

Futuros plausíveis para a Amazônia

Modelagem de cenários de desmatamento na Pan-Amazônia e implicações para as políticas nacionais de conservação

Centro de Sensoriamento Remoto — Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG)

- A integração de infraestrutura transfronteiriça na América do Sul (rotas de integração sul-americanas) tende a reduzir custos de transporte, elevar o valor da terra e empurrar as fronteiras de desmatamento sobre os nove territórios da Pan-Amazônia.
- O **NewSimAmazonia** — modelo espacialmente explícito desenvolvido no CSR-UFMG — projeta o desmatamento até 2050 para os oito países da OTCA e a Guiana Francesa, comparando três cenários: **tendencial (BAU)**, **cumprimento das NDCs** (Contribuição Nacionalmente Determinada) e **linha de base**.
- Cada cenário se traduz em **emissões de CO₂** e **perda de biodiversidade**, e no potencial de geração de **créditos de carbono REDD+** sob a arquitetura ART TREES.
- Uma **plataforma pública e interativa** permite estimar receitas de REDD+ a diferentes preços de carbono, subsidiando decisões baseadas em evidências.

Amazônia sob nova pressão

As paisagens amazônicas passarão por grandes transformações nas próximas décadas. Mais decisivos que os projetos isolados de infraestrutura — rodovias, ferrovias, hidrovias e portos — são os planos transfronteiriços que os integram. Ao reduzir custos de transporte, esses corredores elevam a lucratividade da agropecuária e da extração madeireira, elevam o valor da terra, resultando na concentração da posse da terra e expansão das fronteiras de desmatamento. Antecipar esses efeitos, de modo ex-ante, é condição para planejar o desenvolvimento ambientalmente sustentável, ou seja, sem comprometer o clima, a sociobiodiversidade, diversidade cultural e serviços ecossistêmicos da Amazônia (1, 2).

NewSimAmazonia

O NewSimAmazonia é uma versão aprimorada do SimAmazonia que cobre os territórios amazônicos dos oito países da OTCA mais a Guiana Francesa. Simula, em passos anuais até 2050, onde e a que ritmo o desmatamento tende a avançar, integrando o efeito de infraestrutura de transporte, políticas de conservação e uso da terra. É construído sobre a plataforma livre [Dinamica EGO](#), com código e dados de entrada abertos — garantindo transparência e replicabilidade.

Três cenários para orientar a decisão

Tendencial (BAU). Mantém as tendências atuais e a implementação da infraestrutura planejada, sem novas intervenções de conservação — a trajetória a evitar.

Meta das NDCs. Incorpora os compromissos climáticos de cada país, traduzindo-os em redução progressiva do desmatamento rumo à neutralidade de emissões.

Linha de base. Adota a média histórica de 2019–2023 como referência para medir reduções de desmatamento e as emissões de CO₂ evitadas.

Do desmatamento ao clima, à biodiversidade e ao financiamento

Cada cenário é traduzido em emissões de CO₂ — a partir de mapas de biomassa — e em impactos sobre a biodiversidade (riqueza de espécies, endemismo, diversidade e endemismo filogenéticos). A integração entre cenários de desmatamento e mapas de biodiversidade permite identificar onde futuras pressões territoriais coincidem com áreas de elevado valor biológico. Essas regiões devem receber atenção prioritária no planejamento de áreas protegidas, na fiscalização e na implementação de políticas de uso da terra. A distância entre o cenário tendencial e o das NDCs revela o esforço de

conservação necessário e o volume de emissões evitáveis, que podem ser convertidas em créditos REDD+ sob a arquitetura ART TREES (3) — um canal de financiamento climático em larga escala para governos nacionais e subnacionais.

Plataforma online

A [plataforma online](#) contém mapas e gráficos interativos. São apresentadas as taxas de desmatamento e as emissões de CO₂ resultantes, bem como a possibilidade de créditos REDD+, modificando os parâmetros da contabilidade financeira para cada cenário modelado em cada país. Ademais, a plataforma consiste em repositório público de todos os dados de entrada bem como os de saída do NewSimAmazonia, que podem ser visualizados, consultados e baixados, além de um conjunto de gráficos interativos por país e tipo de resultado (fig. 1).

Implicações e conclusões

A tabela abaixo apresenta os resultados acumulados até 2035 para cada país em termos de redução de desmatamento e emissões de CO₂ associadas sob o cenário **NDC** tem como ponto de partida o cenário de linha de base.

	Ha	CO ₂
Brasil	10.6E+6	4.6E+9
Colômbia	1.6E+6	407.8E+6
Peru	900.8E+3	345.8E+6
Venezuela	465.3E+3	55.6E+6
Bolívia	304.3E+3	141.0E+6
Guiana	162.0E+3	26.2E+6
Equador	156.0E+3	82.4E+6
Suriname	62.8E+3	22.6E+6
Guiana Francesa	000.0E+0	1.2E+6

A plataforma facilita a visualização de cenários, à medida que os formuladores de políticas fazem perguntas do tipo "e se" sobre o impacto dos planos florestais e dos programas de redução das emissões de carbono, traduzindo esses resultados na capacidade de captação de recursos financeiros do REDD+. Com isso, a plataforma economiza tempo e esforço para formuladores de políticas e planejadores em um campo em rápida transformação. Logo, é uma importante ferramenta para apoiar governos na gestão de áreas florestais.

Em suma, ao fornecer uma análise detalhada da dinâmica e das fronteiras do desmatamento predominantes em cada país, NewSimAmazonia permite de modo ex-ante avaliar impactos ambientais como fragmentação de habitats, perda de biodiversidade e alterações no ciclo hidrológico e emissões de CO₂. Essas projeções, portanto, são um valioso subsídio para formuladores de políticas, ambientalistas e planejadores de uso da terra que buscam desenvolver estratégias que equilibrem o desenvolvimento com a preservação ambiental na região amazônica. As fronteiras de desmatamento seguem corredores de integração transnacionais, logo resposta de política também precisa ser regional — apoiada pela plataforma pública, que permite testar cenários "e se" e estimar receitas de REDD+.

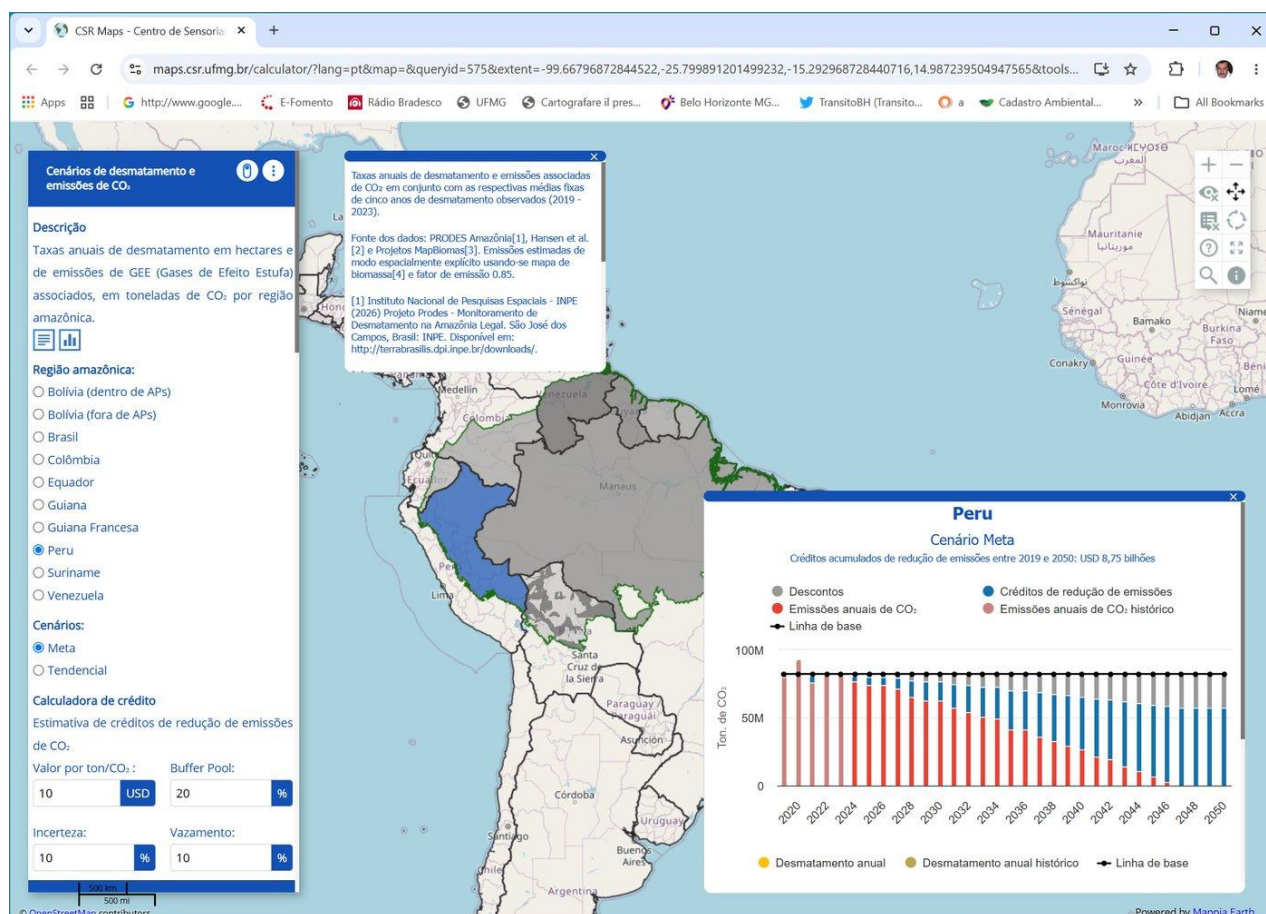


Figura 1. Interface da plataforma com o componente REDD+ com calculadora de créditos de acordo com a metodologia ART-TREES.

Metodologia

Arquitetura do modelo. Modelos acoplados em dois níveis — sub-regiões socioeconômicas e células raster de 500 m (grade de 6.167×8.007 células). Um modelo superior distribui as taxas de desmatamento às sub-regiões; em cada uma, álgebra de mapas e autômatos celulares geram a simulação espacialmente explícita. Roda na plataforma livre [Dinamica EGO](#), cujo processamento paralelo viabiliza a escala continental. Um módulo dedicado simula a [expansão da malha viária](#), principal vetor de abertura de novas frentes (9).

Dados e calibração. Mapas anuais de desmatamento de 2009–2023 — PRODES/INPE no Brasil (12) e o mapeamento global de Hansen et al. nos demais países (13) — e densidade de biomassa acima do solo (10, 14). Os modelos são calibrados em 2009–2015, validados em 2016–2023 e projetados em passos anuais até 2050.

Emissões de CO₂. Calculadas a partir da biomassa florestal suprimida, somando 20% de biomassa abaixo do solo e assumindo que 85% do carbono é liberado durante e após o desmatamento (11).

Construção de cenários. O cenário tendencial projeta 2019–2023 por regressão linear (mínimos quadrados); a linha de base fixa a média 2019–2023; o cenário NDC converte as metas climáticas de cada país (15–27) em trajetórias lineares de redução do desmatamento até 2030–2050, alinhadas à neutralidade de emissões do Acordo de Paris.

Biodiversidade. 8,6 milhões de registros de ocorrência (GBIF e GABI) foram limpos e georreferenciados com o BioDinamica (28). O viés de esforço amostral foi corrigido pelo método USSE (29), e superfícies preditivas foram geradas por redes neurais profundas (30), tendo como preditores clima (WorldClim (31)), topografia e um Índice Composto de Vegetação (altura de dossel por LiDAR + variância do NDVI/MODIS). Métricas: riqueza de espécies; endemismo ponderado (WEIc); diversidade filogenética (32); endemismo filogenético (33, 34); e regiões biogeográficas obtidas da diversidade beta (índice de Sørensen (36) modelada por GDM (37) e agrupada por k-means (38). A projeção para 2050 substitui apenas o índice de vegetação pelos mapas de desmatamento simulado.

Créditos REDD+ (ART TREES). Define-se um nível de crédito pela média histórica de cinco anos de emissões; os créditos equivalem à diferença entre esse nível e as emissões observadas, descontadas parcelas para reserva de buffer, incertezas e vazamentos, e precificadas pelo valor da tonelada de CO₂ (3).

Referências

1. B. S. Soares-Filho et al., Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* **440**, 520–523 (2006).
2. B. S. Soares-Filho et al., Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **107**, 10821–10826 (2010).
3. Architecture for REDD+ Transactions (ART), *The REDD+ Environmental Excellence Standard (TREES), v1 – Executive Summary* (ART, 2020); <https://www.artredd.org/wp-content/uploads/2020/02/TREES-v1-Exec-Summary-Feb-2020.pdf>.
4. G. Sampaio et al., Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophys. Res. Lett.* **34**, L17709 (2007).
5. A. T. Leite-Filho, B. S. Soares-Filho, J. L. Davis, G. M. Abrahão, J. Börner, Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* **12**, 2591 (2021).
6. D. Nepstad et al., The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* **326**, 1350–1351 (2009).
7. A. Leite-Filho, B. Soares-Filho, S. Carvalho, A. Krogh, "How deforestation-induced local and regional climate changes affect agricultural production in the Brazilian Amazon" (Rainforest Foundation Norway, 2024); <https://dv719tqmsuwyb.cloudfront.net/documents/RFN-Rainforest-Payback.pdf>.
8. M. Coe, M. Costa, B. S. Soares-Filho, The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River — land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* **369**, 165–174 (2009).
9. H. J. Geist, E. F. Lambin, Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience* **52**, 143–150 (2002).
10. A. Baccini et al., Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nat. Clim. Change* **2**, 182–185 (2012).
11. R. A. Houghton, D. L. Skole, C. A. Nobre et al., Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature* **403**, 301–304 (2000).
12. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), *Projeto PRODES — Monitoramento de Desmatamento na Amazônia Legal* (INPE, São José dos Campos, 2026); <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>.
13. M. C. Hansen et al., High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* **342**, 850–853 (2013).
14. N. L. Harris et al., Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nat. Clim. Change* **11**, 234–240 (2021).
15. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), Nationally Determined Contributions (NDC) Registry (UNFCCC, 2025); <https://unfccc.int/NDCREG>.
16. Estado Plurinacional de Bolivia, *Contribución Nacionalmente Determinada (NDC 3.0), 2026–2035* (Ministerio de Medio Ambiente y Agua / Autoridad Plurinacional de la Madre Tierra, La Paz, 2025); <https://unfccc.int/documents/650130>.
17. República Federativa do Brasil, *Brazil's Second Nationally Determined Contribution (NDC)* (Governo Brasileiro, Brasília, 2024).
18. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, *Plano Clima Mitigação: Plano Setorial de Mudanças do Uso da Terra em Áreas Rurais Privadas* (MMA/MCTI/MAPA/MDA/CC-PR, Brasília, 2026).
19. República de Colombia, *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC 3.0) — Transformaciones para la Vida* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, 2025).
20. República del Ecuador, *Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional 2026–2035* (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, Quito, 2025).
21. R. A. Houghton, K. T. Lawrence, J. Hackler, L. S. Brown, The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Glob. Change Biol.* **7**, 731–746 (2001).
22. Republic of Guyana, *Guyana's Revised Intended Nationally Determined Contribution* (Government of Guyana, Georgetown, 2015).
23. European Union and its Member States, *The Nationally Determined Contribution of the European Union and its Member States* (Danish Presidency of the Council of the EU / European Commission, 2025).
24. Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (Citepa), *Inventaire National d'Émissions de Gaz à Effet de Serre et de Polluants Atmosphériques en Outre-mer* (Citepa, 2024).
25. Gobierno del Perú, *Tercera Contribución Determinada a Nivel Nacional del Perú* (Ministerio del Ambiente, Lima, 2025).
26. Republic of Suriname, *Republic of Suriname's Third Nationally Determined Contribution (NDC 3.0)* (Ministry of Oil, Gas, and Environment, Paramaribo, 2025).
27. República Bolivariana de Venezuela, *Actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada* (Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo, Caracas, 2021).
28. U. Oliveira, B. Soares-Filho, R. F. M. Leitão, H. O. Rodrigues, BioDinamica: a toolkit for analyses of biodiversity and biogeography on the Dinamica-EGO modelling platform. *PeerJ* **7**, e7213 (2019).
29. U. Oliveira, B. Soares-Filho, F. Nunes, Controlling the effects of sampling bias in biodiversity models. *J. Biogeogr.* (2024); <https://doi.org/10.1111/jbi.14851>.
30. J. Schmidhuber, Deep learning in neural networks: an overview. *Neural Netw.* **61**, 85–117 (2015).
31. S. E. Fick, R. J. Hijmans, WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **37**, 4302–4315 (2017).
32. D. P. Faith, Conservation evaluation and phylogenetic diversity. *Biol. Conserv.* **61**, 1–10 (1992).
33. D. Rosauer, S. W. Laffan, M. D. Crisp, S. C. Donnellan, L. G. Cook, Phylogenetic endemism: a new approach for identifying geographical concentrations of evolutionary history. *Mol. Ecol.* **18**, 4061–4072 (2009).
34. M. D. Crisp, S. Laffan, H. P. Linder, A. Monro, Endemism in the Australian flora. *J. Biogeogr.* **28**, 183–198 (2001).
35. R. H. Whittaker, Vegetation of the Siskiyou Mountains, Oregon and California. *Ecol. Monogr.* **30**, 279–338 (1960).
36. T. Sørensen, A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content. *K. Dan. Vidensk. Selsk. Biol. Skr.* **5**, 1–34 (1948).
37. S. Ferrier, G. Manion, J. Elith, K. Richardson, Using generalized dissimilarity modelling to analyse and predict patterns of beta diversity in regional biodiversity assessment. *Divers. Distrib.* **13**, 252–264 (2007).
38. J. MacQueen, in *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability* (Univ. of California Press, Berkeley, 1967), vol. 1, pp. 281–297.