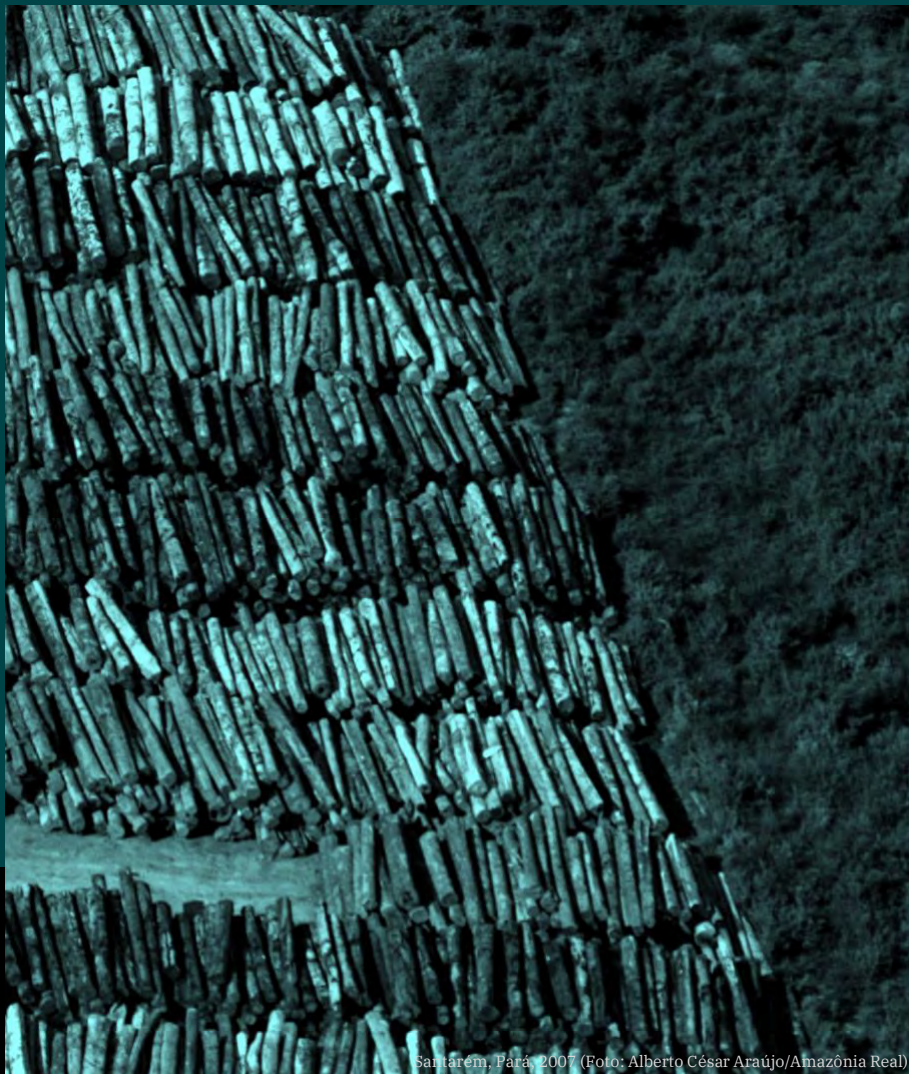


Capítulo 19 Em Síntese

Causas e impactos ecológicos do desmatamento e da degradação florestal



Santarém, Pará, 2007 (Foto: Alberto César Araújo/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Causas e impactos ecológicos do desmatamento e da degradação florestal

Erika Berenguer^{a,b}, Dolores Armenteras^c, Alexander C. Lees^d, Charlotte C. Smith^b, Philip Fearnside^e, Nathália Nascimento^f, Ane Alencar^g, Cláudio Almeida^h, Luiz Aragão^h, Jos Barlow^b, Bibiana Bilbaoⁱ, Paulo Brando^{g,j,k}, Paulette Bynoe^l, Matt Finer^m, Bernardo M. Floresⁿ, Clinton N. Jenkins^o, Celso H. L. Silva Junior^h, Carlos Souza^p, Roosevelt Garcia-Villacorta^q

Mensagens Principais e Recomendações

- 1) Até 2018, o bioma Amazônia perdeu cerca de 870.000 km² de floresta primária, o equivalente a 14% de sua cobertura original.
- 2) Estima-se que 366.300 km² das florestas amazônicas foram destruídas entre 1995 e 2017.
- 3) A pecuária é a principal causa do desmatamento.
- 4) Desmatamento e a degradação florestal causam impactos locais, regionais e globais, incluindo mudanças na temperatura e precipitação local, aumento nas emissões de CO₂ e extinção de espécies.
- 5) Os governos, o setor privado e a sociedade civil precisam tomar medidas urgentes para evitar um maior desmatamento na Amazônia, especialmente das florestas primárias. Evitar a perda de florestas primárias é de longe a mais alta prioridade visando a evitar as emissões de gás carbônico, perda da biodiversidade e alterações na hidrologia da região.
- 6) Projetos de infraestrutura de larga escala, tais como estradas e concessões de atividades mineiras, devem considerar seus impactos indiretos

- 7) Existe uma necessidade urgente de implementar um sistema de monitoramento integrado para rastrear o desmatamento e a degradação florestal através da bacia, com conjuntos de dados comparáveis, transparentes e acessíveis. Pode-se gerar conjuntos de dados por meio de parcerias entre governos e a comunidade científica. Não é mais aceitável que o desmatamento seja o único foco do monitoramento florestal.

Resumo Este capítulo discute as principais causas do desmatamento e da degradação florestal na Amazônia, especialmente a expansão agrícola, construção de estradas, exploração mineral e de petróleo e gás, queimadas, efeitos de borda, extração de madeira e caça. Também examina os impactos dessas atividades e das sinergias entre elas.

Introdução Desmatamento é definido como a retirada completa da cobertura florestal de uma área¹, enquanto que degradação florestal é a redução da

^aEnvironmental Change Institute, School of Geography and the Environment, University of Oxford, South Parks Road, OX1 3QY Oxford, UK, erika.berenguer@ouce.ox.ac.uk

^bLancaster Environment Centre, Lancaster University, LA1 4YQ, Lancaster, UK

^cEcología del Paisaje y Modelación de Ecosistemas ECOLMOD, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Cra 45 #2685, Bogotá, Colombia, darmenterasp@unal.edu.co

^dManchester Metropolitan University, John Dalton Building, Manchester M1 5GD, UK

^eDepartment of Environmental Dynamics, National Institute for Research in Amazonia (INPA), Av. André Araújo 2936, Petrópolis, Manaus AM 69067-375, Brazil

^fUniversidade Federal do Espírito Santo - UFES, Instituto de Estudos Climáticos, Vitória, Espírito Santo, Brazil.

^gAmazon Environmental Research Institute, SCLN 211, Brasília DF 70863-520, Brazil.

^hInstituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas 1758, Jd. Granja 12227-010 São José dos Campos SP, Brasil

ⁱUniversidad Simón Bolívar, Apartado 89000, Caracas 1080, Venezuela.

^jDepartment of Earth System Science, University of California, Croul Hall, Irvine CA 92697-3100, USA.

^kWoodwell Climate Research Center, 149 Woods Hole Road, Falmouth MA 02540, USA

^lUniversity of Guyana, Turkeyen Campus, Greater Georgetown, Guyana

^mAmazon Conservation Association, 1012 14th Street NW, Suite 625, Washington, DC 20005, USA

ⁿFederal University of Santa Catarina, Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, s/n. Trindade 88040-900, Florianópolis, Brazil.

^oFlorida International University, Department of Earth and Environment & Kimberly Green Latin American and Caribbean Center, Miami, FL 33199, USA.

^pInstituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), Trav. Dom Romualdo de Seixas 1698, Edifício Zion Business 11th Floor, Bairro Umarizal 66055-200, Belém, PA, Brazil.

^qCornell University, E145 Corson Hall, Ithaca NY 14853, USA.

capacidade total de uma floresta de fornecer bens e serviços², representando uma perda no valor ecológico da área afetada¹. Em toda a Amazônia, o desmatamento e a degradação florestal resultam da interação entre as várias causas diretas e indiretas que atuam nas escalas global, regional e local³⁻⁶. As causas diretas do desmatamento são as ações humanas que impactam a natureza⁷, incluindo a expansão de pastagens e cultivos, a abertura de novas estradas, a construção de hidrelétricas e a exploração de minérios e de petróleo⁸⁻¹⁰ (veja os Capítulos 14, 15 e 20). As causas indiretas são os fatores que influenciam as ações humanas¹¹, como governança ineficaz ou condições inadequadas do mercado de *commodities*¹²⁻¹⁴. As causas atuam simultaneamente, e como diversos elementos afetam as taxas de desmatamento, é muito difícil estimar seus impactos individuais. Os impactos do desmatamento e da degradação florestal podem ter consequências locais, regionais e globais¹⁵⁻¹⁷. Os impactos mais óbvios do desmatamento são a perda da complexidade estrutural e da biodiversidade, pois as áreas florestais ricas em espécies são convertidas em áreas agrícolas pobres em espécies. Entretanto, existem impactos mais críticos, como alterações nas temperaturas locais, nos regimes de precipitações na região e nas emissões globais de gases de efeito estufa (GEE)^{18,19}.

Desmatamento No bioma amazônico, uma área de 867.675 km² já foi desmatada até 2018²⁰ – uma área maior do que a Turquia (Figura 19.1). A maior parte dos desmatamentos ocorrem no Brasil, que já perdeu aproximadamente 741.759 km² de florestas²⁰, uma área 15 vezes maior do que a área perdida no Peru (50.867 km²), o país com a segunda maior área desmatada. Em termos relativos, o país que perdeu a maior área de florestas foi o Brasil (18%), seguido pelo Equador (13%). O desmatamento na Amazônia atingiu seu auge em 2003, com 63.656 km². Entre 2004 e 2013, o desmatamento caiu para seu nível mais baixo, voltando a crescer a partir de 2014.

Expansão agrícola A expansão agrícola, especialmente a pecuária, é a principal causa do desmatamento na Amazônia²¹. Na Amazônia brasileira, estima-se que 80% das áreas desmatadas são ocupadas por pastagens²². No início da década de

2000, a expansão de áreas de cultivos em larga escala, especialmente de soja, aumentou de forma significativa, tornando-se uma das principais causas do desmatamento. Esse padrão que foi revertido²³ após políticas de conservação, incluindo a moratória da soja (veja o Capítulo 15 e 17) e a criação de várias áreas protegidas no Brasil (veja o Capítulo 16), onde estava ocorrendo a maior parte do desmatamento relacionado à soja^{12,24}. Na Bolívia, o cultivo de soja ainda está se expandindo; a região de Santa Cruz, por exemplo, se destaca como a principal área de desmatamento na Amazônia, principalmente devido à conversão da floresta em campos de soja^{25,26}. Desde meados da década de 2000, o óleo de palma também tem se tornado uma ameaça às florestas amazônicas, especialmente na Colômbia, Equador, Peru e na região leste da Amazônia brasileira²⁷; enquanto as plantações de palma muitas vezes substituem outros usos de terra agrícola, especialmente a pecuária, outras vezes elas substituem a floresta primária²⁸⁻³⁰. O cultivo de culturas ilegais, em particular das folhas de coca, também é uma causa para o desmatamento na região, especialmente na Colômbia e também na Bolívia, Equador e no Peru^{31,32}.

Pastagens e terras agrícolas são completamente diferentes de florestas em termos de composição taxonômica, filogenética e funcional^{33,34}, levando a uma perda quase que completa das espécies dependentes da floresta. Entre os usos de terra agrícola, as pastagens apresentam muito mais diversidade do que a agricultura mecanizada³⁵. As plantações de árvores também hospedam um subconjunto empobrecido de espécies florestais; por exemplo, menos de 5% das espécies de pássaros capturadas em uma plantação de palmeiras no Peru foram também encontradas nas florestas³⁶. Em resumo, a contribuição das terras agrícolas para a conservação da biodiversidade amazônica é insignificante³⁷, destacando o valor insubstituível das florestas³⁴. Existem também impactos indiretos – além das emissões de GEE liberadas durante o processo de desmatamento, as pastagens contribuem ainda mais para as emissões devido às queimas periódicas e à fermentação entérica³⁷. Mudanças significativas nas propriedades físicas e

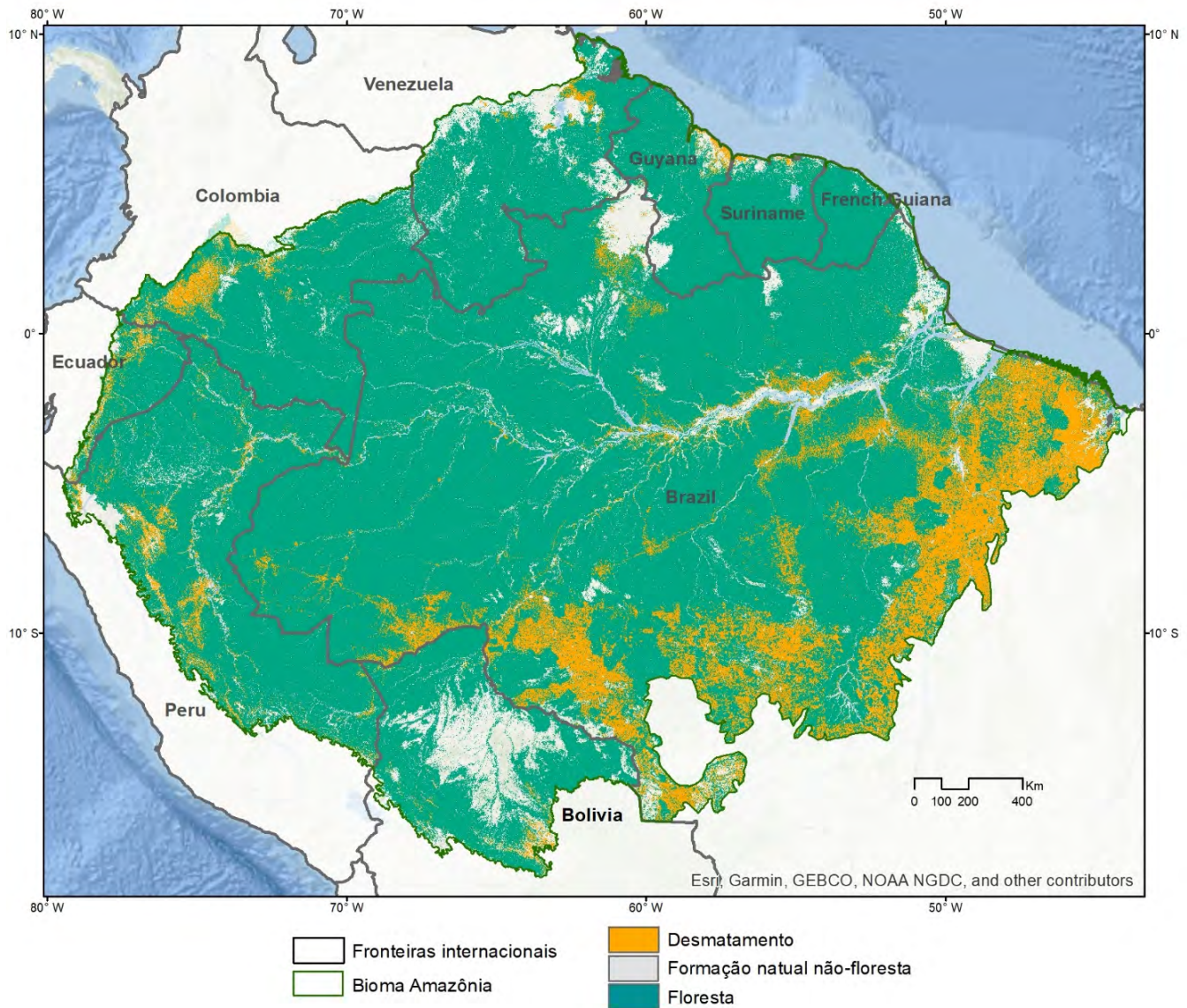


Figure 19.1 Current land occupied by either natural vegetation or pasture and agriculture across the Amazon biome. Cumulative deforestation data is shown until 2018 19 and analyzed according to Smith et al. ¹¹⁵.

químicas do solo, tais como a compactação do solo e alterações na concentração de nutrientes³⁸⁻⁴⁰, também resultam da conversão das florestas em pastagens e terras agrícolas. O uso de defensivos agrícolas nas terras agrícolas é muitas vezes excessivo^{42,43}; seus impactos sobre os sistemas terrestres, entretanto, ainda não foram adequadamente quantificados.

Estradas As estradas e rodovias oficiais (isto é, construídas pelo governo) avançam até o interior da Amazônia, com exceção da região oeste da bacia. Mesmo se não pavimentadas, as rodovias oficiais frequentemente originam uma rede de estradas não oficiais (construídas pelos atores locais), fornecendo acesso a florestas previamente inacessíveis, o que resulta no clássico padrão “desmatamento em espinha de peixe”. Até 2016, a rede de estradas não

oficiais era tão extensa que ultrapassava o número de estradas oficiais em quase 13 vezes, atingindo 551.646 km.

Os impactos diretos da construção de estradas incluem o aumento em mortes de animais nas estradas⁴⁴ e a fragmentação dos habitats, isolando as populações de animais com baixa mobilidade ou aversão a espaços abertos^{45,46}. Entretanto, o maior impacto da construção de estradas na Amazônia é indireto. A construção e pavimentação de estradas oficiais e, subsequentemente, não oficiais reduzem os custos de transporte, aumentando o valor da terra e tornando a agricultura e pecuária mais lucrativas⁴⁷. Isso leva à especulação fundiária e ao aumento do desmatamento para assegurar a posse da terra⁴⁸ (veja também os Capítulos 14 e 15). Como resultado, a presença de estradas é fortemente associada ao desmatamento na Amazônia brasileira^{49,50}, peruana⁵¹⁻⁵³, e equatoriana, embora neste último, a construção de estradas esteja ligada a concessões para exploração de petróleo^{54,55} (veja também o Capítulo 18). As estradas também incentivam a degradação florestal, inclusive a extração de madeira seletiva⁵⁶⁻⁵⁸, pois fornecem acesso a maquinário (ex.: caminhões e tratores para carregamento de madeira) para áreas que contêm madeira valiosa.

Exploração mineral A exploração mineral é uma importante fonte de impacto ambiental na Amazônia, com cerca de 45.000 concessões para exploração já em operação ou aguardando aprovação, das quais 21.536 avançam sobre áreas protegidas e territórios indígenas. Enquanto alguns minerais, como bauxita, cobre e minério de ferro⁵⁹, são extraídos legalmente por grandes corporações¹⁰, a extração de ouro é predominantemente ilegal^{60,61} (veja também os Capítulos 14 e 18). A despeito de sua ilegalidade, a extração de ouro é uma atividade semimecanizada, empregando maquinário de grande porte e alto custo, como equipamento de perfuração para prospecção de minérios e escavadeiras hidráulicas⁶²⁻⁶⁴.

O volume de perda florestal atribuível diretamente a exploração mineral é imensamente menor do que

aquela causada pela agricultura. Ainda assim, representa a principal causa de perda florestal na Guiana Francesa, Guiana, Suriname e partes do Peru^{65,66}. Além disso, como acontece com as estradas, seu impacto indireto é muito maior do que os impactos diretos. No Brasil, por exemplo, a exploração mineral foi responsável pela perda de 11.670 km² de florestas amazônicas entre 2000 e 2015, correspondente a 9% de todo o desmatamento naquele período¹⁰, com efeitos se estendendo por 70 km além das fronteiras das concessões para exploração mineral. A exploração mineral também estimula a perda florestal ao incentivar a construção de estradas e de outras infraestruturas de transporte que levam ao desmatamento^{10,67}.

Petróleo e gás A exploração de petróleo e gás ocorre principalmente na Amazônia Ocidental, onde 192 arrendamentos de petróleo e gás estão em produção e 33 sendo prospectados. Além disso, existem planos para exploração de petróleo e gás ao longo de uma vasta área do Brasil no estado do Amazonas⁶⁸. Como na exploração mineral, o desmatamento causado pela exploração de petróleo e gás é mínimo quando comparado ao desmatamento causado pela expansão agrícola. Ainda assim, essas operações podem levar a grandes derramamentos de óleo, como já ocorreu em diversas ocasiões na Colômbia, Equador e Peru⁶⁹⁻⁷¹, impactando as pessoas e a natureza^{72,73}. Os impactos indiretos dessas atividades incluem abertura de estradas, o que aumenta de forma significativa o desmatamento, conforme descrito acima.

Degradação Enquanto o desmatamento é binário (isto é, a floresta está presente ou ausente), a degradação florestal é caracterizada por um gradiente de impacto, desde florestas com pouca, embora significativa, perda de valor ecológico até florestas sofrendo severas perturbações de funções e processos⁷⁴. Estima-se que uma área de tamanho aproximado ao da Alemanha, ou 366.300 km², de florestas amazônicas foi degradada entre 1995 e 2017⁷⁵. Várias perturbações antropogênicas podem levar à degradação florestal na Amazônia, como queimadas, extração de madeira seletiva, efeitos de borda e caça⁷⁶⁻⁷⁹.

Queimadas Na maioria dos anos, e na maioria das florestas não perturbadas, a alta umidade nas sub-bacias das florestas amazônicas mantém os níveis de inflamabilidade próximos de zero⁸⁰⁻⁸². Entretanto, a cada ano, milhares de hectares de floresta queimam por toda a bacia^{83,84} quando os focos de incêndio escapam e alcançam pastagens ou áreas recentemente desmatadas. Os focos se espalham lentamente, suas chamas alcançam alturas de 30-50 cm e liberam pouca energia (≤ 250 kW/m)^{85,86}. Entretanto, seus impactos podem ser imensos, pois as florestas úmidas amazônicas não coevoluíram com o fogo. As queimadas causam altos níveis de mortalidade, afetam negativamente os estoques de carbono^{74,87,88}, e levam anos para a terra se recuperar.

Estima-se que as florestas queimadas na Amazônia possuem estoques de carbono que permanecem 25% menores até mesmo 30 anos após uma queimada, com dinâmicas de crescimento e mortalidade sugerindo que a recuperação havia se estabilizado⁸⁹. A alta mortalidade arbórea causada pelas queimadas nos sub-bosques leva a alterações funcionais e taxonômicas significativas na comunidade de plantas; as espécies com alta densidade de madeira são perdidas, enquanto que as espécies com madeira clara dominam^{90,91}. Atualmente, é desconhecido se as florestas queimadas voltarão algum dia à sua composição original. Cenários de mudanças climáticas preveem uma maior frequência de eventos climáticos extremos e clima mais quente^{92,93} (veja também os Capítulos 22-24), exacerbando a simultaneidade de queimadas através do bioma.

Efeito de borda Nas últimas décadas, o desmatamento tem promovido a fragmentação das florestas, deixando-as sujeitas a diversas consequências do efeito de borda^{94,95}. Entre 2001 e 2015, cerca de 180.000 km² de novas bordas foram criadas na Amazônia⁹⁶. O efeito de borda levam à mudanças nas taxas de evapotranspiração, aumento na intensidade da luz e na exposição ao vento e maior dessecação⁹⁷, que podem avançar centenas de metros pelas florestas adjacentes⁹⁸. Isso acarreta no aumento da mortalidade das plantas em habitats nas zonas nas bordas das florestas e, como consequência, à maiores perdas de carbono. Estimativas recentes

indicam perdas de carbono associadas aos efeitos de borda na Amazônia (947 Tg C) correspondendo a um terço das perdas totais de desmatamento (2.592 Tg C). As perdas de carbono não são compensadas pelo crescimento ou recrutamento arbóreo; as bordas das florestas sofrem uma mudança drástica em termos de composição de espécies, tornando-se dominadas por cipós e pequenas árvores menos densas que armazenam menos carbono^{99,100}. Adicionalmente, as bordas das florestas são mais suscetíveis a outros tipos de perturbações⁸⁸, como as queimadas¹⁰¹⁻¹⁰³. Isso pode levar a extinção local de espécies especialistas incapazes de se adaptar a condições novas que sofreram perturbações. Isso favorece espécies especialistas em bordas e clareiras de matas e poderia facilitar a colonização e a expansão de espécies não florestais¹⁰⁴.

Extração de madeira Os países da Amazônia representam 13% da produção mundial de madeira tropical serrada; o Brasil sozinho é responsável por mais da metade (52%), seguido pelo Equador (11%), Peru (10%) e Bolívia (10%). A Venezuela, Colômbia, Suriname e Guiana perfazem os outros 17%¹⁰⁵. Na Amazônia brasileira, a extração seletiva de madeira afeta anualmente uma área do mesmo tamanho da área desmatada¹⁰⁶⁻¹⁰⁸, concentrada primordialmente ao longo da fronteira da área desmatada e ao redor dos principais centros de extração de madeira¹⁰⁹. No Peru e na Bolívia, as práticas de extração de madeira seletiva estão concentradas nas concessões florestais¹¹⁰⁻¹¹²; entretanto, há predominância de práticas ilegais e não sustentáveis por toda a bacia⁷⁶ (veja também o Capítulo 14), e a indústria está assolada por altos níveis de ilegalidade, inclusive licenças falsas e aplicação insuficiente da lei^{110,112-114}. A prevalência da madeira ilegal desestimula as práticas de extração sustentável e não permite que os governos e a sociedade aproveitem os importantes benefícios ecológicos e econômicos oferecidos por melhores práticas de manejo florestal^{115,116}. A extração de madeira afeta as dinâmicas energéticas e hídras devido às mudanças no albedo e na rugosidade da superfície causadas pelos altos níveis de abertura das copas, principalmente no curto prazo (1-3 anos)¹¹⁷. Essas práticas também promovem au-

mento nas temperaturas dentro da floresta¹⁹, e, dependendo da intensidade da extração, há o comprometimento da recuperação da biomassa para futura colheita.

Caça A exploração comercial dos animais para extração de sua pele, couro e penas ou plumas no século 20 foi intensa; estima-se que 23,3 milhões de mamíferos e répteis de pelo menos 20 espécies foram sujeitas à caça comercial entre 1904 e 1969¹¹⁸. Atualmente, a exploração é predominantemente para alimentação. Peres et al.¹¹⁹ estima que essa atividade afeta 32% das florestas remanescentes da Amazônia brasileira (~1 M km²), com forte esgotamento das populações de grandes vertebrados nas vizinhanças de assentamentos, estradas e rios¹²⁰.

Os impactos da caça variam dependendo da espécie e de sua história de vida; táxons com duração longa de vida e com baixas taxas de natalidade são os mais vulneráveis à extinção local¹²¹. A perda de habitat, fragmentação e degradação florestal interagem com a caça, reduzindo e isolando populações, inibindo o “resgate” e a repopulação das florestas vizinhas. Esse evento é exacerbado pelo efeito de bordas, que aumentam a acessibilidade aos caçadores¹²². A caça predatória pode ter efeitos perversivos nas florestas amazônicas ao perturbar ou retirar completamente o controle “descendente” sobre os ecossistemas mediados pelos animais de grande porte, levando a uma perda ampla e potencialmente irreversível da resiliência e função dos ecossistemas¹²³.

Conclusões O desmatamento e a degradação florestal são as principais causas da perda da diversidade e das emissões de GEE, com severas consequências para os sistemas humano e natural nos níveis local, regional e global. Nos últimos 35 anos, mais de 700.000 km² de florestas já foram completamente desmatadas em toda a Amazônia, enquanto uma área adicional de ~360.000 km² foi degradada. Embora o desmatamento tenha sido causado principalmente pela expansão agrícola, grandes projetos de desenvolvimento de infraestrutura, extração de minérios (tanto legal quanto ilegal) e a exploração de petróleo e gás têm um papel importante nesse cenário. Os principais impactos incluem a extinção e/ou

empobrecimento das comunidades de plantas e animais, reduções nos sumidouros de carbono e redução da evapotranspiração. Os impactos da degradação florestal, causada pelas queimadas, efeitos das bordas, extração de madeira seletiva e caça, são muito mais críticos, embora possam levar a impactos severos de longo prazo nas florestas afetadas. É provável que os impactos do desmatamento e da degradação florestal sejam exacerbados pelas mudanças climáticas, uma pressão subjacente em todas as florestas amazônicas.

Referencias

1. Putz, F. E. & Redford, K. H. The Importance of Defining ‘Forest’: Tropical Forest Degradation, Deforestation, Long-term Phase Shifts, and Further Transitions. *Biotropica* **42**, 10–20 (2010).
2. Parrotta, J. A., Wildburger, C. & Mansourian, S. *Understanding Relationships between Biodiversity, Carbon, Forests and People: The Key to Achieving REDD + Objectives. A Global Assessment Report*. vol. 31 (2012).
3. Barona, E., Ramankutty, N., Hyman, G. & Coomes, O. T. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environ. Res. Lett.* **5**, 24002 (2010).
4. Rudel, T. K., Defries, R., Asner, G. P. & Laurance, W. F. Changing drivers of deforestation and new opportunities for conservation. *Conserv. Biol.* **23**, 1396–1405 (2009).
5. Clerici, N. *et al.* Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Sci. Rep.* **10**, 4971 (2020).
6. Armenteras, D., Espelta, J. M., Rodríguez, N. & Retana, J. Deforestation dynamics and drivers in different forest types in Latin America: Three decades of studies (1980–2010). *Glob. Environ. Chang.* **46**, 139–147 (2017).
7. Bongaarts, J. IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. *Popul. Dev. Rev.* **45**, 680–681 (2019).
8. Ometto, J. P., Aguiar, A. P. D. & Martinelli, L. A. Amazon deforestation in Brazil: effects, drivers and challenges. *Carbon Manag.* **2**, 575–585 (2011).
9. Fearnside, P. M. Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. *World Dev.* **77**, 48–65 (2016).
10. Sonter, L. J. *et al.* Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* **8**, 1–7 (2017).
11. IPBES. *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. (2019) doi:10.1111/padr.12283.
12. Nepstad, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science* **344**, 1118–23 (2014).

13. Garrett, R. D., Lambin, E. F. & Naylor, R. L. The new economic geography of land use change: Supply chain configurations and land use in the Brazilian Amazon. *Land use policy* **34**, 265–275 (2013).
14. Brandão, F. *et al.* Lessons for Jurisdictional Approaches From Municipal-Level Initiatives to Halt Deforestation in the Brazilian Amazon. *Front. For. Glob. Chang.* **3**, 96 (2020).
15. Davidson, E. A. *et al.* The Amazon basin in transition. *Nature* **481**, 321–328 (2012).
16. Spracklen, D. V. & Garcia-Carreras, L. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophys. Res. Lett.* **42**, 9546–9552 (2015).
17. Magalhães, N. de, Evangelista, H., Condom, T., Rabatel, A. & Ginot, P. Amazonian Biomass Burning Enhances Tropical Andean Glaciers Melting. *Sci. Rep.* **9**, 1–12 (2019).
18. Longo, M. *et al.* Impacts of Degradation on Water, Energy, and Carbon Cycling of the Amazon Tropical Forests. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* **125**, (2020).
19. Mollinari, M. M., Peres, C. A. & Edwards, D. P. Rapid recovery of thermal environment after selective logging in the Amazon. *Agric. For. Meteorol.* **278**, 107637 (2019).
20. MapBiomas. MapBiomas Amazonia v2.0. (2020).
21. Nepstad, D. C., Soares-Filho, B. & Merry, F. The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science (80-)*. (2009).
22. Ministério do Meio Ambiente. *Planos de Combate ao Desmatamento (PPCDAM 4ª fase e PPCERRADO 3ª fase)*. (2018).
23. Macedo, M. N. *et al.* Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **109**, 1341–1346 (2012).
24. Soares-Filho, B. *et al.* Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **107**, 10821–10826 (2010).
25. Kalamandeen, M. *et al.* Pervasive Rise of Small-scale Deforestation in Amazonia. *Sci. Rep.* **8**, 1–10 (2018).
26. Redo, D., Millington, A. C. & Hindery, D. Deforestation dynamics and policy changes in Bolivia's post-neoliberal era. *Land use policy* **28**, 227–241 (2011).
27. Furumo, P. R. & Aide, T. M. Characterizing commercial oil palm expansion in Latin America: land use change and trade. *Environ. Res. Lett.* **12**, 24008 (2017).
28. de Almeida, A. S., Vieira, I. C. G. & Ferraz, S. F. B. Long-term assessment of oil palm expansion and landscape change in the eastern Brazilian Amazon. *Land use policy* **90**, 104321 (2020).
29. Castiblanco, C., Etter, A. & Aide, T. M. Oil palm plantations in Colombia: A model of future expansion. *Environ. Sci. Policy* **27**, 172–183 (2013).
30. Gutiérrez-Vélez, V. H. & DeFries, R. Annual multi-resolution detection of land cover conversion to oil palm in the Peruvian Amazon. *Remote Sens. Environ.* **129**, 154–167 (2013).
31. Armenteras, D., Rudas, G., Rodriguez, N., Sua, S. & Romero, M. Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. *Ecol. Indic.* **6**, 353–368 (2006).
32. Dávalos, L. M., Sanchez, K. M. & Armenteras, D. Deforestation and Coca Cultivation Rooted in Twentieth-Century Development Projects. *Bioscience* **66**, 974–982 (2016).
33. Bregman, T. P. *et al.* Using avian functional traits to assess the impact of land-cover change on ecosystem processes linked to resilience in tropical forests. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **283**, 20161289 (2016).
34. Barlow, J. *et al.* Quantifying the biodiversity value of tropical primary, secondary, and plantation forests. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **104**, 18555–18560 (2007).
35. Solar, R. R. D. C. *et al.* How pervasive is biotic homogenization in human-modified tropical forest landscapes? *Ecol. Lett.* **18**, 1108–1118 (2015).
36. Srinivas, A. & Koh, L. P. Oil palm expansion drives avifaunal decline in the Pucallpa region of Peruvian Amazonia. *Glob. Ecol. Conserv.* **7**, 183–200 (2016).
37. Moura, N. G. *et al.* Avian biodiversity in multiple-use landscapes of the Brazilian Amazon. *Biol. Conserv.* **167**, 339–348 (2013).
38. Bustamante, M. M. C. *et al.* Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Clim. Change* **115**, 559–577 (2012).
39. Melo, V. F., Orrutúa, A. G., Motta, A. C. V. & Testoni, S. A. Land use and changes in soil morphology and physical-chemical properties in southern Amazon. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* **41**, 170034 (2017).
40. de Souza Braz, A. M., Fernandes, A. R. & Alleoni, L. R. F. Soil attributes after the conversion from forest to pasture in Amazon. *L. Degrad. Dev.* **24**, 33–38 (2013).
41. Fujisaki, K. *et al.* From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Glob. Chang. Biol.* **21**, 2773–2786 (2015).
42. Schiesari, L., Waichman, A., Brock, T., Adams, C. & Grillitsch, B. Pesticide use and biodiversity conservation in the Amazonian agricultural frontier. *Philos. Trans. Biol. Sci.* **368**, 1–9 (2013).
43. Bogaerts, M. *et al.* Climate change mitigation through intensified pasture management: Estimating greenhouse gas emissions on cattle farms in the Brazilian Amazon. *J. Clean. Prod.* **162**, 1539–1550 (2017).
44. Filius, J., van der Hoek, Y., Jarrín-V, P. & van Hooft, P. Wildlife roadkill patterns in a fragmented landscape of the Western Amazon. *Ecol. Evol.* **10**, 6623–6635 (2020).
45. Laurance, S. G. W., Stouffer, P. C. & Laurance, W. F. Effects of road clearings on movement patterns of understory rainforest birds in central Amazonia. *Conserv. Biol.* **18**, 1099–1109 (2004).
46. Laurance, W. F., Goosem, M. & Laurance, S. G. W. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends Ecol. & Evol.* **24**, 659–669 (2009).
47. Perz, S. *et al.* Road building, land use and climate change: prospects for environmental governance in the Amazon. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **363**, 1889–1895 (2008).
48. Fearnside, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. *Conserv. Biol.* **19**, 680–688 (2005).

49. Laurance, W. F. *et al.* Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *J. Biogeogr.* **29**, 737–748 (2002).
50. Pfaff, A. *et al.* Road investments, spatial spillovers, and deforestation in the Brazilian Amazon. *J. Reg. Sci.* **47**, 109–123 (2007).
51. Bax, V., Francesconi, W. & Quintero, M. Spatial modeling of deforestation processes in the Central Peruvian Amazon. *J. Nat. Conserv.* **29**, 79–88 (2016).
52. Chávez Michaelsen, A. *et al.* Regional deforestation trends within local realities: land-cover change in southeastern Peru 1996–2011. *Land* **2**, 131–157 (2013).
53. Naughton-Treves, L. Deforestation and carbon emissions at tropical frontiers: a case study from the Peruvian Amazon. *World Dev.* **32**, 173–190 (2004).
54. Sierra, R. Dynamics and patterns of deforestation in the western Amazon: The Napo deforestation front, 1986–1996. *Appl. Geogr.* **20**, 1–16 (2000).
55. Mena, C. F., Bilsborrow, R. E. & McClain, M. E. Socioeconomic Drivers of Deforestation in the Northern Ecuadorian Amazon. doi:10.1007/s00267-003-0230-z.
56. Amacher, G. S., Merry, F. D. & Bowman, M. S. Smallholder timber sale decisions on the Amazon frontier. *Ecol. Econ.* **68**, 1787–1796 (2009).
57. Merry, F., Soares-Filho, B., Nepstad, D., Amacher, G. & Rodrigues, H. Balancing Conservation and Economic Sustainability: The Future of the Amazon Timber Industry. *Environ. Manage.* **44**, 395–407 (2009).
58. Asner, G. P. *et al.* Condition and fate of logged forests in the Brazilian Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **103**, 12947–50 (2006).
59. Souza-Filho, P. W. M. *et al.* Land-use intensity of official mineral extraction in the Amazon region: Linking economic and spatial data. *L. Degrad. Dev.* **32**, 1706–1717 (2021).
60. Asner, G. P. & Tupayachi, R. Accelerated losses of protected forests from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environ. Res. Lett.* **12**, 094004 (2017).
61. Sousa, R. *et al.* Policies and regulations for Brazil's artisanal gold mining sector: Analysis and recommendations. *J. Clean. Prod.* **19**, 742–750 (2011).
62. Tedesco, L. da L. No trecho dos garimpos: mobilidade, gênero e modos de viver na garimpagem de ouro amazônica. (2013).
63. Massaro, L. & de Theije, M. Understanding small-scale gold mining practices: An anthropological study on technological innovation in the Vale do Rio Peixoto (Mato Grosso, Brazil). *J. Clean. Prod.* **204**, 618–635 (2018).
64. Springer, S. K., Peregovich, B. G. & Schmidt, M. Capability of social life cycle assessment for analyzing the artisanal small-scale gold mining sector—case study in the Amazonian rainforest in Brazil. *Int. J. Life Cycle Assess.* **25**, 2274–2289 (2020).
65. Dezécache, C. *et al.* Gold-rush in a forested El Dorado: Deforestation leakages and the need for regional cooperation. *Environ. Res. Lett.* **12**, 034013 (2017).
66. Caballero Espejo, J. *et al.* Deforestation and Forest Degradation Due to Gold Mining in the Peruvian Amazon: A 34-Year Perspective. *Remote Sens.* **10**, 1903 (2018).
67. Fearnside, P. M. Exploração mineral na Amazônia Brasileira: o custo ambiental. *Grup. Estud. Estratégicos Amaz. (GEEA). Manaus Inst. Nac. Pesqui. da Amaz.* (2010).
68. Fearnside, P. M. Oil and gas project threatens Brazil's last great block of Amazon forest (commentary). Mongabay, 9 March 2020. (2020).
69. Cardona, A. J. P. Massive erosion likely due to hydropower dam causes oil spill on Ecuador's Coca River. *Mongabay* (2020).
70. San Sebastián, M. & Karin Hurtig, A. Oil exploitation in the Amazon basin of Ecuador: a public health emergency. *Rev. Panam. salud pública* **15**, 205–211 (2004).
71. Vargas-Cuentas, N. I. & Roman-Gonzalez, A. *Spatio-temporal analysis of oil spills in the Peruvian Amazon.* (2019).
72. Orta-Martínez, M. *et al.* Impacts of petroleum activities for the Achuar people of the Peruvian Amazon: summary of existing evidence and research gaps. *Environ. Res. Lett.* **2**, 45006 (2007).
73. Orta-Martínez, M. *et al.* First evidences of Amazonian wildlife feeding on petroleum-contaminated soils: A new exposure route to petrogenic compounds? *Environ. Res.* **160**, 514–517 (2018).
74. Berenguer, E. *et al.* A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. *Glob. Chang. Biol.* **20**, 3713–3726 (2014).
75. Bullock, E. L., Woodcock, C. E., Souza, C. & Olofsson, P. Satellite-based estimates reveal widespread forest degradation in the Amazon. *Glob. Chang. Biol.* **26**, 2956–2969 (2020).
76. Bustamante, M. M. C. *et al.* Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. *Glob. Chang. Biol.* **22**, 92–109 (2016).
77. Barlow, J. *et al.* Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature* **535**, 144–147 (2016).
78. Phillips, O. L. *et al.* Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations' carbon emissions. *Carbon Balance Manag.* **12**, 1 (2017).
79. de Andrade, R. B. *et al.* Scenarios in tropical forest degradation: carbon stock trajectories for REDD+. *Carbon Balance Manag.* **12**, 1–7 (2017).
80. Ray, D., Nepstad, D. & Moutinho, P. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. *Ecol. Appl.* **15**, 1664–1678 (2005).
81. Ray, D., Nepstad, D. & Brando, P. Predicting moisture dynamics of fine understory fuels in a moist tropical rainforest system: results of a pilot study undertaken to identify proxy variables useful for rating fire danger. *New Phytol.* **187**, 720–732 (2010).
82. Nepstad, D. *et al.* Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: A basin-wide analysis. *Glob. Chang. Biol.* **10**, 704–717 (2004).
83. Withey, K. *et al.* Quantifying immediate carbon emissions from El Niño-mediated wildfires in humid tropical forests. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **373**, 20170312 (2018).

84. Aragão, L. E. O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nat. Commun.* **9**, 536 (2018).
85. Brando, P. M. *et al.* Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**, 6347–6352 (2014).
86. Cochrane, M. A. Fire science for rainforests. *Nature* **421**, 913–919 (2003).
87. Barlow, J., Peres, C., Lagan, B. & Haugaasen, T. Large tree mortality and the decline of forest biomass following Amazonian wildfires. *Ecol. Lett.* **6**, 6–8 (2003).
88. Brando, P. M. *et al.* Prolonged tropical forest degradation due to compounding disturbances: Implications for CO₂ and H₂O fluxes. *Glob. Chang. Biol.* **25**, 2855–2868 (2019).
89. Silva, C. V. J. *et al.* Drought-induced Amazonian wildfires instigate a decadal-scale disruption of forest carbon dynamics. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **373**, 20180043 (2018).
90. Berenguer, E. *et al.* Seeing the woods through the saplings: Using wood density to assess the recovery of human-modified Amazonian forests. *J. Ecol.* (2018) doi:10.1111/1365-2745.12991.
91. Barlow, J. *et al.* Wildfires in bamboo-dominated Amazonian forest: Impacts on above-ground biomass and biodiversity. *PLoS One* **7**, 33373 (2012).
92. De Faria, B. L. *et al.* Current and future patterns of fire-induced forest degradation in Amazonia. *Environ. Res. Lett.* **12**, 95005 (2017).
93. Fonseca, M. G. *et al.* Effects of climate and land-use change scenarios on fire probability during the 21st century in the Brazilian Amazon. *Glob. Chang. Biol.* **25**, 2931–2946 (2019).
94. Alencar, A., Nepstad, D. & Diaz, M. C. V. Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and non-ENSO years: area burned and committed carbon emissions. *Earth Interact.* **10**, 1–17 (2006).
95. Armenteras, D., Barreto, J. S., Tabor, K., Molowny-Horas, R. & Retana, J. Changing patterns of fire occurrence in proximity to forest edges, roads and rivers between NW Amazonian countries. *Biogeosciences* **14**, 2755–2765 (2017).
96. Silva Junior, C. H. L. *et al.* Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. *Sci. Adv.* **6**, eaaz8360 (2020).
97. Laurance, W. F. *et al.* An Amazonian rainforest and its fragments as a laboratory of global change. *Biol. Rev.* **93**, 223–247 (2018).
98. Briant, G., Gond, V. & Laurance, S. G. W. Habitat fragmentation and the desiccation of forest canopies: a case study from eastern Amazonia. *Biol. Conserv.* **143**, 2763–2769 (2010).
99. Laurance, W. F. *et al.* Rain forest fragmentation and the proliferation of successional trees. *Ecology* **87**, 469–82 (2006).
100. Michalski, F., Nishi, I. & Peres, C. A. Disturbance-mediated drift in tree functional groups in Amazonian forest fragments. *Biotropica* **39**, 691–701 (2007).
101. Armenteras, D., González, T. M. & Retana, J. Forest fragmentation and edge influence on fire occurrence and intensity under different management types in Amazon forests. *Biol. Conserv.* **159**, 73–79 (2013).
102. Devisscher, T., Malhi, Y., Landivar, V. D. R. & Oliveras, I. Understanding ecological transitions under recurrent wildfire: A case study in the seasonally dry tropical forests of the Chiquitania, Bolivia. *For. Ecol. Manage.* **360**, 273–286 (2016).
103. Silva Junior, C. H. L. *et al.* Deforestation-induced fragmentation increases forest fire occurrence in central Brazilian Amazonia. *Forests* **9**, 305 (2018).
104. Palmeirim, A. F., Santos-Filho, M. & Peres, C. A. Marked decline in forest-dependent small mammals following habitat loss and fragmentation in an Amazonian deforestation frontier. *PLoS One* **15**, e0230209 (2020).
105. ITTO. Tropical Timber Market Report. *Int. Trop. Timber Organ. - ITTO* **24**, 27p (2020).
106. Asner, G. P. *et al.* Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science (80-.)*. **310**, 480–482 (2005).
107. Asner, G. P., Knapp, D. E., Balaji, A. & Páez-acosta, G. Automated mapping of tropical deforestation and forest degradation: CLASlite. *J. Appl. Remote Sens.* **3**, 1–24 (2009).
108. Matricardi, E. A. T. *et al.* Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. *Science (80-.)*. **369**, 1378–1382 (2020).
109. SFB & IMAZON. *A atividade madeireira na Amazônia brasileira: Produção, receita e mercados.* (IMAZON, 2010).
110. Pacheco, P., de Jong, W. & Johnson, J. The evolution of the timber sector in lowland Bolivia: Examining the influence of three disparate policy approaches. *For. Policy Econ.* **12**, 271–276 (2010).
111. Mejía, E. *et al.* *Actores , aprovechamiento de madera y mercados en la Amazonía peruana.* (2015).
112. Finer, M., Jenkins, C. N., Sky, M. A. B. & Pine, J. Logging concessions enable illegal logging crisis in the peruvian amazon. *Sci. Rep.* **4**, 1–6 (2014).
113. Brancalion, P. H. S. *et al.* Fake legal logging in the Brazilian Amazon. *Sci. Adv.* **4**, eaat1192 (2018).
114. Smith, J., Colan, V., Sabogal, C. & Snook, L. Why policy reforms fail to improve logging practices: The role of governance and norms in Peru. *For. Policy Econ.* **8**, 458–469 (2006).
115. Santos de Lima, L. *et al.* Illegal logging as a disincentive to the establishment of a sustainable forest sector in the Amazon. *PLoS One* **13**, e0207855 (2018).
116. Gutierrez-velez, V. H. & Macdicken, K. Quantifying the direct social and governmental costs of illegal logging in the Bolivian , Brazilian , and Peruvian Amazon. *For. Policy Econ.* **10**, 248–256 (2008).
117. Huang, M. *et al.* Assessing impacts of selective logging on water, energy, and carbon budgets and ecosystem dynamics in Amazon forests using the Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator. *Biogeosciences* **17**, 4999–5023 (2020).
118. Antunes, A. P. *et al.* Empty forest or empty rivers? A century of commercial hunting in Amazonia. *Sci. Adv.* **2**,

- e1600936 (2016).
119. Peres, C. A., Emilio, T., Schiatti, J., Desmoulière, S. J. M. & Levi, T. Dispersal limitation induces long-term biomass collapse in overhunted Amazonian forests. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **113**, 892–897 (2016).
 120. Peres, C. & Lake, I. R. Extent of Nontimber Resource Extraction in Tropical Forests: Accessibility to Game Vertebrates by Hunters in the Amazon Basin. *Conserv. Biol.* **17**, 521–535 (2003).
 121. Bodmer, R. E., Eisenberg, J. F. & Redford, K. H. Hunting and the likelihood of extinction of Amazonian mammals: Caza y Probabilidad de Extinción de Mamíferos Amazónicos. *Conserv. Biol.* **11**, 460–466 (1997).
 122. Peres, C. A. Synergistic Effects of Subsistence Hunting and Habitat Fragmentation on Amazonian Forest Vertebrates. *Conserv. Biol.* **15**, 1490–1505 (2001).
 123. Ripple, W. J. *et al.* Bushmeat hunting and extinction risk to the world's mammals. *R. Soc. open Sci.* **3**, 160498 (2016).