, por exemplo, a geração de receita associada à restauração dos 5,7 milhões de hectares seria de R\$132 bilhões.

Tabela 5. Potencial de sequestro de carbono (em gigatoneladas), custos totais da recuperação florestal (oportunidade e implementação) e preço de equilíbrio do carbono nos diferentes cenários otimizados, considerando a priorização de 10% da área passível de recuperação no bioma Amazônia, que corresponde a aproximadamente 5,7 milhões de hectares

| Crítérios otimizados | Sequestro de Carbono (Gt) | Custos (bilhões US\$/ano) | Preço de equilíbrio do carbono (US\$/ton) |
|--|----------------------------------|----------------------------------|--|
| Mitigação de mudanças do clima | 2,64 | 13,08 | 4,96 |
| Conservação da biodiversidade | 0,99 | 5,91 | 5,97 |
| Retorno Socioeconômico | 1,69 | 16,96 | 10,03 |
| Mitigação de mudanças do clima e conservação da biodiversidade | 2,64 | 13,06 | 4,95 |
| Multicritério | 0,93 | 1,74 | 1,87 |
| Mitigação de mudanças do clima e redução dos custos | 0,44 | 0,31 | 0,70 |
| Mitigação de mudanças do clima e retorno socioeconômico | 1,78 | 17,25 | 9,67 |
| Redução dos custos | 0,33 | 0,30 | 0,90 |

Fonte: *Elaboração Própria*

Conclusão

A abordagem de priorização espacial para recuperação da vegetação nativa, apresentada neste documento, bem como suas aplicações no bioma da Amazônia são resultados de estudo e pesquisa de ponta em constante atualização. Por se tratar de uma metodologia relativamente nova, ainda há espaço para melhorias. Este é um trabalho de criação coletiva e, por isso, submetê-lo ao crivo de especialistas do bioma e tomadores de decisão é tão fundamental. Além disso, é importante notar a flexibilidade e a generalidade do método. Os resultados apresentados aqui demonstram que a Priorização Espacial *Multicritério* oferece subsídios para a tomada de decisão para recuperação florestal de forma a economizar recursos financeiros ao mesmo tempo em que beneficia espécies ameaçadas de extinção e/ou endêmicas, pessoas em situação de vulnerabilidade social e a mitigação de mudanças climáticas.

A recuperação florestal é um importante mecanismo de fomento à adoção de sistemas de produção sustentáveis, contribuindo para o crescimento econômico inclusivo, a erradicação da pobreza e a promoção da segurança alimentar, saúde e bem-estar da população. Diferentes fatores influenciam a probabilidade de sucesso desse mecanismo, e a adoção de determinadas estratégias aumentam a probabilidade de sucesso de projetos de recuperação florestal. Dentre elas podemos citar: i) sensibilização da população local com relação à importância da recuperação florestal, bem como a sua inclusão nos processos de tomada de decisão, implementação e monitoramento dos projetos; ii) assistência técnica especializada e capaz de incentivar os proprietários a adotarem boas práticas e a incorporarem a gestão integrada da paisagem nos seus planejamentos; iii) plano de monitoramento da recuperação com a escolha de indicadores adequados que gerem aprendizados e permitam a gestão adaptativa do projeto, bem como a sua replicação em outros locais.

Os mecanismos de implementação destes resultados são diversos e alguns deles são encontrados ao longo deste texto, como incentivo ao cumprimento da LPVN e pagamento por serviços ambientais (seções de “Planejamento espacial como ferramenta para tomada de decisão sobre recuperação florestal na Amazônia” e “Conclusão”). Há ainda outras possibilidades de incorporação em políticas públicas, como a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), especialmente no Programa Nacional de Revitalização de Bacias Hidrográficas (PNRBH), e também políticas de

compensação ambiental. Os diferentes cenários gerados através da abordagem multicritério aqui utilizada podem ser uma importante informação complementar aos demais dados utilizados na definição de metas e critérios técnicos para priorização da recuperação de sub-bacias críticas para implementação de ações do PNRBH. Da mesma forma, esse uso de inteligência espacial pode ser muito vantajoso para otimização de bancos de dados de áreas prioritárias para recuperação florestal e compensação ambiental relacionados tanto à LPVN quanto à Lei de Licenciamento Ambiental.

Além do planejamento espacial na paisagem, a implementação de um projeto de recuperação florestal deve levar em consideração não apenas os seus benefícios e como otimizá-los, mas também a escala de atuação do projeto, de modo a definir estratégias de ação que possam ser monitoradas e adaptadas ao longo do seu desenvolvimento. O planejamento espacial em larga escala, como feito neste projeto, precisa ser sucedido pela elaboração de um plano de ação em que sejam estabelecidos critérios de elegibilidade das áreas a serem recuperadas e para definição de metas mensuráveis, atividades de implementação, técnicas de recuperação e indicadores de monitoramento. Com o plano de ação estruturado e avaliado, parte-se para a implementação dos projetos em escala local. Para que os resultados da Priorização Espacial *Multicritério* possam de fato dar suporte à tomada de decisão e ao planejamento da recuperação florestal, é fundamental que haja participação e aceitação das partes interessadas. É necessário haver engajamento dos atores-chave para a definição dos benefícios esperados a partir da recuperação florestal a fim de incorporar o máximo da realidade local às soluções propostas para o planejamento espacial e aumentar as chances de sucesso de projetos de recuperação de paisagens florestais.

Referências Bibliográficas

Benini, Rubens, Felipe Lenti, Júlio Tymus, Ana Paula da Silva e Ingo Isernhagen. “Custos de restauração da vegetação nativa no Brasil”. In *Economia da Restauração Florestal*, 20-37 São Paulo: The Nature Conservancy, 2017.

Benini, Rubens e Sérgio Adeodato. *Economia da Restauração Florestal*. São Paulo: The Nature Conservancy, 2017.

IPEA. *Atlas da vulnerabilidade social nos municípios brasileiros*. 2015.

Crouzeilles, Renato, Hawthorne L. Beyer, Lara M. Monteiro, Rafael Feltran-Barbieri, Ana C. Pessoa et al. “Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration”. *Conservation Letters* nº 13 (2020).

Crouzeilles, Renato, Mariana S. Ferreira, Robin L. Chazdon, David B. Lindenmayer, Jerônimo B. Sansevero et al. “Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests”. *Science Advance* 3, nº 11 (2017).

Englund, Oskar, Gerd Sparovek, Göran Berndes, Flávio Freitas, Jean P. Ometto et al. “A new high-resolution nationwide aboveground carbon map for Brazil”. *Geo Geography and Environment* 4, nº 2 (2017).

Guidotti, Vinicius, Flávio L. Freitas, Gerd Sparovek, Luís Fernando G. Pinto, Caio Hamamura et al. “Números detalhados do Novo Código Florestal e suas implicações para os PRAs”. *Sustentabilidade Em Debate* 5 (2017): 1-10.

IBGE. *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1: 250 000, Série Relatórios Metodológicos*. 45. 2019.

IBGE. *SIDRA: sistema IBGE de recuperação automática*. 2010.

Imazon. *Fatos da Amazônia 2021*. 2021a.

Jakovac, Ana, Tony V. Bentos, Rita C. G. Mesquita, G. Bruce Williamson. “Age and light effects on seedling growth in two alternative secondary successions in central Amazonia”. *Plant Ecology & Diversity* 7 (2014): 349-358. [bit.ly/3gB1oXy](https://doi.org/10.1007/s11258-014-0349-3).

Jakovac, Catarina, Marielos Peña-Claros, Thomas W. Kuyper e Frans Bongers. “Loss of secondary-forest resilience by land-use intensification in the Amazon”. *Journal of Ecology* 103, nº 1 (2015): 67-77.

Moilanen, Atte, Heini Kujala e J.R. Leathwick. “The Zonation framework and software for conservation prioritization”. In: *Spatial Conservation Prioritization*, 196-210. Oxford: Oxford

University Press, 2009.

Nunes, Sâmia, Luis Oliveira, João Siqueira, Douglas C. Morton e Carlos M. Souza. "Unmasking secondary vegetation dynamics in the Brazilian Amazon". *Environment Research Letters* 15 (2020). [bit.ly/3Jf4wof](https://doi.org/10.1088/1755-1315/15/3/034001).

Pinto, Andréia, Paulo Amaral, Rodney Salomão, Luis Oliveira Jr, Carlos Alexandre da Cunha et al. *Restauração Florestal em Larga Escala na Amazônia: O Potencial da Vegetação Secundária*. Amazônia 2030, 2021.

Rezende, Gustavo Mariano e Daniel Luis M. Vieira. "Forest restoration in southern Amazonia: Soil preparation triggers natural regeneration". *Forest Ecology Management* 433 (2019): 93-104.

Rodrigues, Ricardo R., Catarina C. Jakovac, Luis F. de Moraes, Daniel Vieira, Alexandre B. Sampaio et al. "Práticas de restauração nos diferentes biomas brasileiros". In *BPBES/IIIS: Relatório Temático Sobre Restauração de Paisagens e Ecossistemas*, 32-37. São Carlos: Editora Cubo, 2019.

Saatchi, Sassan S., Nancy L. Harris, Sandra Brown, Michael Lefsky, Edward T. Mitchard et al. "Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents". *PNAS* 108, nº 24 (2011): 9899-9904.

Sanderman, Jonathan, Tomislav Hengl e Gregory J. Fiske. "Soil carbon debt of 12,000 years of human land use". *PNAS* 114, nº 36 (2017): 9575-9580.

Santos, Daniel, Rodney Salomão e Adalberto Veríssimo. *Fatos da Amazônia 2021*. Amazônia 2030, 2021.

Shono, Kenichi, Ernesto A. Cadaweng e Patrick B. Durst. "Application of assisted natural regeneration to restore degraded tropical forestlands". *Restoration Ecology* 15, nº 4 (2007): 620-626.

Souza, Carlos M., Júlia Z. Shimbo, Marcos R. Rosa, Leandro L. Parente, Ane A. Alencar et al. "Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and earth engine". *Remote Sensing* 12, nº 17 (2020). [bit.ly/3GFDZPn](https://doi.org/10.3390/rs12172729).

Strassburg, Bernardo B. N., Hawthorne L. Beyer, Renato Crouzeilles, Alvaro Iribarrem, Felipe Barros et al. "Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains and halve costs". *Nature Ecology & Evolution* 3 (2019): 62-70. [bit.ly/362SPmr](https://doi.org/10.1038/s43502-019-0050-4).

World Bank. *State and trends of carbon pricing*. 2020.

Young, Carlos Eduardo. *Estudos e produção de subsídios técnicos para a construção de uma Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais*. Rio de Janeiro: Gema UFRJ, 2016.

Zahawi, Rakan A., John L. Reid e Karen D. Holl. "Hidden costs of passive restoration". *Restoration Ecology* 22 (2014): 284-287.

Apêndice

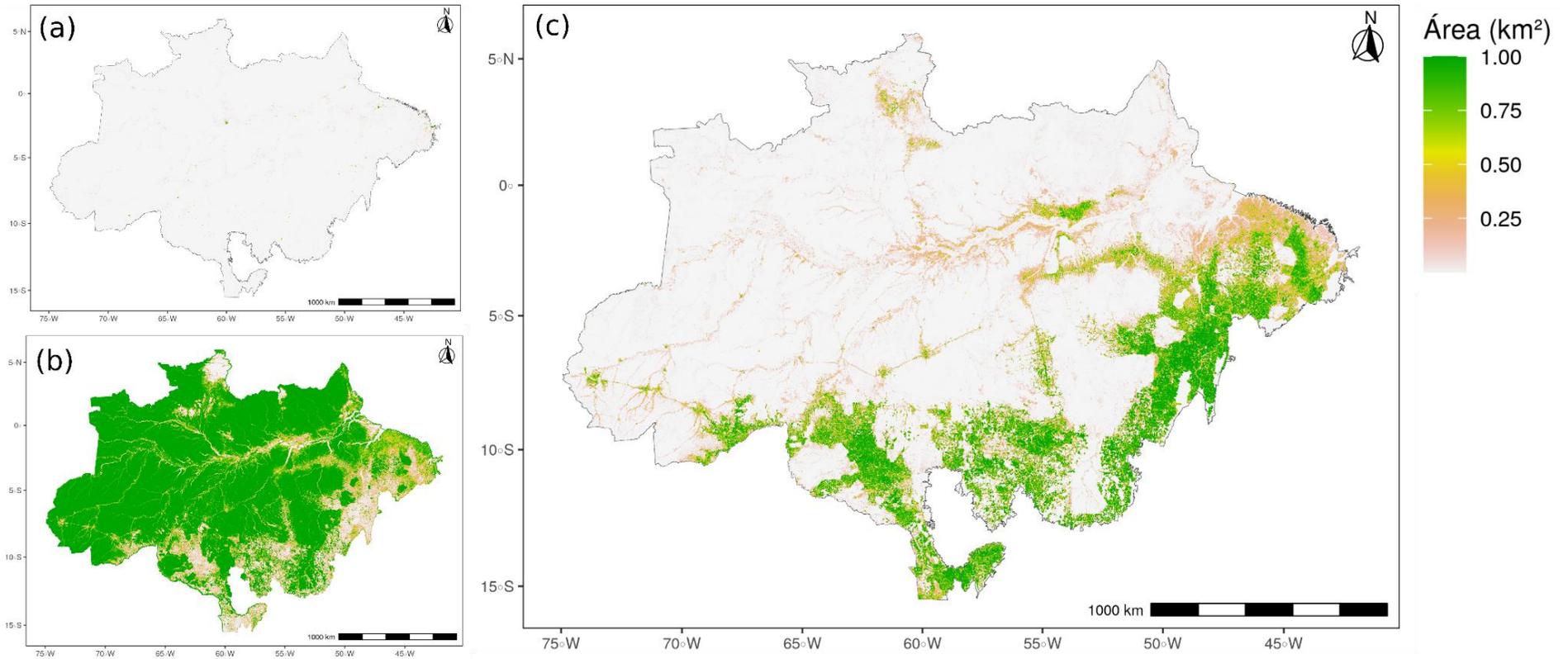
Uso e cobertura do solo

A fonte inicial dos dados de uso e cobertura do solo é o MapBiomas. Os mapas disponibilizados no site do projeto (mapbiomas.org) apresentam resolução espacial de 30 metros e são divididos por tipo de uso ou cobertura do solo. Para cada uso ou cobertura temos um mapa com dados binários, isto é, cada pixel apresenta valor 1 ou 0 se participar ou não daquele tipo de uso ou cobertura, respectivamente.

O processamento destes mapas é iniciado com a reamostragem dos mesmos para uma resolução compatível com os demais dados (em especial os mapas de distribuição de espécies). Neste projeto utilizamos uma resolução espacial de 1 km. A partir dos dados iniciais dos mapas, cada novo pixel de 1 km é representado não mais por uma variável discreta, mas por um valor contínuo entre 0 e 1 que significa a porcentagem daquele tipo de uso naquele pixel.

Após a reamostragem, os mapas são combinados em classes mais simples: áreas restauráveis, não restauráveis e naturais (Figura 6). Por fim, uma atualização foi realizada nos mapas de uso e cobertura a partir do mapa de vegetação secundária fornecido pelo Imazon. Este mapa foi considerado como uma área restaurável dentro da análise de priorização para recuperação da vegetação nativa. Para tanto, o valor da porcentagem de cobertura por vegetação secundária foi removido proporcionalmente dos outros usos e coberturas do solo. Apenas as áreas classificadas como restauráveis (Figura 6) foram consideradas nas análises de priorização.

Figura 6. Variáveis de uso e cobertura do solo agregados nas 3 classes (a) áreas não- restauráveis, (b) áreas naturais e (c) áreas passíveis de recuperação



Fonte: Elaboração Própria

Critérios para priorização

Mitigação das mudanças climáticas: potencial de sequestro de carbono

O potencial de sequestro de carbono das áreas restauráveis é avaliado considerando os estoques de carbono na biomassa no solo, acima do solo e subterrâneo. O estoque de carbono no solo utilizado foi proposto por Sanderman et al. (2017). O cálculo do estoque de carbono na biomassa acima do solo na vegetação nativa em áreas agrícolas foi realizado através da metodologia proposta por Englund et al. (2017). Já para o carbono estocado na biomassa subterrânea foi utilizada a estimativa deste estoque, proposta por Saatchi et al. (2011) seguindo a relação:

$$BGB = 0,489 \times AGB^{0,89}$$

Onde BGB corresponde ao estoque na biomassa subterrânea e AGB ao estoque na biomassa acima do solo.

A partir destes valores é calculado o estoque atual (considerando o uso e cobertura atual do solo) e potencial (após recuperação de todas as áreas antrópicas) de carbono. A diferença entre os estoques de carbono atual e potencial corresponde ao ganho de carbono advindo da recuperação da vegetação nativa, que foi calculado pela equação:

$$CB_i = (P_{\text{solo},i} + P_{\text{acima},i} + P_{\text{abaixo},i}) - (C_{\text{solo},i} + C_{\text{acima},i} + C_{\text{abaixo},i})$$

onde CB_i é o potencial de sequestro de carbono pela recuperação da vegetação nativa, $P_{\text{solo},i}$ é a biomassa potencial de carbono estocado no solo, $P_{\text{acima},i}$ é a biomassa potencial de carbono estocado acima do solo, $P_{\text{abaixo},i}$ é a biomassa potencial de carbono subterrâneo, $C_{\text{solo},i}$ é o estoque de carbono atual no solo, $C_{\text{acima},i}$ é o estoque de carbono atual acima do solo e $C_{\text{abaixo},i}$ é o estoque de carbono atual subterrâneo.

Conservação da biodiversidade: redução do risco de extinção de espécies

A partir das distribuições potenciais modeladas para um determinado grupo de espécies, é possível computar a área total de vegetação nativa que funciona como habitat para cada espécie individualmente através do cruzamento com os mapas de uso do solo. A relação entre a área atual e potencial de cada espécie nos permite estimar o risco atual de extinção de cada espécie (R) através do inverso da relação espécie-área, como:

$$R = 1 - \left(\frac{A_0}{A_p} \right)^z$$

onde A_0 é a área de habitat atual da espécie (interseção entre sua distribuição e o remanescente atual de vegetação nativa), A_p é a área de habitat potencial da espécie (interseção entre sua distribuição e o remanescente atual de vegetação nativa e áreas antrópicas) e z é um fator de lei de potência com valor empírico de $\frac{1}{4}$ (Strassburg et al. 2019).

Sendo assim, a recuperação de uma parcela δA na unidade de planejamento i aumentaria a área total de habitat para todas as espécies que tenham distribuições potenciais incorporando aquela unidade de planejamento i , consequentemente reduzindo o seu risco de extinção δR . A soma da redução dos riscos de extinção que a recuperação de uma unidade de área da unidade de planejamento i acarretaria é tomada como o valor de benefício para a conservação da biodiversidade (BD_i), em se restaurar aquela unidade de planejamento. Assim, por exemplo, a redução do risco de extinção será mais relevante para aquelas espécies que atualmente ocupam uma parcela menor do seu potencial. Matematicamente, a variável Biodiversidade é representada, em uma dada unidade de planejamento i , pelo somatório das reduções de risco de extinção das espécies (R_j) cujas distribuições estão presentes naquela unidade:

$$BD_i = \sum_{j=1}^{N_{sp}} \delta_{i,j} \left(\frac{\partial R_j}{\partial A} \right)$$

onde $\delta_{i,j}$ é um escalar que assume valor: 1, se a distribuição potencial da espécie abarca a unidade de planejamento i ; ou 0, caso contrário.

Potencial de retorno socioeconômico

O potencial de retorno socioeconômico foi utilizado para auxiliar na formulação de cenários que visam à maximização do retorno socioeconômico advindo da recuperação da vegetação nativa. As ações de recuperação podem gerar emprego e renda para os trabalhadores envolvidos diretamente nas atividades de plantio. É esperado, por exemplo, que com o esforço de recuperação em larga escala sejam gerados para o país entre 112 e 191 mil empregos diretos todos os anos, sobretudo na zona rural, relacionados às atividades e a cadeia da recuperação através de plantio (Benini e Adeodato 2017); (Planaveg 2017). Para incluir esse potencial de retorno socioeconômico na priorização das áreas a serem recuperadas, foi desenvolvida uma camada espacial para descrever como as ações de recuperação geram benefícios dessa natureza em cada unidade de planejamento. Para tanto, foi desenvolvido um índice usando informações distritais do censo populacional da caatinga, baseado no IVS (Costa e Marguti 2015), no custo de implementação da recuperação e no potencial de regeneração natural.

O IVS é composto por três dimensões - Infraestrutura Urbana, Capital Humano e Renda e Trabalho – sendo calculado como a média aritmética destes valores. A dimensão Renda e Trabalho (IRT) do IVS é particularmente informativa para esta abordagem, visto que pode se conectar aos efeitos da recuperação na paisagem. Isso se deve à natureza dessa dimensão, vinculada a aspectos relacionados ao fluxo e insuficiência de renda presente e ao estado de insegurança de renda, quando considera o trabalho infantil, a dependência com relação a pessoas idosas e nível de escolaridade. Assim, o que se espera é que com as ações de recuperação se possa reduzir o IRT.

Com os custos de implementação da recuperação (Benini e Adeodato 2017) foi estimada a porcentagem representada pelos gastos com mão de obra, ou seja, que estão relacionados hipoteticamente com a geração de postos de trabalho e renda. A partir do entendimento da relação inversa do custo de implementação da recuperação e do potencial de regeneração, foi determinado o valor potencial de postos de trabalho e renda gerados para recuperar determinada unidade de planejamento. Assim, por exemplo, áreas com alto potencial de regeneração natural apresentaram menores valores potenciais de renda sendo gerado, criando menos postos de trabalho e renda. A partir disso, foi ponderado o impacto socioeconômico das ações de recuperação sobre o indicador selecionado (IRT adaptado).

O IRT é obtido através da média ponderada de índices normalizados construídos a partir dos indicadores que compõem esta dimensão, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{IRT} = \frac{t_v + t_d + t_p + t_i + t_m}{5}$$

Onde t_v representa a proporção de pessoas vulneráveis à pobreza; t_d é a taxa de desocupação da população de 18 anos de idade ou mais; t_p é o percentual de pessoas de 18 anos ou mais sem fundamental completo e em ocupação informal; t_i é o percentual de pessoas em domicílios vulneráveis à pobreza e dependentes de idosos; e t_m é a taxa de atividade das pessoas de 10 a 14 anos de idade.

Foi realizada pela contratada a adaptação dos dados censitários do nível municipal (no qual o IVS é medido) para o nível distrital (IBGE 2010), quando houve dados disponíveis (IRT adaptado; Tabela 6). Além disso, considerando que os impactos positivos da recuperação devem atingir majoritariamente a população rural, o IRT adaptado considerou sempre essa população. Para os municípios que apresentaram 30% ou mais do seu PIB composto pelo setor agrícola, a população urbana também foi contabilizada no índice, pois esta população urbana também será impactada positivamente pela recuperação nesses casos.

Tabela 6. Indicadores usados no IRT original versus o índice que foi construído

| Indicador | IRT original | IRT adaptado |
|-----------|--|---|
| t_v | Proporção de pessoas com renda domiciliar per capita igual ou inferior a meio salário-mínimo (ano base: 2010), por município para populações rural e urbana. | Proporção de pessoas acima de 10 anos cujo domicílio apresenta rendimento nominal mensal domiciliar per capita menor do que um salário-mínimo (ano base: 2010), por distrito. |
| t_d | Taxa de desocupação da população de 18 anos ou mais de idade, por município para as populações rural e urbana. Percentual da população economicamente ativa (PEA) nessa faixa etária que estava desocupada, ou seja, que não estava ocupada na semana anterior à data do censo, mas havia procurado trabalho ao longo do mês anterior à data dessa pesquisa. | Proporção de pessoas a partir de 15 anos até 69 anos de idade sem rendimento nominal mensal (de 2010) por distrito (Censo Demográfico 2010). |
| t_p | Porcentagem de pessoas de 18 anos ou mais sem fundamental completo e em ocupação informal. Razão entre as pessoas de 18 anos ou mais sem fundamental completo, em ocupação informal, e a população total nesta faixa etária, multiplicada por 100. A ocupação informal significa que estas pessoas trabalham, mas não são: empregados com carteira assinada, militares do exército, da marinha, da aeronáutica, da polícia militar ou do corpo de bombeiros, empregados pelo regime jurídico dos funcionários públicos ou empregadores e trabalhadores por conta própria com contribuição ao instituto de Previdência oficial. | Proporção da população rural de 18 anos ou mais sem ensino fundamental completo no município (Censo Demográfico 2010). |
| t_i | Porcentagem de pessoas em domicílios com renda per capita inferior a meio salário-mínimo (de 2010) e dependentes de idosos. Razão entre as pessoas que vivem em domicílios vulneráveis à pobreza (com renda per capita igual ou inferior a meio salário-mínimo de agosto de 2010) e nos quais a renda de moradores com 65 anos ou mais de idade (idosos) corresponde a mais da metade do total da renda domiciliar, e a população total residente em domicílios particulares permanentes (multiplicada por 100). | Proporção de dependentes de idosos na população residente em domicílios particulares permanentes do município (Censo Demográfico 2010). |
| t_m | Taxa de atividade das pessoas de 10 a 14 anos de idade. Razão entre as pessoas de 10 a 14 anos de idade que eram economicamente ativas, ou seja, que estavam ocupadas ou desocupadas na semana de referência do Censo e o total de pessoas nesta faixa etária (multiplicada por 100), por município, populações urbana e rural. Considera-se desocupada a pessoa que, não estando ocupada na semana de referência, tenha procurado trabalho no mês anterior a essa pesquisa. | Proporção de pessoas de 10 a 14 anos com rendimento, por distrito, na área rural. (Censo Demográfico 2010) |

Fonte: Elaboração Própria

O índice adaptado é calculado usando os cinco indicadores acima, normalizados para terem suas variações restritas ao intervalo [0,1], continuando com pesos iguais, como na equação acima. A partir dessa equação, foi possível calcular o impacto da recuperação de uma unidade de planejamento sobre esse índice de acordo com:

$$\frac{dI}{dA} = \frac{dI}{dt_d} \cdot \frac{dt_d}{dT} \cdot \frac{dT}{dA}$$

onde $\frac{dI}{dA}$ informa ao modelo quais distritos teriam redução do IRT adaptado, através do aumento de postos de trabalho gerados por ações de recuperação e dT é a quantidade de postos de trabalho gerados pela recuperação de um hectare dA . Essa relação entre postos de trabalho gerados e área restaurada segue relações lineares tabeladas em Benini e Adeodato (2017), que considerou a diversidade brasileira, diferenciando os biomas e seus potenciais de regeneração natural.

Da primeira equação deriva-se que $dI/dt_d = 0.2$. A partir da forma como o índice t_d é calculado através da equação:

$$t_d = \frac{1}{N} \cdot \frac{P_d}{P_r}$$

onde N é um fator de normalização dado pelo valor máximo assumido por t_d entre todos os distritos considerados, P_d é a população na área rural do distrito entre 15 e 69 anos de idade sem rendimento nominal mensal, e P_r é a população rural do distrito entre 15 e 69 anos de idade, podemos obter a variação desse índice causada por um aumento na quantidade de postos de trabalho dT ($T = P_r - P_d$),

$$\frac{dt_d}{dT} = -\frac{1}{N} \cdot \frac{P_r + P_d}{P_r^2}$$

As unidades de planejamento onde estão presentes assentamentos rurais e territórios quilombolas (INCRA 2021) foram priorizadas no índice do potencial de retorno socioeconômico sugerido, sendo atribuído um peso maior a estas unidades de planejamento. O objetivo dessa priorização é que se tenha um maior ganho dos benefícios das ações de recuperação nesses locais, ou seja, que se tenha um aumento no número de postos de trabalho e renda em assentamentos rurais e quilombos. Este peso corresponde à unidade de planejamento de 25% da variação do IRT adaptado do distrito e/ou município ao qual ele pertence (diferença entre valor máximo e valor mínimo).

Custo de Oportunidade da Terra

Para este trabalho optou-se por utilizar a estimativa desenvolvida por Young (2016) por possuir nível de detalhamento adequado ao estudo. Nessa estimativa é possível avaliar o custo de oportunidade por três diferentes modelos de cálculo da renda sacrificada, em razão da decisão de uso da terra para recuperação. Desta forma, é possível corrigir problemas de amostragem e qualidade de dados disponíveis inerentes a cada um dos modelos e ter maior variabilidade para municípios próximos. Os modelos de estimativa do custo de oportunidade da terra desenvolvidos e calculados em R\$/ha/ano para cada município são:

Modelo 1 - estimativa do lucro médio de três diferentes usos agropecuários da terra – agricultura, pecuária e silvicultura – a partir de dados de valor e área destinada à produção e estimativa de rentabilidade das atividades para os municípios ou regiões;

Modelo 2 - estimativa do valor médio do arrendamento da terra para seus diferentes usos – agricultura, pecuária e silvicultura – a partir da extrapolação de valores de preço da terra observados para uma amostra de municípios e microrregiões;

Modelo 3 - estimativa do valor médio do arrendamento da terra a partir de modelo econométrico que estima o preço da terra médio para cada município, considerando variáveis econômicas e geográficas dos municípios e das atividades agropecuárias.

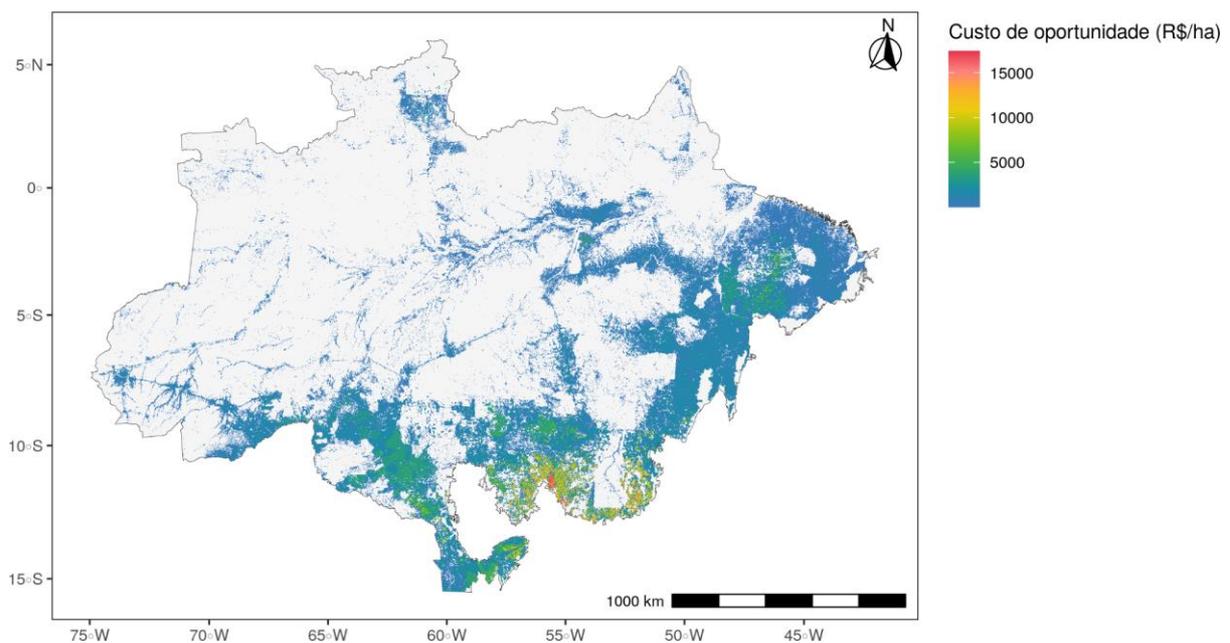
Enquanto os Modelos 1 e 2 estimam valores médios para cada um dos usos da terra considerados para recuperação (agricultura, pecuária e silvicultura), o Modelo 3 calcula um único valor médio para cada município. Para utilização dos dados (Young 2016), sugere-se a compatibilização dos Modelos 1 e 2 com o Modelo 3 a partir da média dos valores de cada uso da terra. Esses valores devem ser ponderados pela área destinada a cada um dentro dos municípios, para utilização da média aritmética entre valores de custo de oportunidade da agropecuária entre os três modelos como um único valor base para cada município.

Neste trabalho foram utilizados os valores do custo de oportunidade desagregados por atividade, sendo necessária a compatibilização dos valores do Modelo 3 para cada município, uma vez que esse não é desagregado por atividade. De modo a incorporar o Modelo 3 no cálculo dos custos de oportunidade da agricultura, pecuária e silvicultura, será considerada a proporção do valor desse modelo sobre a média geral do custo de oportunidade para o município entre os três modelos. De modo que, para cada atividade, o peso da estimativa do Modelo 3 fosse o mesmo do valor da média geral dos três modelos. Sendo assim, foram gerados mapas que representam os custos de

oportunidade para áreas consideradas como passíveis de recuperação e o integrado dessas informações.

O mapa de custo de oportunidade (Figura 7) obtido ao final do processo descrito no parágrafo anterior recebeu duas modificações a partir do uso dos dados de Vegetação Secundária (Santos et al. 2021) e de Pressão por Desmatamento (Imazon 2021a). O mapa de pressão por desmatamento apresenta as unidades de planejamento em três categorias: área desmatada, área florestal e área sob pressão de desmatamento. O mapa de custo de oportunidade foi modificado apenas nas áreas sob pressão de desmatamento. O custo de oportunidade dessas áreas foi elevado em 10%. Por outro lado, a partir do mapa de vegetação secundária, buscamos áreas além do tempo de pousio, ou seja, áreas que estão abandonadas há mais de 5 anos. Estas áreas têm pouco ou nenhum interesse econômico visto que foram abandonadas e, por isso, admitimos um custo de oportunidade nulo para elas. Isso enfatiza significativamente o potencial destas áreas.

Figura 7. Mapa da camada de custo de oportunidade no bioma Amazônia



Fonte: *Elaboração Própria*

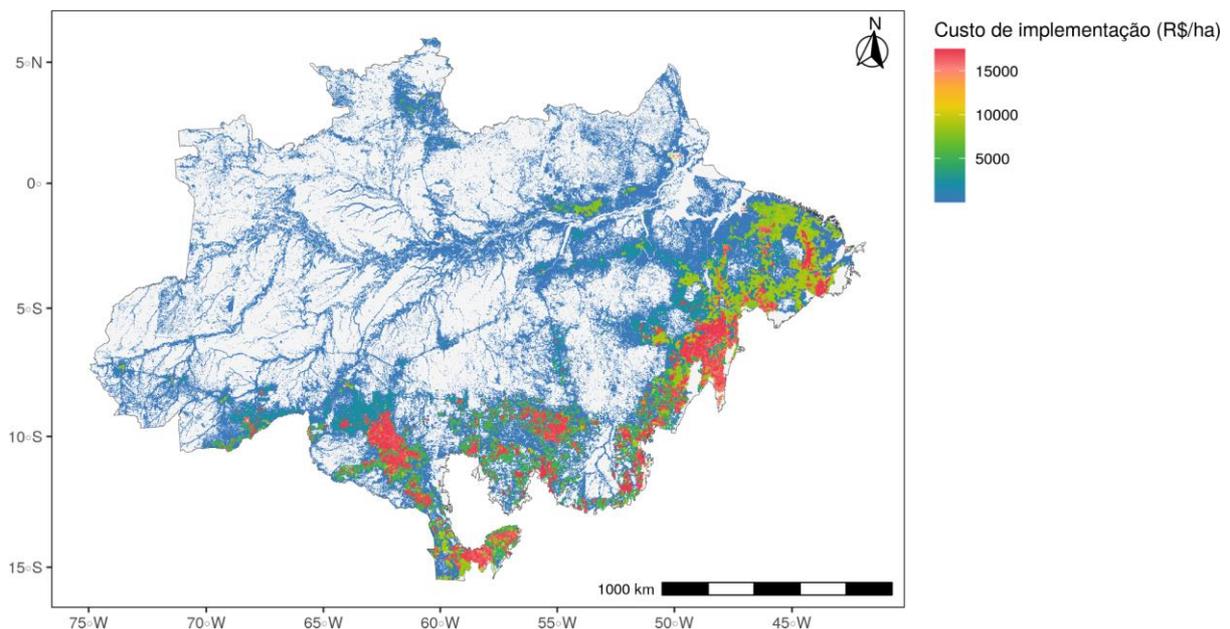
Custo de Implementação da Restauração

O custo de implementação da recuperação da vegetação nativa pode variar significativamente dependendo do tipo de técnica utilizada (Benini et al. 2017). Considerando esta variação expressiva, a escolha da técnica de recuperação a ser utilizada destaca-se como crucial para determinar a viabilidade dos programas de recuperação da vegetação nativa (Benini et al. 2017). Estes custos são

intrinsecamente relacionados ao potencial das áreas em se regenerar naturalmente, de modo que o custo de implementação das técnicas de recuperação tende a aumentar conforme diminui o potencial de regeneração natural da área a ser recuperada (Strassburg et al. 2019). A recuperação através da condução da regeneração natural consiste no isolamento da área a ser recuperada para proteção de fatores de degradação como fogo e controle de invasores (Crouzeilles et al. 2017); (Shono et al. 2007); (Zahawi et al. 2014). Esta técnica pode reduzir os custos associados às ações de recuperação em mais de 70% quando comparado ao plantio total com mudas (Crouzeilles et al. 2020), se destacando, portanto, como a forma com melhor custo-benefício, permitindo uma recuperação de vegetação nativa em grande escala. Nesta abordagem, o potencial de regeneração natural será utilizado para ponderar as estimativas de custos de implementação da recuperação da vegetação nativa.

O valor do custo de implementação foi ainda atualizado de acordo com a distribuição da vegetação secundária na região. Em áreas que possuem vegetação secundária, foi atribuído o menor valor do custo de implementação da restauração indicado (Benini et al. 2017) para o bioma Amazônia (Figura 8).

Figura 8. Mapa da camada de custo de implementação da restauração no bioma Amazônia



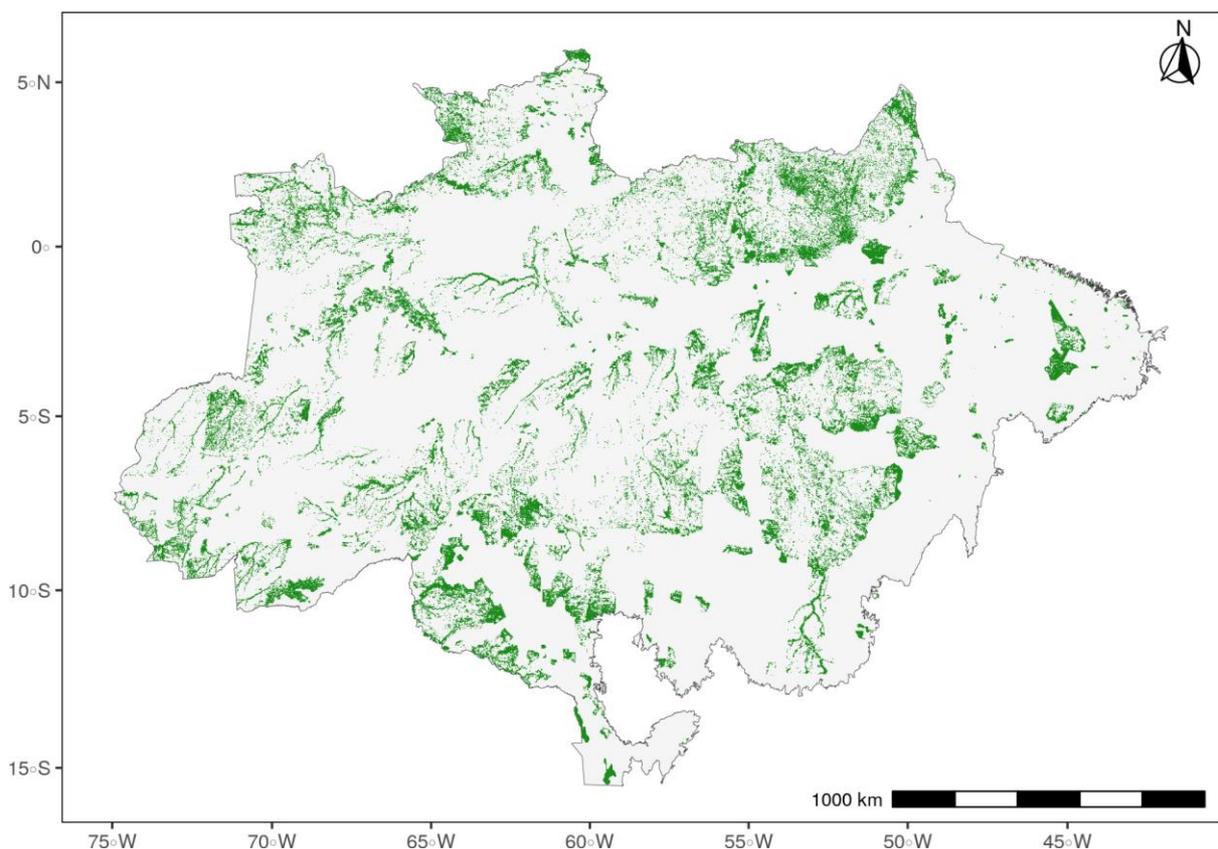
Fonte: *Elaboração Própria*

Pressão por Desmatamento

Dada a importância da inclusão de áreas protegidas e assentamentos na agenda da restauração do bioma Amazônia, optamos por utilizar uma abordagem que nos permite aumentar a chance de que

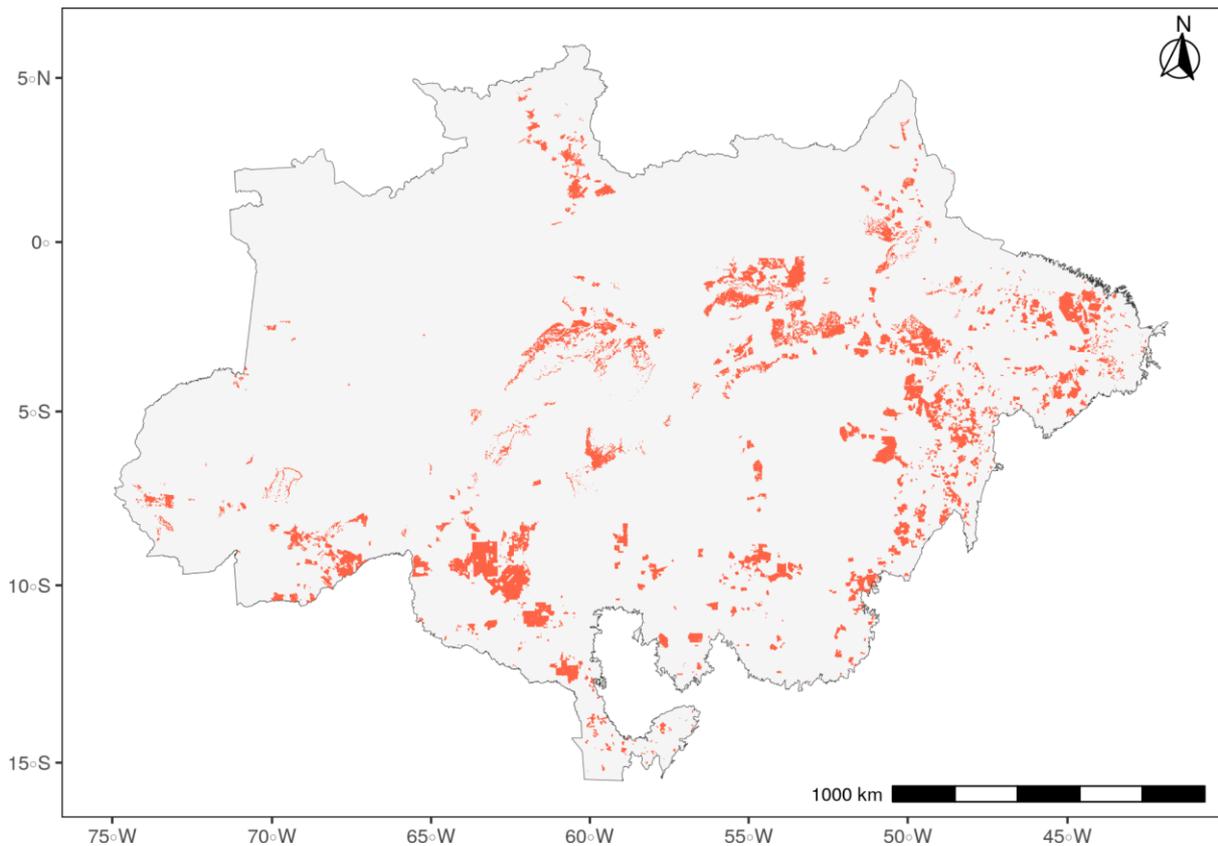
as áreas prioritárias estejam inseridas em áreas protegidas e assentamentos. A determinação destas áreas foi definida com base em dados de classificação fundiária fornecidos pelo Imazon (2021a). A partir dos dados obtidos, foram geradas duas camadas em formato raster: áreas protegidas (Figura 9) e assentamentos (Figura 10). Na primeira camada, foram incluídas Unidades de Conservação (com exceção das Áreas de Proteção Ambiental), Terras Indígenas e Terras Quilombolas e na segunda foram incluídos os assentamentos rurais. Por fim, os mapas gerados foram incorporados às análises como critério de desempate na escolha das unidades de planejamento mais custo-efetivas, pois não se trata de benefícios diretos, e sim de áreas em que se tem interesse em ampliar as ações de recuperação. Ou seja, unidades de planejamento com importância similar para os benefícios e redução dos custos analisados, que estivessem dentro de áreas protegidas ou assentamentos rurais foram prioritariamente selecionadas. Com esse intuito, foi atribuído a cada uma dessas variáveis um peso adicional equivalente a 0,1.

Figura 9. Áreas passíveis de recuperação localizadas dentro de áreas protegidas (Terras Indígenas e Unidades de Conservação, com exceção de Áreas de Proteção Permanente) no bioma Amazônia



Fonte: Elaboração Própria

Figura 10. Áreas passíveis de recuperação localizadas dentro de assentamentos rurais no bioma Amazônia



Fonte: Elaboração Própria

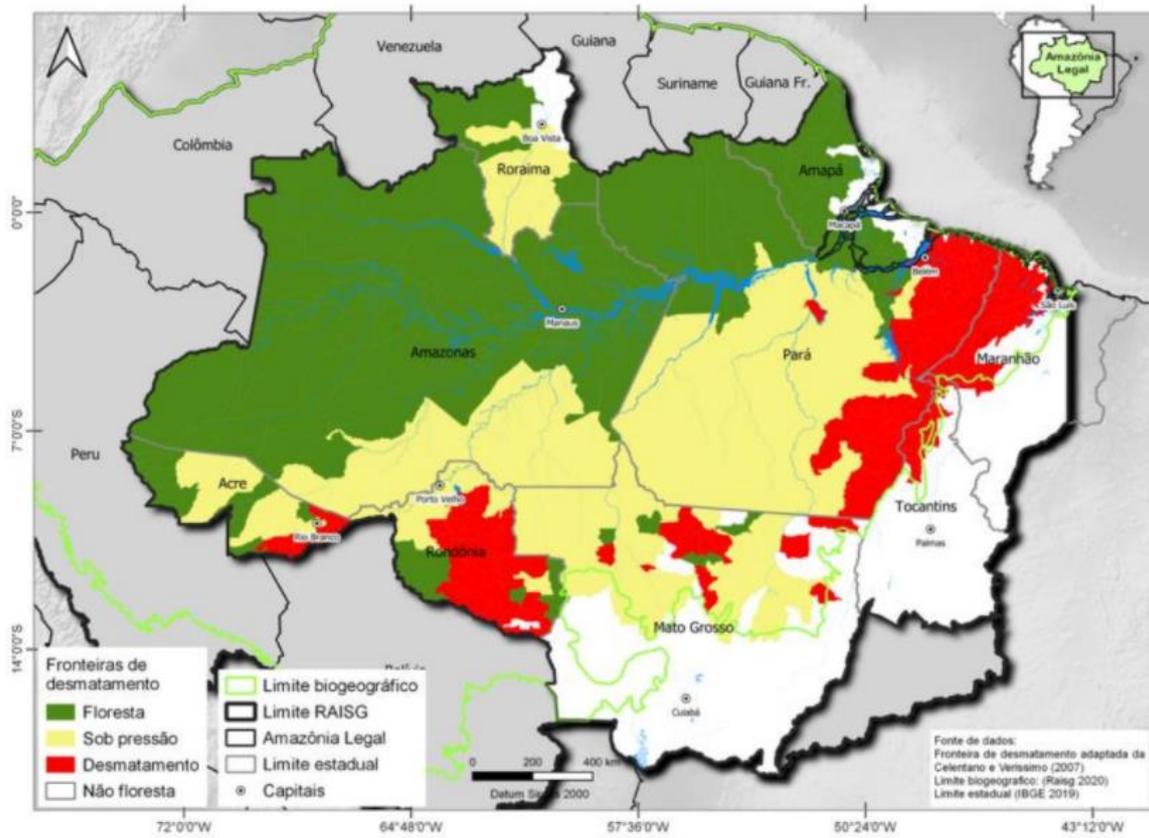
Variáveis de Desempate

Os dados de pressão por desmatamento (Figura 11) foram obtidos do Imazon (2021a). Por se tratar de um mapa qualitativo, não é possível incluí-lo diretamente como variável de decisão ou uso e cobertura do solo. Neste caso, nossa abordagem foi incluir esta pressão por desmatamento como um possível gerador de conflitos com a atividade agropecuária. Para tanto, consideramos que o custo de oportunidade em áreas onde há pressão por desmatamento sofre um acréscimo. O objetivo ao final da análise é reduzir a quantidade de área recuperada dentro de áreas sob pressão ao mesmo tempo em que diminui o orçamento necessário para a implementação da recuperação.

A escolha do valor deste acréscimo foi realizada a partir da seguinte metodologia: as áreas definidas como “Sob pressão” no mapa de pressão por desmatamento recebem, a cada passo, um multiplicador no custo de oportunidade. O passo utilizado foi de 10%. Isso significa que o custo de oportunidade total daqueles *pixels* será, a cada iteração, elevado em 10% em relação ao seu valor

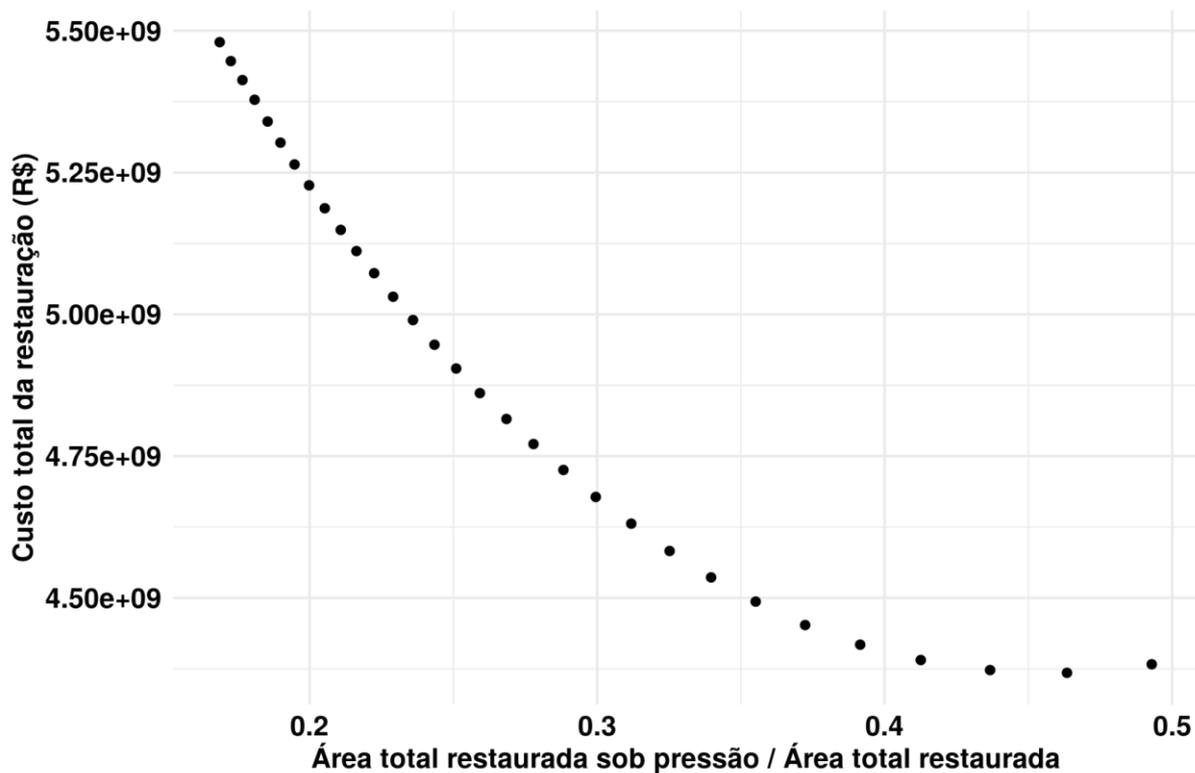
original como definido pelo mapa de custo de oportunidade discutido na seção de Custo de Oportunidade da Terra. Utilizando esta camada de custo de oportunidade modificada nestes *pixels*, realizamos uma priorização a partir da maximização da relação benefícios-custos e obtemos um mapa de prioridades para cada iteração (passo de 10%). Usando este mapa de priorização em associação com o mapa de custo de oportunidade modificado e o mapa de custo de implementação podemos calcular o orçamento total necessário para recuperação da vegetação nativa além da área total recuperada em áreas sob pressão em relação a toda área recuperada. Este par de informações, custo total e área recuperada sob pressão, é usada em eixos cartesianos como representado na Figura 12. Buscamos então o ponto deste gráfico que minimiza tanto a área recuperada sob pressão quanto o custo total da recuperação. Reconhecemos, a partir do gráfico, o segundo ponto da direita para a esquerda como este ponto ideal. Ele representa a primeira iteração e, portanto, adiciona 10% ao custo de oportunidade nas áreas sob pressão. Ou seja, adicionar 10% ao mapa de custo de oportunidade nos *pixels* sob pressão e submeter este mapa ao processo de otimização (dentro do cenário *Multicritério*) leva, ao mesmo tempo, a diminuição do custo total da recuperação e das áreas recuperadas sob pressão e, portanto, evita conflitos com o interesse econômico enquanto barateia o processo de restauração ecológica. Isso se deve ao fato de que alguns dos *pixels* recuperados dentro de áreas sob pressão de desmatamento terem custos mais elevados do que os seus substitutos quando se altera o custo de oportunidade.

Figura 11. Áreas de pressão por desmatamento



Fonte: Imazon 2021a

Figura 12. Ponto mínimo do custo total da restauração considerando a área total sob pressão dividido pela área total restaurada



Fonte: Elaboração Própria

Vegetação Secundária

O mapa de vegetação secundária foi fornecido pelo Imazon em uma resolução espacial de 30 metros (Figura 13). Em cada *pixel* deste mapa é dado um valor numérico entre 0 e 33 que representa a idade da vegetação secundária presente naquele *pixel*. O primeiro passo no processamento deste mapa foi transformá-lo em um mapa binário onde a resposta positiva corresponde a um *pixel* com vegetação secundária com idade superior a 5 anos. Isso foi feito a fim de evitar que vegetações em período de pousio fossem reconhecidas como vegetação secundária.

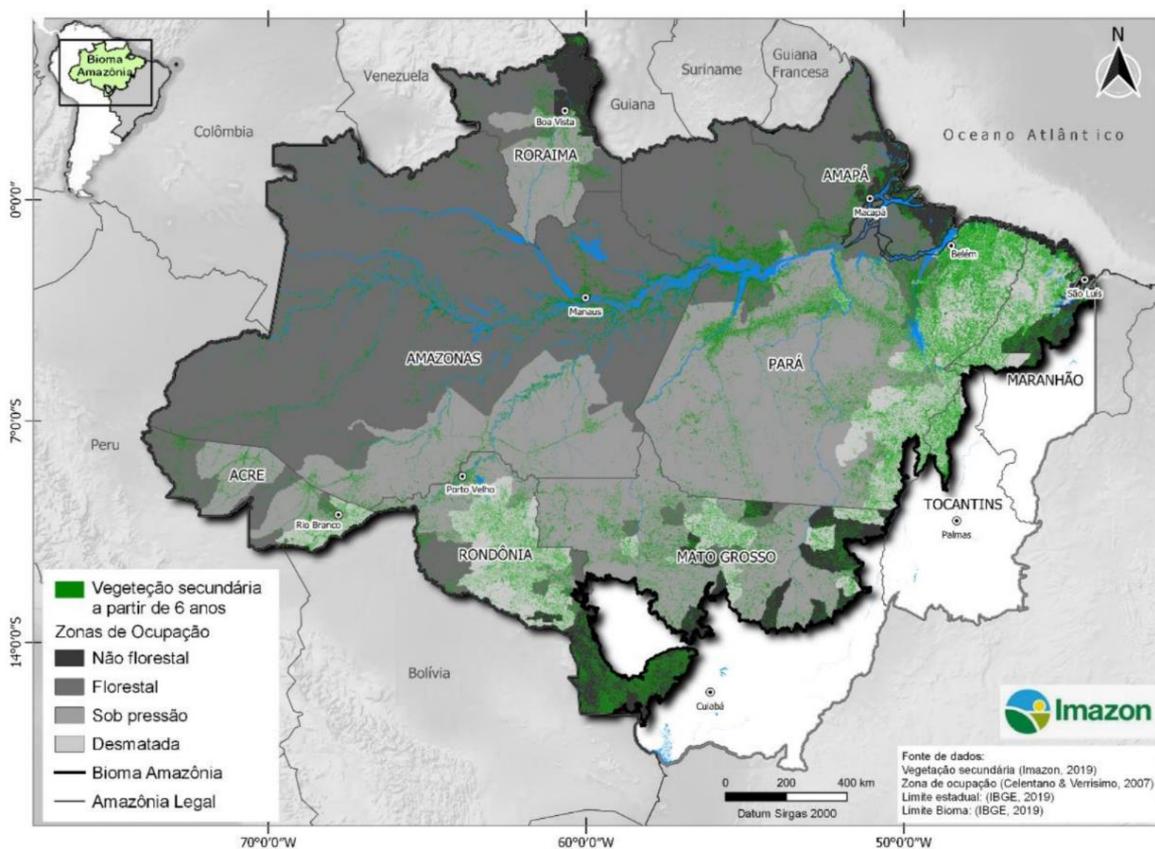
Uma vez que temos um mapa binário, como no caso dos mapas fornecidos pelo MapBiomias, podemos aplicar a mesma reamostragem para a resolução utilizada no projeto (1km²) onde, agora, os valores por *pixel* são as porcentagens de área de vegetação secundária.

Como já foi dito na seção de “Uso e cobertura do solo”, esta porcentagem foi então removida das demais classes de uso e cobertura de maneira proporcional a fim de que a soma das porcentagens

de uso e cobertura (agora incluindo vegetação secundária como área restaurável) continuasse resultando em 1 (100%).

Por fim admitimos, para os *pixels* em áreas de vegetação secundária, que seu custo de oportunidade é nulo já que estas áreas não são mais utilizadas para fins econômicos. Por outro lado, a implementação da restauração nessas áreas tem custo mínimo pois será necessário apenas o cercamento.

Figura 13. Localização da vegetação secundária com idade mínima de 6 anos nas zonas de ocupação do bioma Amazônia, em 2019



Fonte: Pinto et al. 2021

Distribuição de Pesos Ótimos

Para todos os cenários, todos os critérios foram normalizados, evitando assim vieses causados pelas diferenças entre a distribuição dos dados de cada variável. A PLI minimiza ou maximiza o valor da função objetiva (OBJ; função matemática que descreve a relação entre benefícios e custos) sujeita a um conjunto de restrições e condicionada às variáveis de decisão (Benayoun et al 1971). A estrutura geral da OBJ utilizada foi a seguinte:

$$OBJ_i = \frac{w_{cb}CB_i + w_{bd}BD_i + w_{ps}PS_i + w_{ap}AP_i + w_{as}AS_i}{w_{co}CO_i + w_{ci}CI_i}$$

onde CB corresponde ao potencial da unidade de planejamento i para sequestro e estoque de carbono, BD corresponde ao potencial da unidade de planejamento i para conservação da biodiversidade, PS corresponde ao potencial da unidade de planejamento i para retorno socioeconômico, AP corresponde ao potencial da unidade de planejamento i para Áreas protegidas e AS corresponde ao potencial da unidade de planejamento i para assentamentos. CO e CI correspondem aos custos de oportunidade e de implementação da recuperação da vegetação nativa, respectivamente, para a unidade de planejamento i . Os parâmetros w_{cb} , w_{bd} , w_{ps} , w_{ap} , w_{as} , w_{co} e w_{ci} representam os pesos a serem determinados para os critérios de carbono, biodiversidade, potencial de retorno socioeconômico, áreas protegidas, assentamentos, custo de oportunidade e custo de implementação, respectivamente.

Para cada cenário, foi possível fazer a customização completa da OBJ de acordo com os objetivos estabelecidos. Por exemplo, no cenário que visa somente à *Conservação da Biodiversidade*, a variável redução do potencial do risco de extinção de espécies (BD) recebeu peso igual a um ($w_{bd} = 1$), enquanto os demais benefícios e custos receberam peso nulo (w_{cb} , w_{ps} , w_{ap} , w_{as} , w_{co} e $w_{ci} = 0$). O mesmo processo foi repetido para cada cenário que considera apenas variáveis individuais. No cenário de *Redução de Custos*, tanto o custo de implementação quanto o custo de oportunidade receberam peso 1 (w_{co} e $w_{ci} = 1$), enquanto as variáveis de benefícios receberam peso nulo (w_{bd} , w_{cb} , w_{ps} , w_{ap} e $w_{as} = 0$).

Já para o cenário *Multicritério*, optamos por uma abordagem que permitisse maximizar a relação entre os benefícios e os custos. Neste caso, as áreas protegidas (UCs e TIs) e assentamentos agrícolas foram incorporados à análise na forma de variáveis de desempate com peso equivalente a 0,1. Para as variáveis restantes, foram testadas combinações de pesos diferentes entre os três benefícios, para que o cenário apresentasse a solução mais balanceada, ou seja, melhor performance entre redução no risco de extinção de espécies, potencial de sequestro de carbono,

retorno socioeconômico e redução de custos. Como resultado, para a variável de redução no risco de extinção de espécies foi definido um peso ótimo igual a 50, o potencial de sequestro de carbono peso 10, o potencial de retorno socioeconômico peso 1000 e ambos os custos peso 1. A abordagem utilizada para a escolha destes valores se baseia na maximização de uma métrica conjunta dos valores agregados dos benefícios. A métrica é dada pela razão entre a média dos valores agregados e o desvio padrão entre estes mesmos valores. Assim sendo, buscamos, com essa metodologia, a combinação de pesos que apresenta um melhor balanço entre todos os benefícios, evitando valores extremos para quaisquer variáveis e permitindo um benefício agregado mais igualitário entre todas elas.

www.amazonia2030.org.br

