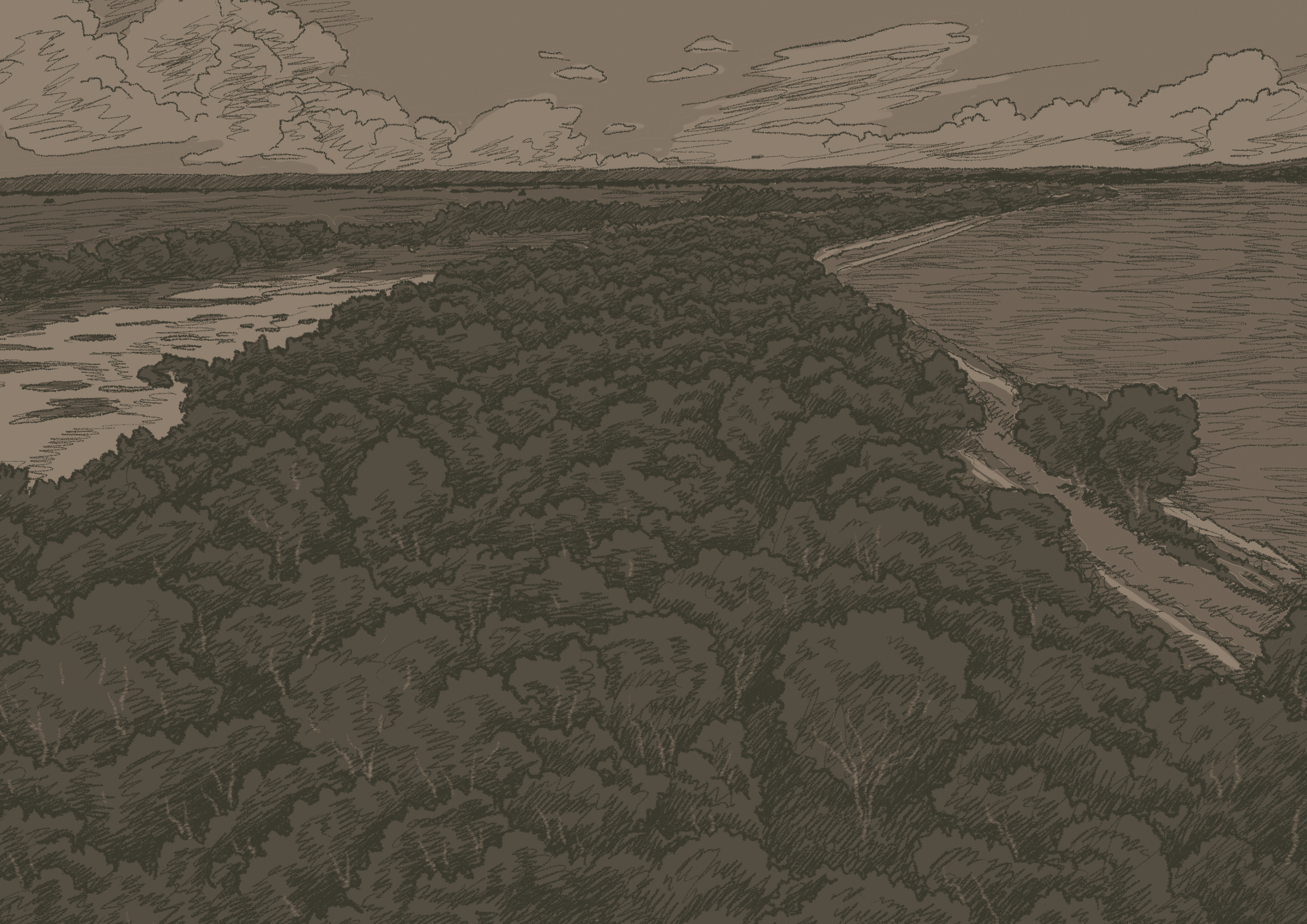
CAPTURA DE CARBONO

EM 15 ANOS DE RESTAURAÇÃO POR SEMEADURA DIRETA NO ARCO DA RESTAURAÇÃO





CAPTURA DE CARBONO EM 15 ANOS DE RESTAURAÇÃO POR SEMEADURA DIRETA NO ARCO DA RESTAURAÇÃO

Silvia Rodrigues
Universidade de Brasília

Ana Paula Ferez
Universidade de São Paulo

Eduardo Malta Campos Filho
Instituto Socioambiental

Marcela Pyles
Biomas SA

Matheus Rezende de Mesquita Correia
Instituto Socioambiental

Lara Aranha da Costa
Instituto Socioambiental

Danielle Celentano
Instituto Socioambiental

Daniel Luis Mascia Vieira
Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia

ISBN: 978-65-88037-36-2



CAMINHOS da SEMENTE

CAPTURA DE CARBONO

EM 15 ANOS DE RESTAURAÇÃO POR SEMEADURA DIRETA NO ARCO DA RESTAURAÇÃO

RESUMO

A restauração florestal é uma estratégia fundamental para a mitigação das mudanças climáticas. Neste estudo, quantificamos os estoques e o incremento de carbono em áreas restauradas por semeadura direta de espécies nativas, fortalecendo a base científica para sua modelagem e aplicação em projetos de carbono ARR no Brasil. Apresentamos uma cronossequência de 15 anos resultante do monitoramento de 99 parcelas em áreas restauradas no Mato Grosso, na região das nascentes do rio Xingu. Os resultados mostram que a semeadura direta pode promover um acúmulo de carbono rápido e consistente, alcançando 67% do potencial máximo regional aos 15 anos. O incremento de carbono no percentil 90 foi de 1,96 tC ha^{-1} ano^{-1} na faixa de 1 a 5 anos, de 4,92 tC ha^{-1} ano^{-1} entre 6 e 10 anos, e de 6,67 tC ha^{-1} ano^{-1} na faixa de 11 a 15 anos, valores comparáveis equivalentes a taxas reportadas para plantios de mudas nativas e superiores à taxa de regeneração natural na Amazônia. Os resultados evidenciam o elevado potencial da semeadura direta como estratégia custo-efetiva para restauração em larga escala, com benefícios para o sequestro de carbono, biodiversidade e impacto social positivo.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 8

2. MÉTODOS 12

2.1. Estimativa de Carbono e Incremento Anual 13

2.2. Indicador de Recuperação e Carbono Potencial 14

3. RESULTADOS 16

3.1. Estoque de Carbono Acima do Solo 17

3.2. Taxa de Incremento Anual por Classe de Idade 19

3.3. Indicadores Derivados do Índice Relativo de Recuperação 20

4. DISCUSSÃO 22

5. CONCLUSÃO 26

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 28

ANEXOS 32

1. INTRODUÇÃO

A restauração de áreas degradadas é uma ação essencial para o restabelecimento de inúmeros serviços ecossistêmicos, dentre eles a regulação do clima (Gann et al., 2019). Monitorar os estoques de biomassa em áreas de restauração florestal contribui para orientar os projetos de carbono, visando alcançar resultados climáticos mais eficazes (Brancalion & Chazdon, 2017).

Um método de restauração ativa, pouco oneroso e com alto impacto social, que vem sendo cada vez mais aplicado e estudado, é a semeadura direta, também conhecida como muvuca de sementes (Raupp et al., 2020; Urzedo et al., 2022, 2020). A muvuca consiste em plantar uma mistura de sementes de espécies nativas de diferentes ciclos de vida e de adubação verde diretamente no solo preparado das áreas degradadas (Campos-Filho et al., 2013; Vieira et al., 2020). Devido à grande quantidade de sementes utilizadas, a densidade inicial de recrutas é alta, promovendo uma estrutura semelhante ao processo de regeneração natural (Freitas et al. 2019).

A quantidade de sementes nativas demandada pelo método de semeadura direta gera, e pode gerar muito mais, trabalho sustentável, renda justa e autonomia para milhares de pessoas coletoras de sementes. Estas estão espalhadas por áreas conservadas de vegetação nativa em territórios de populações tradicionais e da agricultura familiar (Indígenas, Assentados da Reforma Agrária, Coletores urbanos e periurbanos, Agricultores familiares, Torrozeiros, Ribeirinhos, Extrativistas, Geraizeiros, Quilombolas, Pajeuzeiros e Veredeiros). A iniciativa Redário agrega, em 2026, 3.312 pessoas, das quais 2.071 são mulheres (62,5%) e 2.096 (63,5%) são de povos indígenas, quilombolas e comunidades tradicionais, em 37 Redes de Sementes no Brasil, atuantes em 19 Unidades da Federação e 258 municípios, com o potencial de produção de 220 toneladas de sementes por ano, de 259 espécies e que faturaram 8 milhões de reais em 2025.

O objetivo deste estudo foi quantificar os estoques e o incremento de carbono acima do solo em áreas em restauração por semeadura direta, utilizando inventários florestais e modelos alométricos. Dessa forma, esperamos contribuir com uma base científica para referenciar projetos de ARR (*Afforestation, Reforestation, and Revegetation*) que vêm se ampliando no Brasil.

Sistematizar as trajetórias de crescimento da vegetação e acúmulo de carbono foi possível graças a anos de monitoramento de 104 parcelas alocadas no Arco da Restauração no sudeste da Amazônia. Elas representam milhares de hectares em restauração por semeadura direta de espécies nativas no nordeste do estado de Mato Grosso, na região das nascentes do rio Xingu, por diferentes projetos do Instituto Socioambiental (ISA), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa-Recursos Genéticos e Biotecnologia) e outros parceiros.

Ajustamos modelos de acúmulo de biomassa até os 15 anos para avaliar a performance média das áreas e a performance ótima (percentil 90), que poderá ser replicada em outras áreas com bom preparo de solo, controle de plantas competidoras e exclusão do fogo e do gado após a semeadura.



Foto: Guilherme Pompiano



2. MÉTODO

Foram organizados dados de inventários florestais de projetos de restauração em Mato Grosso. As áreas avaliadas foram restauradas entre 2007 e 2015, no âmbito da Iniciativa "*Y Ikatu Xingu*", parceria ISA–Embrapa–UnB (67 parcelas de 500 m^2; 50 × 10 m), e do projeto Carbono Socioambiental do Xingu (37 parcelas de 1.000 m^2; 50 × 20 m). No total, foram monitoradas 104 parcelas permanentes em duas campanhas de monitoramento com intervalo de cinco anos (208 observações). Foram excluídas 5 parcelas que sofreram incêndio, tiveram entrada de gado ou foram dominadas por capins exóticos, restando 99 parcelas (198 observações) para ajuste dos modelos.

2.1. ESTIMATIVA DE CARBONO E INCREMENTO ANUAL

A biomassa acima do solo foi estimada por meio da equação alométrica proposta por Chave e colaboradores (2014), e convertida em estoque de carbono pelo fator de 0,47, conforme recomendado pelo IPCC (2006).

Para representar a trajetória de acúmulo de carbono ao longo da cronossequência, testou-se um conjunto de modelos de crescimento não-lineares amplamente utilizados na literatura sobre biomassa florestal tropical (Chapman-Richards, Weibull, Logístico e Gompertz). O modelo de Chapman-Richards [AGB(t) = K × (1 – exp(–k × t))^c] apresentou o melhor ajuste e foi adotado como modelo final. A assíntota (K) foi fixada no equivalente em AGB do estoque de carbono potencial da região (CPOT, ver seção 2.2), já que os 15 anos da cronossequência ainda não permitem estimar esse parâmetro de forma confiável a partir dos próprios dados. Os parâmetros de taxa (k = 0,154) e forma (c = 3,88) foram estimados por mínimos quadrados não-lineares, com erro padrão ajustado por cluster (parcela) para tratar a não-independência das medições repetidas.

Para representar as áreas de melhor performance, ajustou-se um segundo modelo da mesma forma funcional, por regressão quantílica não-linear no percentil 90, mantendo o mesmo K fixo.

A taxa de incremento anual de carbono (tC ha^{-1} ano^{-1}) foi obtida dividindo-se o estoque de carbono predito por cada modelo pela respectiva idade da restauração. Para captar o potencial observado em campo de forma independente do modelo ajustado, obteve-se diretamente dos dados brutos o percentil 90 do incremento anual em três faixas etárias (1-5, 6-10 e 11-15 anos).

2.2. INDICADOR DE RECUPERAÇÃO E CARBONO POTENCIAL

Para avaliar o sucesso da restauração, os valores absolutos de carbono (tC ha-1) foram convertidos em um Índice Relativo de Recuperação (Rt), que expressa a proporção do estoque observado em relação ao carbono potencial (CPOT). Essa padronização permite comparar diferentes regiões e tipologias florestais sob o princípio da similaridade relativa (Poorter et al., 2021).

O CPOT foi estabelecido em 72,3 tC ha-1, valor que representa o estoque de referência de florestas maduras regionais. Este valor corresponde ao percentil 90 (P90) do estoque de carbono em um conjunto de 37 parcelas de florestas maduras de referência na região (Anexo II). Desse total, 30 são fragmentos nativos do Inventário Florestal Nacional (IFN) e 7 são parcelas permanentes da rede Forest Plots (Mitchard et al. 2014). O uso do percentil 90, em vez do valor máximo observado, garante um referencial realista e pouco sensível a valores extremos.

A RECUPERAÇÃO RELATIVA FOI CALCULADA PELA EQUAÇÃO:

$$R_t = \frac{C_t}{C_{POT}} \times 100$$

Onde Rt é Índice Relativo de Recuperação, Ct é o valor estimado pelo modelo médio de Chapman-Richards e CPOT é o estoque de referência.

A partir da curva Rt, derivaram-se indicadores estratégicos para a análise da trajetória sucessional:

- R_5, R_{10}, R_{15} — recuperação estimada aos 5, 10 e 15 anos,
- T_{50}— tempo necessário para atingir 50% de CPOT.

Esses indicadores combinam valores absolutos (tC ha^{-1}) e relativos (% de CPOT), facilitando a interpretação da trajetória de restauração e sua aplicação em avaliações técnicas e em projetos de carbono.

Foto: Flavio Forner

3. RESULTADOS

3.1. ESTOQUE DE CARBONO ACIMA DO SOLO

A curva ajustada pelo percentil 90 revela um incremento de 4,6 tC ha^{-1} ano^{-1} nas áreas semeadas com melhor performance aos 15 anos, valor 43% maior que a tendência central do mesmo modelo (3,2 tC ha^{-1} ano^{-1}). Os modelos ajustados pelo método de Chapman-Richards para a tendência central e o percentil 90 do acúmulo de biomassa são apresentados na Figura 1.

ACÚMULO DE CARBONO POR IDADE DE RESTAURAÇÃO
Tendência central e percentil90 ajustados pelo modelo de Chapman-Richards

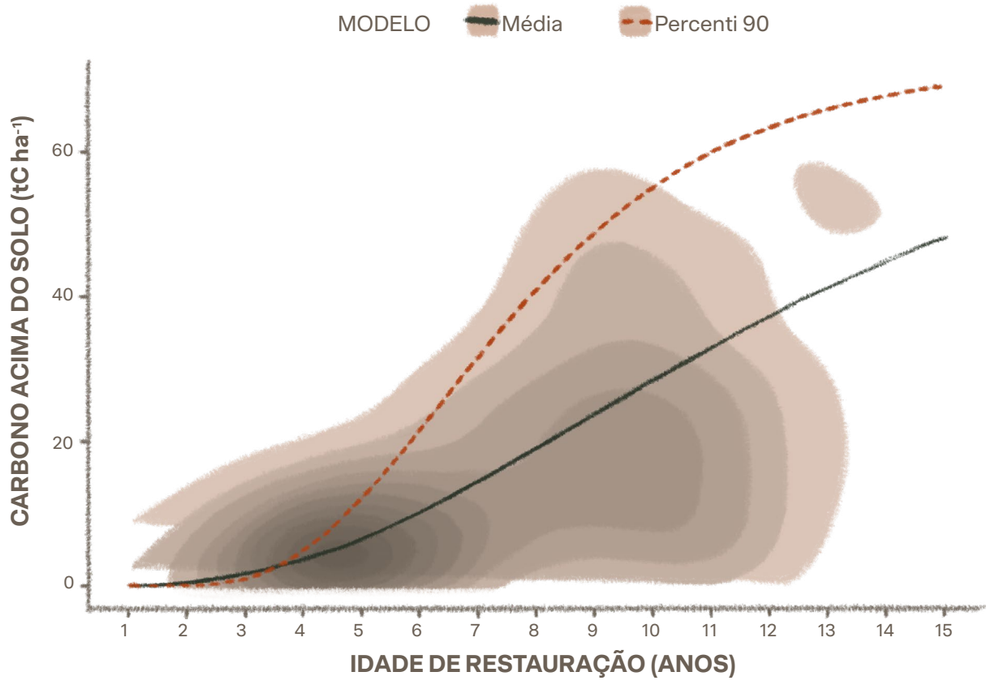


FIGURA 1. Curvas de acúmulo de carbono acima do solo (tC ha^{-1}) em função da idade da restauração, ajustadas pelo modelo de crescimento de Chapman-Richards. A linha preta sólida representa a tendência central (R^2 = 0,37; RSE = 36,9 Mg ha^{-1}; F = 56,3; p < 0,001; n = 198); a linha vermelha tracejada representa o percentil 90 (pseudo-R^1 = 0,36; n = 198), referente às áreas de melhor desempenho. Os dados brutos são exibidos como contornos de densidade para preservar a confidencialidade de dados não publicados.

Foto: Guilherme Pompiano

3.2. TAXA DE INCREMENTO ANUAL POR CLASSE DE IDADE

O incremento observado em campo (percentil 90 por faixa de idade) confirma a tendência de aceleração indicada pelo modelo, com valores de 1,96 tC ha^{-1} ano^{-1} na faixa de 1 a 5 anos, 4,92 entre 6 e 10 anos, e 6,67 entre 11 e 15 anos (Figura 2). Nas faixas inicial e final, os valores observados ficam acima da curva ajustada pelo modelo Chapman-Richard, o que é esperado dado que o modelo impõe um teto de crescimento fixo (C_{POT}) que limita as predições nas extremidades.

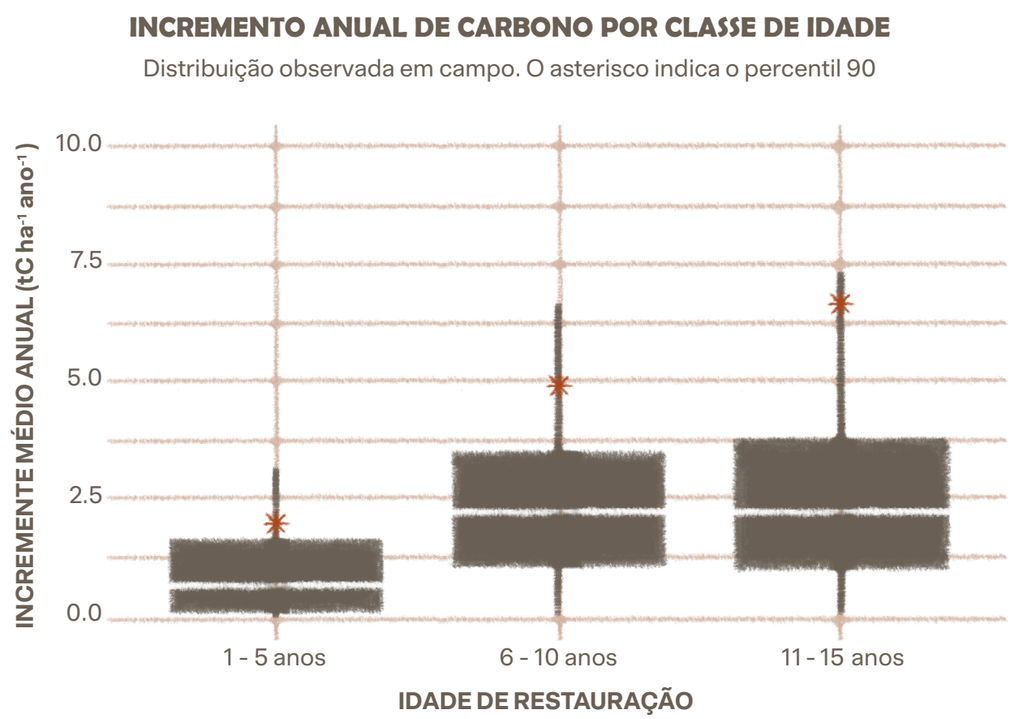


FIGURA 2. Distribuição do incremento anual de carbono (tC ha^{-1} ano^{-1}) por classe de idade. O asterisco vermelho indica o percentil 90 do incremento anual observado em cada faixa de idade.

3.3. INDICADORES DERIVADOS DO ÍNDICE RELATIVO DE RECUPERAÇÃ

A trajetória de restauração demonstra um crescimento progressivo da biomassa, atingindo 39,3% da recuperação total (R_{10}) aos 10 anos de idade (Figura 3). O tempo necessário para alcançar metade do potencial de carbono da região (T_{50}) foi estimado em aproximadamente 11,7 anos. Aos 15 anos a área já apresenta 66,8% de recuperação (R_{15}) em relação ao potencial máximo de estoque de 72,3 tC ha^{-1}.

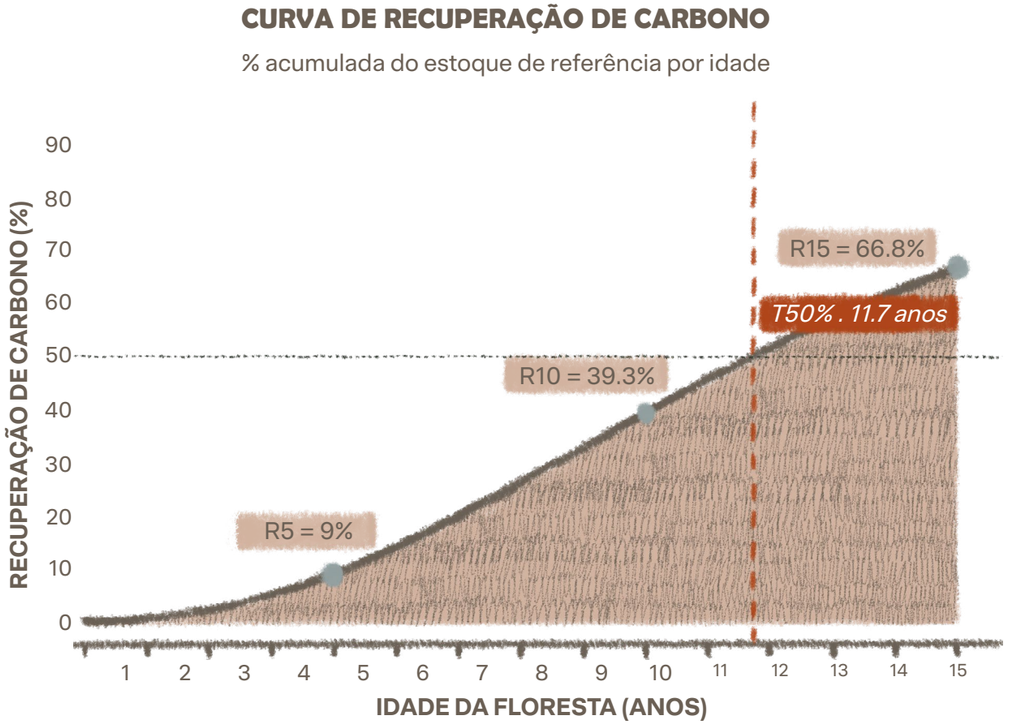


FIGURA 3. Curva de recuperação estimada do carbono (%) em relação ao potencial de carbono da região (CPOT), ajustada pelo modelo médio de Chapman-Richards. A linha sólida representa essa trajetória, com destaque para as taxas de recuperação aos 5 (R_5 = 9,0%), 10 (R_{10} = 39,3%) e 15 anos (R_{15} = 66,8%). A linha vertical tracejada indica o tempo necessário para atingir 50% do potencial de estocagem (T_{50} ≈ 11,7 anos).

Foto: Guilherme Pompiano

4. DISCUSSÃO

As taxas de incremento observadas neste estudo podem ser contextualizadas frente a outras estratégias de restauração e regeneração. Em florestas amazônicas sob regeneração natural ótima, a taxa de incremento é de 3,68 tC ha^{-1} ano^{-1} (Giles et al. 2024), e um estudo de modelos de biomassa em área restaurada com diferentes manejos na Mata Atlântica reportou taxas entre 1,1 e 6,2 tC ha^{-1} ano^{-1} aos 12 anos (Rasera, 2019). A tendência central da semeadura direta neste estudo fica abaixo da taxa de regeneração natural reportada por Giles et al. (2024); o percentil 90 a supera em 25%.

Quando comparada especificamente a plantios de mudas, a semeadura direta também se mostra competitiva. Aos 6 anos, o modelo percentil 90 da semeadura direta (3,60 tC ha^{-1} ano^{-1}) superam plantios de mudas com manejo intensivo na mesma idade (3,03 tC ha^{-1} ano^{-1}) na Mata Atlântica de São Paulo (Ferez et al. 2015). Aos 10 anos, o percentil 90 da semeadura direta (5,51 tC ha^{-1} ano^{-1}) também supera a taxa média de 4,93 tC ha^{-1} ano^{-1} reportada para plantios de mudas no mesmo bioma pelo Projeto Agrupado ARR Corredores da Vida (Biofílica e IPÊ 2023).

Observar o percentil 90 da taxa de acúmulo de carbono é realista para a modelagem de carbono nas áreas observadas neste estudo, haja vista que, Nas áreas de restauração consideradas neste estudo, não houve fertilização nem descompactação profunda do solo. Algumas áreas ainda tiveram ocorrência de deriva de herbicida, cercas quebradas e pouco ou nenhum controle das plantas competidoras, embora áreas que realmente falharam por esses motivos tenham sido excluídas da análise. A taxa do percentil 90 pode ser replicada em outros locais, ou mesmo aumentada, em condições adequadas e utilizando práticas silviculturais intensivas, como o bom preparo e fertilização do solo, controle eficaz de plantas competidoras e a exclusão de fogo e gado. As taxas de incremento anual da semeadura direta, comparáveis às de plantios de mudas nativas, demonstram a alta performance das melhores áreas de semeadura direta e permitem recomendar a técnica para projetos de carbono. Um conjunto de diretrizes práticas para maximizar o sequestro de carbono em áreas restauradas por semeadura direta é apresentado no ANEXO III.

4. DISCUSSÃO

A escassez de estudos de restauração ativa por plantio de mudas na Amazônia, em contraste com a Mata Atlântica, limita comparações regionais mais diretas: Gardon et al. (2020), em revisão sistemática da literatura brasileira, observam que a Amazônia é dominada por estudos de regeneração natural (passiva), enquanto a restauração ativa por mudas se concentra majoritariamente na Mata Atlântica. O mesmo estudo destaca a relevância dos indivíduos de pequeno porte no acúmulo inicial de biomassa: em restaurações jovens (2-4 anos), até 100% da biomassa acima do solo pode estar concentrada em indivíduos com DAP entre 1 e 5 cm, proporção que cai para menos de 10% em restaurações mais avançadas (12-14 anos). Isso reforça a importância de mensurar adequadamente a alta densidade de indivíduos pequenos que se estabelecem por semeadura direta nos primeiros anos da restauração, etapa em que esses indivíduos podem representar a maior parte do carbono acumulado.

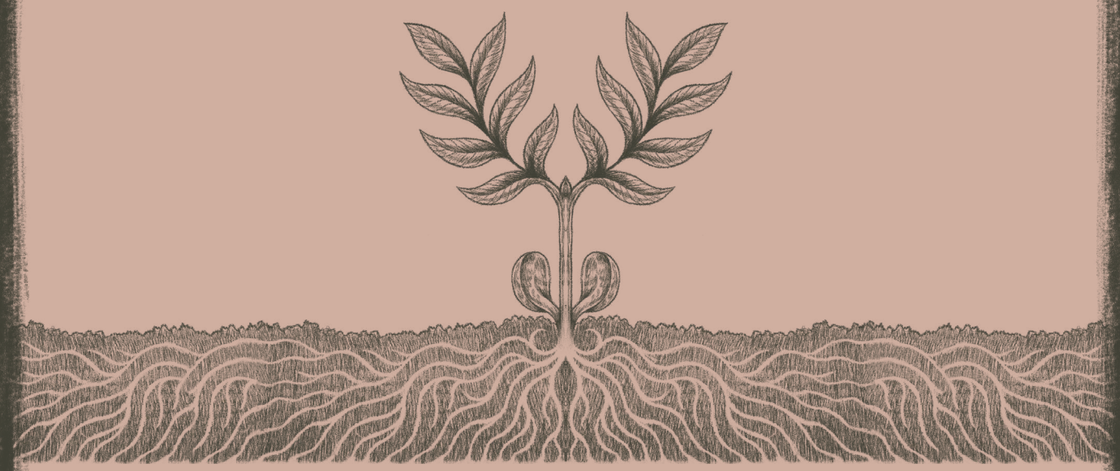
Embora a semeadura direta de nativas seja um método que vem se consolidando há mais de 20 anos no Brasil, ainda podemos melhorá-la, ao seguir alguns manejos silviculturais já utilizados em plantios de mudas. Claramente há espaço para melhorar ainda mais a performance para sequestrar carbono e agregar biodiversidade e impacto social positivo. Este estudo demonstra que a restauração por semeadura direta pode promover trajetórias rápidas e consistentes de acúmulo de carbono, quando avaliada em relação ao potencial de florestas de referência. Ao incorporar métricas de recuperação relativa, avançamos além das estimativas absolutas, permitindo uma avaliação mais robusta do progresso ecológico e do potencial de mitigação climática associado à restauração florestal.

Diante da crescente demanda por soluções escaláveis de remoção de carbono, a semeadura direta emerge como uma estratégia particularmente relevante, combinando alta eficiência ecológica, baixo custo operacional e viabilidade de implementação em larga escala. Esses atributos a posicionam como uma alternativa estratégica para projetos ARR e para o avanço de soluções baseadas na natureza em paisagens tropicais.



Foto: Bianca Moreno

5.
CONCLUSÃO



O estoque de carbono nas áreas em restauração aumenta de forma não linear com a idade ao longo dos 15 anos avaliados. A semeadura direta apresenta aos 15 anos taxa de incremento anual de carbono de 4,6 tC ha^{-1} ano^{-1} considerando as áreas de melhor desempenho (percentil 90). Considerando o carbono potencial máximo (CPOT regional = 72,3 tC ha^{-1}) atinge 9% aos 5 anos, 39,3%) aos 10 anos e 66,8% aos 15 anos. Essas taxas demonstram a equivalência da técnica como estratégia eficiente, de baixo custo e escalável para a mitigação climática em paisagens tropicais. Além desse potencial, a semeadura direta gera impacto social direto: a demanda por sementes nativas sustenta coletores organizados em redes comunitárias. A adoção de práticas voltadas à maximização do sequestro de carbono (ANEXO III) pode ampliar simultaneamente os estoques de carbono e os benefícios socioeconômicos da cadeia de sementes, posicionando a semeadura direta como estratégia que integra mitigação climática, conservação da biodiversidade e inclusão social.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Biofílica Ambipar Environmental Investments & Instituto de Pesquisas Ecológicas - IPÊ. (2023). Projeto Agrupado ARR Corredores de Vida (Versão 6.0). Biofílica Ambipar Environmental Investments e Instituto de Pesquisas Ecológicas - IPÊ. Disponível em: https://registry.verra.org/app/projectDetail/CCB/3727

Brancalion, P. H. S., & Chazdon, R. L. (2017). Beyond hectares: four principles to guide reforestation in the context of tropical forest and landscape restoration. Restoration Ecology, 25(4), 491-496. https://doi.org/10.1111/rec.12519

Campos-Filho, E.M., Da Costa, J.N.M.N., De Sousa, O.L., Junqueira, R.G.P., 2013. Mechanized direct-seeding of native forests in Xingu, Central Brazil. Journal of Sustainable Forestry 32, 702–727. https://doi.org/10.1080/10549811.2013.817341.

Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. Global Change Biology, 20(10), 3177-3190. https://doi.org/10.1111/gcb.12629

Ferez, A. P. C., et al. (2015). Silvicultural opportunities for increasing carbon stock in restoration of Atlantic forests in Brazil. Forest Ecology and Management, 350, 40-45. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.036

Freitas, M. G., Rodrigues, S. B., Campos-Filho, E. M., do Carmo, G. H. P., da Veiga, J. M., Junqueira, R. G. P., & Vieira, D. L. M. (2019). Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years. Forest ecology and management, 438, 224-232. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.024

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., ... & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. Restoration Ecology, 27(S1), S1-S46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

Gardon, F. R., Santos, R. F., & Rodrigues, R. R. (2020). Brazil's forest restoration, biomass and carbon stocks: A critical review of the knowledge gaps. Forest Ecology and Management, 462, 117972. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117972

Giles, A.L., Schietti, J., Rosenfield, M.F. et al. (2024). Simple ecological indicators benchmark regeneration success of Amazonian forests. Commun Earth Environ 5, 780 https://doi.org/10.1038/s43247-024-01949-9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Intergovernmental Panel On Climate Change - IPCC. (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: agriculture, forestry and other land use. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), v.4.

Mitchard, E. T. A., et al. (2014). Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. Global Ecology and Biogeography, 23(8), 935–946. https://doi.org/10.1111/geb.12168

Poorter, L., et al. (2021). Multidimensional tropical forest recovery. Science, 374(6573), 1370–1376. https://doi.org/10.1126/science.abh3629

Raupp, P.P., Ferreira, M.C., Alves, M., Campos-Filho, E.M., Sartorelli, P.A.R., Consolaro, H.N., Vieira, D.L.M., 2020. Direct seeding reduces the costs of tree planting for forest and savanna restoration. Ecological Engineering 148, 105788. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105788.

Rasera, S. (2019). Biomassa e carbono no estrato arbóreo em área restaurada na Mata Atlântica. USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Piracicaba. Available at: https://doi.org/10.11606/D.11.2019.tde-27032019-163129.

Urzedo, D.I., Neilson, J., Fisher, R., Junqueira, R.G.P., 2020. A global production network for ecosystem services: The emergent governance of landscape restoration in the Brazilian Amazon. Global Environmental Change 61, https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102059.

Urzedo, D., Pedrini, S., Vieira, D.L.M., Sampaio, A.B., Souza, B.D.F., Campos-Filho, E.M., Piña-Rodrigues, F.C.M., Schmidt, I.B., Junqueira, R.G.P., Dixon, K., 2022. Indigenous and local communities can boost seed supply in the UN decade on ecosystem restoration. Ambio 51, 557–568. https://doi.org/10.1007/s13280-021-01593-z.

Vieira, D. L. M., Campos Filho, E. M., Ferreira, M. C., Miranda, E., Rocha, G. B., Alves, M., Sampaio, A., and Antoniazzi, L., 2020. Guia de semeadura direta para restauração de florestas e cerrados. Agroicone Ltda, São Paulo, SP. Available at: https://www.agroicone.com.br/wp-content/uploads/2021/02/Guia_semeadura_florestascerrados.pdf

Foto: Guilherme Pompiano

ANEXOS

ANEXO I

TABELA 1. Estimativas de estoque de biomassa (BAS), carbono (CAS) acima do solo e índice de recuperação relativa (Rt) gerados pelo modelo de Chapman-Richards (tendência média e percentil 90) com base em 198 observações de biomassa amostradas em 99 parcelas permanentes em áreas restauradas por muvuca na região da bacia do Rio Xingu. O Rt expressa o estoque estimado como proporção (%) do carbono potencial da região (CPOT = 72,3 tC ha^{-1}), definido pelo percentil 90 do estoque de fragmentos nativos maduros do Inventário Florestal Nacional.

IDADE	IMA BAS - médio (t ha^{-1})	BAS -percentil 90 (t ha^{-1})	CAS - médio (t C^{-1} ha^{-1})	CAS -percentil 90 (t C^{-1} ha^{-1})	Rt (%)
1	0.08	0.00	0.04	0.00	0.05
2	0.89	0.21	0.42	0.10	0.58
3	3.26	2.54	1.53	1.20	2.12
4	7.58	10.65	3.56	5.01	4.93
5	13.84	25.88	6.50	12.17	8.99
6	21.71	46.00	10.20	21.62	14.11
7	30.75	67.39	14.45	31.67	19.99
8	40.50	87.19	19.03	40.98	26.33
9	50.54	103.93	23.75	48.85	32.85
10	60.51	117.25	28.44	55.11	39.34
11	70.17	127.41	32.98	59.88	45.61
12	79.31	134.95	37.28	63.43	51.56
13	87.83	140.45	41.28	66.01	57.10
14	95.65	144.39	44.96	67.86	62.18
15	102.76	147.20	48.30	69.18	66.80

ANEXO II

TABELA 2. Estimativas de Incremento Médio Anual (IMA) de biomassa (BAS) e carbono acima do solo (CAS) gerados pelo modelo de Chapman-Richards (tendência central e percentil 90) com base em 198 observações de biomassa amostradas em 99 parcelas permanentes em áreas restauradas por muvuca na região da bacia do Rio Xingu.

IDADE	IMA BAS - médio (t ha^{-1} ano^{-1})	90 (t ha^{-1} ano^{-1})	IMA CAS - médio (t ha^{-1} ano^{-1})	90 (t ha^{-1} ano^{-1})
1	0.08	0.00	0.04	0.00
2	0.45	0.10	0.21	0.05
3	1.09	0.85	0.51	0.40
4	1.90	2.66	0.89	1.25
5	2.77	5.18	1.30	2.43
6	3.62	7.67	1.70	3.60
7	4.39	9.63	2.06	4.52
8	5.06	10.90	2.38	5.12
9	5.62	11.55	2.64	5.43
10	6.05	11.72	2.84	5.51
11	6.38	11.58	3.00	5.44
12	6.61	11.25	3.11	5.29
13	6.76	10.80	3.18	5.08
14	6.83	10.31	3.21	4.85
15	6.85	9.81	3.22	4.61

ANEXO II

Estoque de carbono acima do solo (tC ha^{-1}) em 37 parcelas de florestas maduras de referência na região das nascentes do rio Xingu, utilizadas para o cálculo do carbono potencial (C_{POT} = 72,3 tC ha^{-1}, correspondente ao percentil 90 da distribuição). As parcelas são provenientes de 30 unidades amostrais do Inventário Florestal Nacional (IFN) e 7 parcelas permanentes da rede ForestPlots (Mitchard et al. 2014).

Fonte	ID	Carbono acima do solo (tC ha^{-1})
IFN	MT_1788	16.64
IFN	MT_1937	17.19
IFN	MT_1787	17.32
IFN	MT_1101	17.12
IFN	MT_1788	17.76
IFN	MT_1787	19.23
IFN	MT_1937	21.45
IFN	MT_1101	21.31
IFN	MT_459	25.02
IFN	MT_1360	25.31
IFN	MT_1937	26.25
IFN	MT_1360	26.43
IFN	MT_458	26.03
IFN	MT_1050	29.62
IFN	MT_1050	26.25
IFN	MT_1473	26.43
IFN	MT_1473	26.03
IFN	MT_1050	29.62

Fonte	ID	Carbono acima do solo (tC ha^{-1})
IFN	MT_1473	38.63
IFN	MT_459	39.01
IFN	MT_1101	41.18
IFN	MT_459	41.93
IFN	MT_1788	41.76
IFN	MT_458	41.49
IFN	MT_140	50.65
IFN	MT_1101	50.22
IFN	MT_17.87	54.17
IFN	MT_459	64.25
IFN	MT_1840	66.75
IFN	MT_1840	66.31
ForestPlot	TAN-02	69.64
ForestPlot	TAN-04	71.07
ForestPlot	TAN-03	79.56
ForestPlot	VCR-03	89.78
ForestPlot	VCR-04	71.86
ForestPlot	FLO-01	74.18
ForestPlot	FLO-02	62.23

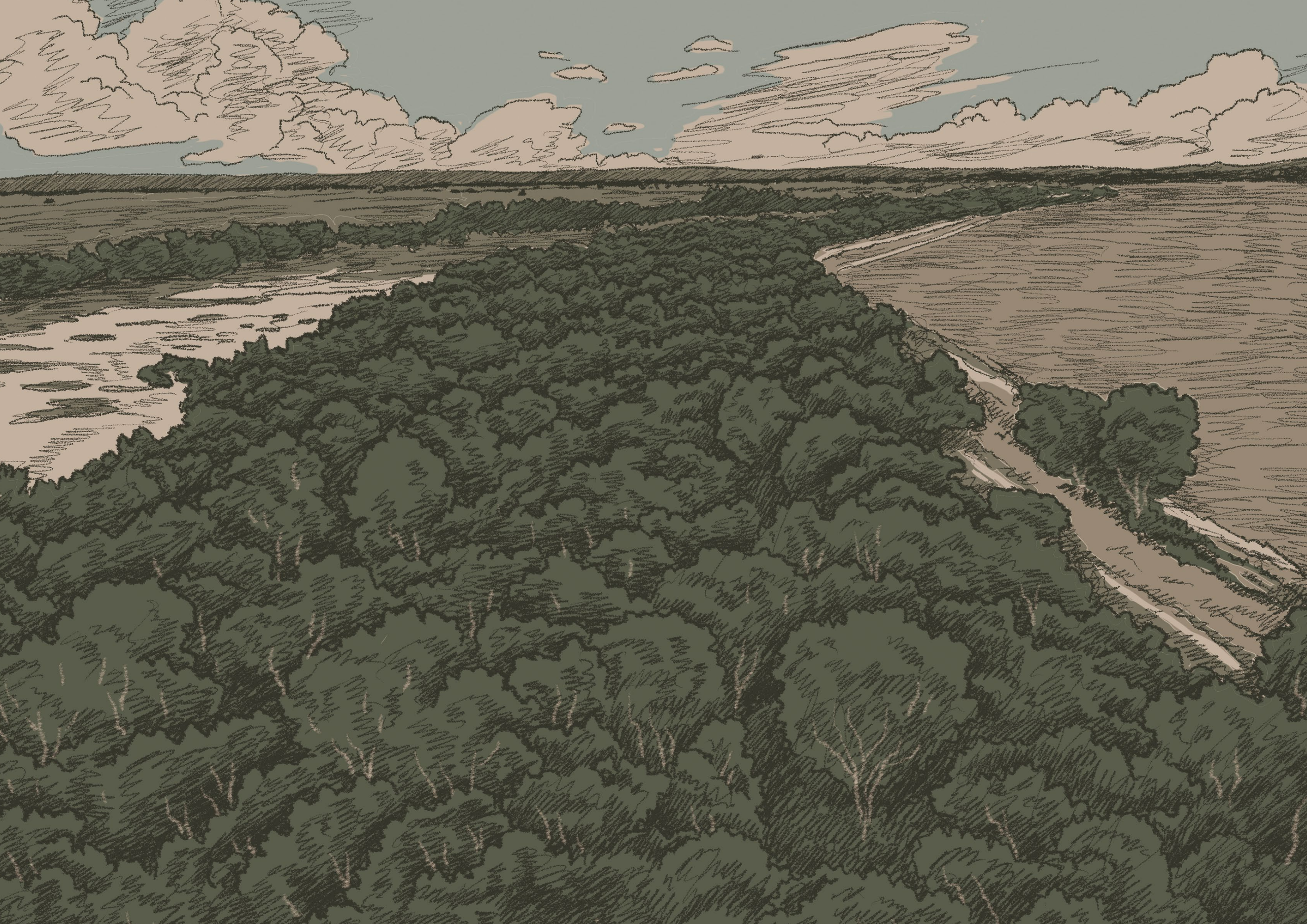
ANEXO III

Diretrizes práticas para maximizar o sequestro de carbono em áreas restauradas por semeadura direta de nativas (muvuca).



ANEXOS

EIXO	DIRETRIZ	RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS
1. Preparo do solo	Definir a forma de semeadura a partir do diagnóstico inicial (1º semestre) e planejar o preparo, cronograma de atividades específicas de cada forma de plantio.	**Lanço:** Controlar plantas exóticas invasoras (roçada + herbicida). Realizar gradagens sucessivas. Preparo na estação seca e semeadura no início das chuvas. **Linha:** Controlar plantas exóticas invasoras. Abrir sulcos mecanicamente com largura (≈10 cm), profundidade (≈ 5 cm) e espaçamentos variados. Preparo pode ser antecipado próximo à semeadura no início das chuvas. **Coveta:** Controlar plantas exóticas invasoras. Abrir covetas com largura (≈10 cm), profundidade (≈ 5 cm) e espaçamentos variados. Definir quantidade de sementes por coveta. Preparo pode ser antecipado próximo à semeadura no início das chuvas.
2. Plantio inicial	Aumentar densidade e diversidade funcional.	Priorizar pioneiras de rápido crescimento (ex: *Senegalia, Mabea, Guazuma, Tachigali, Senna, Solanum*) para acelerar o fechamento do dossel entre 5–10 anos. Incluir espécies não pioneiras de longo ciclo para sustentar o acúmulo após 15 anos.
3. Manejo durante as fases iniciais	Atuar intensamente na fase de maior competição com espécies invasoras	Concentrar recursos até os 8 anos, período de maior incremento. Controlar plantas exóticas invasoras até o fechamento completo do dossel.
4. Metas por região	Ajustar metas ao manejo que cada região consegue sustentar	Onde há manejo mais contínuo, metas mais ambiciosas podem ser alcançadas rapidamente. Em áreas com menor manejo ou forte pressão de gramíneas, gado e fogo, planejar horizontes mais longos e metas progressivas.
5. Monitoramente	Focar nas fases de maior variabilidade.	Intensificar medições até ~12 anos. Reavaliar o desempenho entre 12–15 anos, quando a maior parte da biomassa já está acumulada.
6. Composição de espécies	Planejar o mix de espécies para sustentar o crescimento.	Identificar espécies que mais contribuem para o estoque final. Manter diversidade funcional para garantir resiliência e continuidade do acúmulo no longo prazo.





REALIZAÇÃO:

Instituto Socioambiental

AGROICONE
conhecimento para uma nova economia

REDÁRIO

Embrapa

APOIO:

iCS instituto CLIMA e SOCIEDADE

BEZOS EARTH FUND

Good Energies
POWER FOR A BETTER WORLD

Financiado pela União Europeia

ISBN: 978-65-88037-36-2
CBL
9 786588 037362