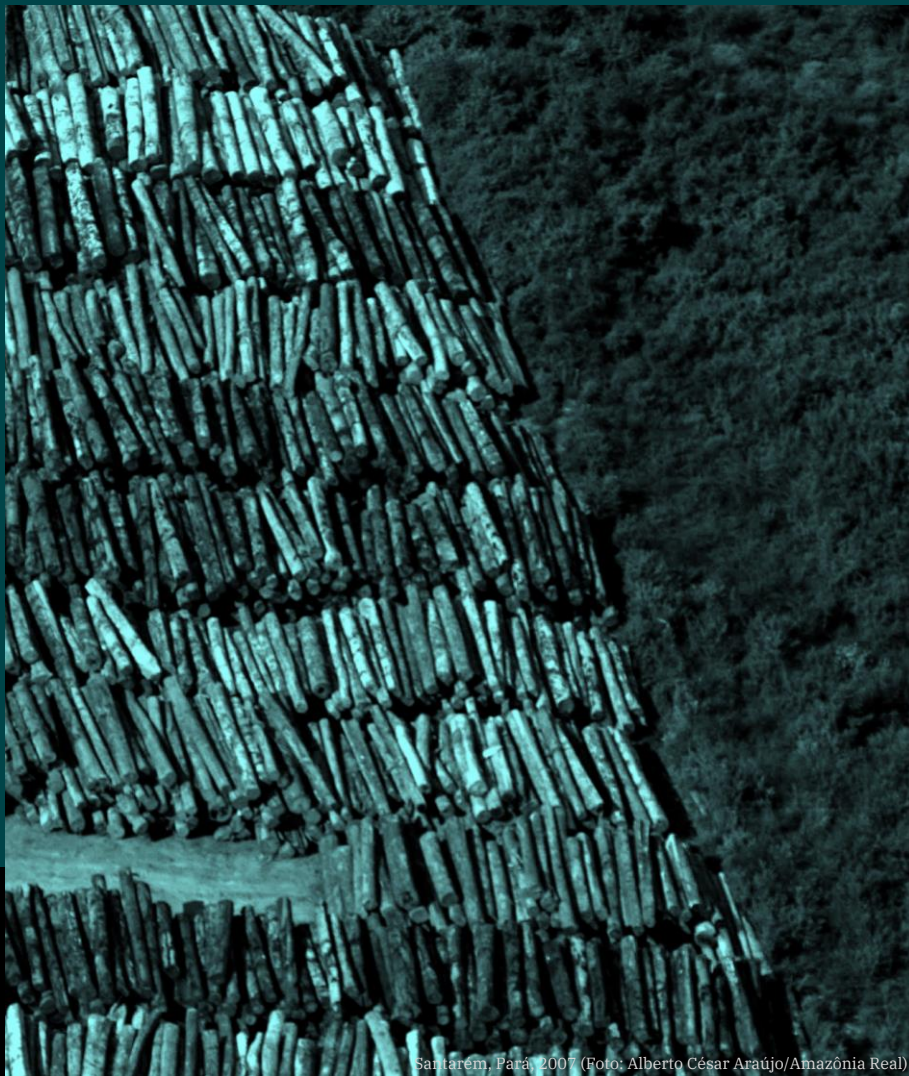


Capítulo 19 En Resumen

Impulsores e impactos ecológicos de la deforestación y la degradación forestal



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



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Impulsores e impactos ecológicos de la deforestación y la degradación forestal

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^{j,k}, Paulette Bynoe^l, Matt Finer^m, Bernardo M. Floresⁿ, Clinton N. Jenkins^o, Celso H. L. Silva Junior, Carlos Souza^p, Roosevelt García-Villacorta^q

Mensajes clave y recomendaciones

- 1) Al 2018, la Amazonía ha perdido aproximadamente 870.000 km² de bosque primario, lo que equivale al 14% de su cobertura original.
- 2) Existen al menos 1.036.080 km² de bosques Amazónicos degradados. Se estima que 366.300 km² de bosques Amazónicos se degradaron entre 1995 y 2017.
- 3) La ganadería es el principal motor de la deforestación.
- 4) La deforestación y la degradación tienen impactos locales, regionales y globales, incluyendo cambios en la temperatura y las precipitaciones locales, aumento de las emisiones de CO₂ y la extinción de especies.
- 5) Los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil deben tomar medidas urgentes para evitar una mayor deforestación en la Amazonía, especialmente de los bosques primarios. Evitar la pérdida de bosques primarios es, desde luego, la mayor prioridad para evitar las emisiones de carbono, la pérdida de biodiversidad y los cambios en la hidrología de la región.
- 6) Los proyectos de infraestructuras a gran escala, como las carreteras y las concesiones mineras, deben tener en cuenta los impactos indirectos como la deforestación, que son mucho mayores que la pérdida de bosques que provocan directamente.
- 7) Es urgente poner en marcha un sistema integrado de seguimiento de la deforestación y la degradación forestal en toda la cuenca, con conjuntos de datos comparables, transparentes y accesibles. Los conjuntos de datos pueden generarse mediante asociaciones entre los gobiernos y la comunidad científica. Ya no es aceptable que la deforestación sea el único objetivo del seguimiento forestal.

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

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

^c Ecología 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

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

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

^f Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Instituto de Estudos Climáticos, Vitória, Espírito Santo, Brazil

^g Amazon Environmental Research Institute, SCLN 211, Brasília DF 70863-520, Brazil

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

ⁱ Universidad Simón Bolívar, Apartado 89000, Caracas 1080, Venezuela

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

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

^l University of Guyana, Turkeyen Campus, Greater Georgetown, Guyana

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

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

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

^p Instituto 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

^q Cornell University, E145 Corson Hall, Ithaca NY 14853, USA

Resumen En este capítulo se analizan los principales motores de la deforestación y la degradación de los bosques en la Amazonía, en particular la expansión agropecuaria, la construcción de carreteras, la minería, la explotación de petróleo y gas, los incendios forestales, los efectos de borde, la tala y la caza. También se examinan los impactos de estas actividades y las sinergias entre ellas.

Introducción La deforestación se define como la eliminación completa de la cubierta forestal de un área¹⁸, mientras que la degradación forestal es la reducción de la capacidad general de un bosque para suministrar bienes y servicios⁷⁴, lo que representa una pérdida en el valor ecológico del área afectada¹⁸. A lo largo de la Amazonía, la deforestación y la degradación de los bosques son el resultado de la interacción entre varios factores indirectos y directos que actúan a escala global, regional y local¹⁻⁴. Los impulsores directos de la deforestación son las acciones humanas que impactan la naturaleza⁵, incluyendo la expansión de pastizales y tierras de cultivo, la apertura de nuevas carreteras, la construcción de represas hidroeléctricas y la explotación de minerales y petróleo⁶⁻⁸ (ver también los capítulos 14, 15 y 20). Los impulsores indirectos son factores que influyen en las acciones humanas⁹, como la mala gobernanza o las condiciones del mercado de productos básicos¹⁰⁻¹². Los impulsores actúan de forma simultánea; debido a que múltiples factores inciden en las tasas de deforestación, es muy difícil estimar sus impactos individuales. Los impactos de la deforestación y la degradación de los bosques pueden tener consecuencias locales, regionales y globales¹³⁻¹⁵. Los impactos más obvios de la deforestación son la pérdida de complejidad estructural y de biodiversidad, ya que las zonas forestales ricas en especies se convierten en tierras agrícolas pobres en especies. Sin embargo, hay impactos más crípticos, como los cambios en las temperaturas locales, los

regímenes de precipitación regionales y las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI)^{16,17}.

Deforestación En el bioma Amazónico, se han deforestado 867.675 km² hasta el 2018¹⁹, una superficie mayor que la de Turquía (Figura 19.1). La mayor parte de la deforestación se ha producido en Brasil, que perdió aproximadamente 741.759 km² de bosque¹⁹, una superficie 15 veces mayor que la perdida por Perú (50.867 km²), el país con la segunda mayor superficie deforestada. En términos relativos, el país que más bosque perdió fue Brasil (18%), seguido de Ecuador (13%). La deforestación en la Amazonía alcanzó su punto máximo en 2003, con 63.656 km². Entre 2004 y 2013, la deforestación descendió a su nivel más bajo, y volvió a aumentar a partir de 2014.

Expansión agrícola La expansión agrícola, especialmente la ganadería, es el principal motor de la deforestación Amazónica²⁰. En la Amazonía brasileña se estima que el 80% de las zonas deforestadas están ocupadas por pastizales²¹. A principios de la década de 2000, la expansión de las tierras de cultivo a gran escala, en particular la soja, aumentó significativamente como motor de la deforestación, un patrón que se revirtió²² tras las políticas de conservación, incluida la moratoria de la soja (véase el capítulo 15) y la creación de varias áreas protegidas en Brasil (véase el capítulo 16), donde se estaba produciendo la mayor parte de la deforestación relacionada con la soja^{10,23}. En Bolivia, la soja sigue expandiéndose; la región de Santa Cruz ha sido identificada como el mayor foco de deforestación de la Amazonía, debido principalmente a la conversión de bosques en campos de soja^{24,25}. A partir de mediados de la década de 2000, el aceite de palma se convirtió en una amenaza para los bosques Amazónicos, especialmente en Colombia, Ecuador, Perú y en la parte oriental de la Amazonía brasileña²⁶; aunque las plantaciones de aceite de palma a menudo

Siendo la composición taxonómica, filogenética y funcional de la biota de un bosque primario diferente a la del área de un cultivo^{32,33}, la conversión con lleva a una casi completa pérdida de las especies que dependen del bosque. Entre los usos agrícolas de la tierra, los pastizales presentan una diversidad significativamente mayor que la agricultura mecanizada³⁴. Las plantaciones de árboles también albergan un subconjunto empobrecido de especies forestales; por ejemplo, se registran menos del 5% de las especies de aves capturadas en una plantación de palma aceitera en Perú cuando se comprara con bosque primario³⁵. En resumen, la contribución de las tierras agrícolas a la conservación de la biodiversidad Amazónica es insignificante³⁶, lo que pone de manifiesto el valor insustituible de los bosques³³. También hay impactos indirectos derivados de la conversión de los bosques: además de las emisiones de GEI liberadas durante el proceso de deforestación, los pastizales contribuyen con emisiones debido a la quema regular y a la fermentación entérica³⁷. La conversión de los bosques en pastizales y tierras de cultivo también provoca cambios significativos en las propiedades físicas y químicas del suelo, como la compactación del mismo y los cambios en la concentración de nutrientes³⁸⁻⁴⁰. El uso de plaguicidas en las tierras agrícolas es a menudo excesivo^{41,42}; sin embargo, sus impactos en los sistemas terrestres no se han cuantificado adecuadamente.

Carreteras Las carreteras y autopistas oficiales (es decir, las construidas por el gobierno) se adentran en la Amazonía; sólo la parte occidental de la cuenca está libre de carreteras. Aunque no estén asfaltadas, las carreteras oficiales suelen generar una red de carreteras no oficiales (las construidas por grupos locales), que proporcionan acceso a bosques anteriormente inaccesibles y dan lugar al clásico patrón de "deforestación en espina de pez". En 2016, la red de carreteras no oficiales era tan extensa que superaba

a las oficiales en casi 13 veces, alcanzando los 551.646 km.

Los impactos directos de la construcción de carreteras incluyen el aumento de los atropellos⁴³ y la fragmentación de los hábitats, aislando a las poblaciones de animales que tienen poca movilidad o aversión a los espacios abiertos^{44,45}. Sin embargo, el mayor impacto de la construcción de carreteras en la Amazonía es indirecto. La construcción y pavimentación de carreteras oficiales y, posteriormente, no oficiales, reduce los costos de transporte, aumentando el valor de la tierra y haciendo que la agricultura y la ganadería sean más rentables⁴⁶. Esto conduce a la especulación con la tierra y a un aumento de la deforestación para asegurar la tenencia⁴⁷ (véanse también los capítulos 14 y 15). En consecuencia, la presencia de carreteras está fuertemente asociada a la deforestación en la Amazonía brasileña^{48,49}, peruana⁵⁰⁻⁵² y ecuatoriana, aunque en esta última la construcción de carreteras está vinculada a las concesiones petrolíferas^{53,54} (véase también el capítulo 18). Las carreteras también estimulan la degradación de los bosques, incluida la tala selectiva⁵⁵⁻⁵⁷, ya que permiten el acceso de maquinaria (por ejemplo, camiones madereros, *skidders*) a zonas que contienen madera valiosa.

Minería La minería es una de las principales fuentes de impacto ambiental en la Amazonía, con aproximadamente 45.000 concesiones mineras en funcionamiento o en espera de aprobación, de las cuales 21.536 se solapan con áreas protegidas y territorios Indígenas. Mientras que algunos minerales, como la bauxita, el cobre y el mineral de hierro⁵⁸, son extraídos legalmente por grandes empresas⁵⁹, la minería del oro es en gran medida ilegal^{60,61} (véanse también los capítulos 14 y 18). A pesar de su ilegalidad, la minería del oro es una actividad semimecanizada, que emplea maquinaria grande y costosa, como taladros de exploración y excavadoras hidráulicas⁶²⁻⁶⁴.

La cantidad de pérdida de bosques directamente atribuible a la minería es inmensamente menor que la causada por la agricultura. Aun así, representa el principal factor de pérdida de bosques en la Guayana Francesa, Guyana, Surinam y partes de Perú^{65,66}. Más aún, como en el caso de las carreteras, los impactos indirectos de la minería son mucho mayores que los directos. En Brasil, por ejemplo, la minería fue responsable de la pérdida de 11.670 km² de bosques Amazónicos entre los años 2000 y 2015, lo que corresponde al 9% de toda la deforestación en ese período⁵⁹, con efectos que se extienden 70 km más allá de los límites de las concesiones mineras. La minería también estimula la pérdida de bosques al motivar la construcción de carreteras y otras infraestructuras de transporte que conducen a la deforestación^{8,67}.

Petróleo y gas La explotación de petróleo y gas se lleva a cabo principalmente en el occidente de la Amazonía, donde hay 192 concesiones de petróleo y gas en producción y 33 en prospección. Además, hay planes para explotar petróleo y gas en una amplia zona de Brasil en el estado de Amazonas⁶⁸. Al igual que en el caso de la minería, la deforestación causada por la explotación de petróleo y gas es mínima en comparación con la causada por la expansión de la agricultura. Aun así, estas operaciones pueden provocar graves vertidos de petróleo, como ha ocurrido en numerosas ocasiones en Colombia, Ecuador y Perú⁶⁹⁻⁷¹, afectando a las personas y a la fauna^{72,73}. Los impactos indirectos de las actividades petroleras y gasísticas incluyen la apertura de carreteras, lo que aumenta significativamente la deforestación, como se ha descrito anteriormente.

Degradación Mientras que la deforestación es binaria (es decir, el bosque está presente o ausente), la degradación de los bosques se caracteriza por un gradiente de impacto, que va desde los bosques con poca, aunque significativa, pérdida de valor ecológico hasta los que sufren una grave alteración de sus

funciones y procesos⁷⁵. Se estima que un área aproximadamente del tamaño de Alemania, o 366.300 km², de bosques Amazónicos se degradó entre 1995 y 2017⁷⁶. Varias perturbaciones antropogénicas pueden conducir a la degradación de los bosques en la Amazonía, como los incendios forestales, la tala selectiva, los efectos de borde y la caza⁷⁷⁻⁸⁰.

Incendios forestales Casi todos los años, y en gran parte de los bosques no perturbados, la elevada humedad del sotobosque de los bosques Amazónicos mantiene los niveles de inflamabilidad cercanos a cero⁸¹⁻⁸³. Sin embargo, cada año arden miles de hectáreas de bosques en toda la cuenca^{84,85} al escapar los incendios de los pastizales cercanos o de las zonas recientemente deforestadas. Los incendios forestales se propagan lentamente, tienen alturas de llama de 30-50 cm y liberan poca energía (≤ 250 kW/m)^{86,87}. A pesar de ello, sus impactos pueden ser enormes, ya que los bosques húmedos Amazónicos no han coevolucionado con el fuego. Causan altos niveles de mortalidad de tallos, afectan negativamente a las reservas de carbono^{75,88,89}, y tardan años en recuperarse.

Se estima que los bosques quemados en la Amazonía tienen reservas de carbono que siguen siendo un 25% más bajas incluso 30 años después de un incendio, con una dinámica de crecimiento y mortalidad que sugiere que la recuperación se ha estancado⁹⁰. La elevada mortalidad de los árboles causada por los incendios del sotobosque provoca importantes cambios taxonómicos y funcionales en la comunidad vegetal; se pierden las especies con alta densidad de madera, mientras que dominan las especies pioneras de madera ligera^{91,92}. En la actualidad se desconoce si los bosques quemados acabarán volviendo a su composición original. Los escenarios de cambio climático prevén un aumento de la frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos y de las condiciones climáticas más cálidas^{93,94}.

(véanse también los capítulos 22-24), lo que exacerbará la concurrencia de incendios en todo el bioma.

Efectos de borde La deforestación ha promovido, en las últimas décadas, la fragmentación de los bosques, creando bordes forestales artificiales, que se ven afectados por una serie de efectos de borde^{95,96}. Entre 2001 y 2015, se crearon alrededor de 180.000 km² de nuevos bordes de bosque en la Amazonía⁹⁷. Los efectos de borde provocan cambios en las tasas de evapotranspiración, aumentan la intensidad de la luz y la exposición al viento, y aumentan la desecación⁹⁸, que puede extenderse cientos de metros hacia los bosques adyacentes⁹⁹. Esto conduce a un aumento de la mortalidad de las plantas en los hábitats de borde y, como consecuencia, a un aumento de las pérdidas de carbono. Estimaciones recientes de las pérdidas de carbono asociadas a los efectos de borde en el Amazonas (947 Tg C) corresponden a un tercio de las pérdidas por deforestación (2.592 Tg C). Las pérdidas de carbono no se compensan con el crecimiento o el reclutamiento de árboles; los bordes de los bosques sufren un cambio drástico en la composición de las especies, pasando a estar dominados por lianas y árboles pequeños y menos densos que almacenan menos carbono^{100,101}. Más aún, los bordes de los bosques son más susceptibles a otros tipos de perturbaciones⁸⁹, como por ejemplo los incendios¹⁰²⁻¹⁰⁴. Esto puede llevar a la extinción local de especies especialistas incapaces de adaptarse a las nuevas condiciones perturbadas. Favorece a especies especialistas en bordes y en brechas y podría facilitar la colonización y la expansión del área de distribución de especies no forestales¹⁰⁵.

Tala Los países Amazónicos representan el 13% de la producción mundial de madera aserrada tropical; sólo Brasil es responsable de más de la mitad (52%), seguido de Ecuador (11%), Perú (10%) y Bolivia (10%). Venezuela, Colombia, Surinam y Guyana representan el 17% restante¹⁰⁶. En la Amazonía brasi-

leña, la tala selectiva afecta anualmente a una superficie del mismo tamaño que la deforestada¹⁰⁷⁻¹⁰⁹, concentrada sobre todo en la frontera de la deforestación y en los alrededores de los principales centros de tala¹¹⁰. En Perú y Bolivia, las prácticas de tala selectiva se concentran en las concesiones forestales¹¹¹⁻¹¹³; sin embargo, las prácticas de tala ilegal e insostenible prevalecen en toda la cuenca⁷⁷ (véase también el capítulo 14), y la industria se ve afectada por altos niveles de ilegalidad, incluyendo permisos falsos y una débil aplicación de la ley^{111,113-115}. La prevalencia de la madera ilegal desalienta las prácticas de tala sostenible e impide que los gobiernos y la sociedad aprovechen los importantes beneficios ecológicos y económicos que ofrecen las mejores prácticas de gestión forestal^{116,117}. La tala afecta la dinámica de la energía y el agua debido a los cambios en el albedo y la rugosidad de la superficie causados por los altos niveles de apertura del dosel, principalmente a corto plazo (1-3 años)¹¹⁸. Estas prácticas también promueven el aumento de las temperaturas en el interior del bosque¹⁷ y, dependiendo de la intensidad de la extracción, la recuperación de la biomasa para futuras cosechas se ve comprometida.

Caza La explotación comercial de animales para obtener pieles, cueros y plumas en el siglo XX fue intensa; se calcula que entre 1904 y 1969 se cazaron comercialmente 23,3 millones de mamíferos y reptiles silvestres de al menos 20 especies¹¹⁹. En la actualidad, la explotación es predominantemente alimentaria, y Peres et al.¹²⁰ estiman que la caza afecta al 32% de los bosques que quedan en la Amazonía brasileña (~1M km²), con una fuerte disminución de las poblaciones de grandes vertebrados en las proximidades de asentamientos, carreteras y ríos¹²¹.

Los impactos de la caza varían según las especies en función de su ciclo vital; los taxones de larga vida y baja natalidad son los más vulnerables a la extinción local¹²². La pérdida de hábitat, la fragmentación y la

degradación de los bosques interactúan con la caza para reducir y aislar a las poblaciones, inhibiendo el "rescate" y la repoblación desde los bosques vecinos. Esto se ve exacerbado por los efectos de borde, que aumentan la accesibilidad de los cazadores¹²³. La caza excesiva puede tener un impacto generalizado en los bosques Amazónicos al alterar o eliminar por completo el control "descendente" sobre los ecosistemas mediado por los animales de gran tamaño, lo que lleva a una pérdida generalizada y potencialmente irreversible de la capacidad de recuperación y la función del ecosistema.¹²⁴

Conclusiones La deforestación y la degradación son las principales causas de la pérdida de biodiversidad y de las emisiones de gases de efecto invernadero, con graves consecuencias para los sistemas humanos y naturales a nivel local, regional y mundial. En los últimos 35 años, se han eliminado por completo más de 700.000 km² de bosques en la Amazonía, mientras que otros 360.000 km² se han degradado. Aunque la deforestación se ha debido principalmente a la expansión agrícola, los grandes proyectos de desarrollo de infraestructuras, la minería (tanto legal como ilegal) y la explotación de petróleo y gas también han desempeñado un papel importante. Entre los principales impactos se encuentran la extinción y/o el empobrecimiento de las comunidades vegetales y animales, la reducción de las reservas de carbono y la disminución de la evapotranspiración. Los impactos de la degradación de los bosques, provocada por los incendios forestales, los efectos de borde, la tala selectiva y la caza son mucho más crípticos, aunque pueden provocar impactos graves y a largo plazo en los bosques afectados. Los impactos tanto de la deforestación como de la degradación forestal se verán probablemente exacerbados por el cambio climático, una presión subyacente en todos los bosques Amazónicos.

Referencias

1. 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).
2. 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).
3. Clerici, N. *et al.* Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Sci. Rep.* 10, 4971 (2020).
4. 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).
5. 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).
6. Ometto, J. P., Aguiar, A. P. D. & Martinelli, L. A. Amazon deforestation in Brazil: effects, drivers and challenges. *Carbon Manag.* 2, 575–585 (2011).
7. Fearnside, P. M. Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. *World Dev.* 77, 48–65 (2016).
8. Sonter, L. J. *et al.* Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* 8, 1–7 (2017).
9. 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.
10. Nepstad, D. *et al.* Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains. *Science* 344, 1118–23 (2014).
11. 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).
12. 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).
13. Davidson, E. A. *et al.* The Amazon basin in transition. *Nature* 481, 321–328 (2012).
14. Spracklen, D. V. & Garcia-Carreras, L. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophys. Res. Lett.* 42, 9546–9552 (2015).
15. 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).
16. Longo, M. *et al.* Impacts of Degradation on Water, Energy, and Carbon Cycling of the Amazon Tropical Forests. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 125, (2020).
17. 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).

18. 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).
19. MapBiomass. MapBiomass Amazonia v2.0. (2020).
20. Nepstad, D. C., Soares-Filho, B. & Merry, F. The end of deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* (2009).
21. Ministério do Meio Ambiente. *Planos de Combate ao Desmatamento (PPCDAM 4ª fase e PPCERRADO 3ª fase)*. (2018).
22. 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).
23. Soares-Filho, B. *et al.* Role of Brazilian Amazon protected areas in climate change mitigation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 107, 10821–10826 (2010).
24. Kalamandeen, M. *et al.* Pervasive Rise of Small-scale Deforestation in Amazonia. *Sci. Rep.* 8, 1–10 (2018).
25. 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).
26. 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).
27. 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).
28. Castiblanco, C., Etter, A. & Aide, T. M. Oil palm plantations in Colombia: A model of future expansion. *Environ. Sci. Policy* 27, 172–183 (2013).
29. 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).
30. 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).
31. Dávalos, L. M., Sanchez, K. M. & Armenteras, D. Deforestation and Coca Cultivation Rooted in Twentieth-Century Development Projects. *Bioscience* 66, 974–982 (2016).
32. 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).
33. Barlow, J. *et al.* Quantifying the biodiversity value of tropical primary, secondary, and plantation forests. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 18555–18560 (2007).
34. Solar, R. R. D. C. *et al.* How pervasive is biotic homogenization in human-modified tropical forest landscapes? *Ecol. Lett.* 18, 1108–1118 (2015).
35. 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).
36. Moura, N. G. *et al.* Avian biodiversity in multiple-use landscapes of the Brazilian Amazon. *Biol. Conserv.* 167, 339–348 (2013).
37. Bustamante, M. M. C. *et al.* Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. *Clim. Change* 115, 559–577 (2012).
38. 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).
39. 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).
40. 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).
41. 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).
42. 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).
43. 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).
44. 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).
45. 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).
46. 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).
47. Fearnside, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. *Conserv. Biol.* 19, 680–688 (2005).
48. Laurance, W. F. *et al.* Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *J. Biogeogr.* 29, 737–748 (2002).
49. Pfaff, A. *et al.* Road investments, spatial spillovers, and deforestation in the Brazilian Amazon. *J. Reg. Sci.* 47, 109–123 (2007).
50. Bax, V., Francesconi, W. & Quintero, M. Spatial modeling of deforestation processes in the Central Peruvian Amazon. *J. Nat. Conserv.* 29, 79–88 (2016).
51. Chávez Michaelson, A. *et al.* Regional deforestation trends within local realities: land-cover change in southeastern Peru 1996–2011. *Land* 2, 131–157 (2013).
52. Naughton-Treves, L. Deforestation and carbon emissions at tropical frontiers: a case study from the Peruvian Amazon.

- World Dev.* 32, 173–190 (2004).
53. Sierra, R. Dynamics and patterns of deforestation in the western Amazon: The Napo deforestation front, 1986–1996. *Appl. Geogr.* 20, 1–16 (2000).
 54. 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.
 55. Amacher, G. S., Merry, F. D. & Bowman, M. S. Smallholder timber sale decisions on the Amazon frontier. *Ecol. Econ.* 68, 1787–1796 (2009).
 56. 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).
 57. 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).
 58. 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).
 59. Sonter, L. J. *et al.* Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nat. Commun.* 8, 1–7 (2017).
 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. Espejo, J. C. *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. in *Grupo de Estudos Estratégicos Amazônicos (GEEA). Manaus: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia* (eds. Castro, E. & Carmo, E. D. do) 36–43 (Editora do Núcleo de Altos Estudos Amazônicos (NAEA), 2019).
 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. 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).
 75. Berenguer, E. *et al.* A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. *Glob. Chang. Biol.* 20, 3713–3726 (2014).
 76. 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).
 77. 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).
 78. Barlow, J. *et al.* Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature* 535, 144–147 (2016).
 79. Phillips, O. L. *et al.* Carbon uptake by mature Amazon forests has mitigated Amazon nations’ carbon emissions. *Carbon Balance Manag.* 12, 1 (2017).
 80. de Andrade, R. B. *et al.* Scenarios in tropical forest degradation: carbon stock trajectories for REDD+. *Carbon Balance Manag.* 12, 1–7 (2017).
 81. Ray, D., Nepstad, D. & Moutinho, P. Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in a forested Amazon landscape. *Ecol. Appl.* 15, 1664–1678 (2005).
 82. 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).
 83. 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).
 84. 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).
85. 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).
 86. Brando, P. M. *et al.* Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 6347–6352 (2014).
 87. Cochrane, M. A. Fire science for rainforests. *Nature* 421, 913–919 (2003).
 88. 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).
 89. 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).
 90. 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).
 91. 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.
 92. Barlow, J. *et al.* Wildfires in bamboo-dominated Amazonian forest: Impacts on above-ground biomass and biodiversity. *PLoS One* 7, 33373 (2012).
 93. De Faria, B. L. *et al.* Current and future patterns of fire-induced forest degradation in Amazonia. *Environ. Res. Lett.* 12, 95005 (2017).
 94. 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).
 95. 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).
 96. 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).
 97. 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).
 98. Laurance, W. F. *et al.* An Amazonian rainforest and its fragments as a laboratory of global change. *Biol. Rev.* 93, 223–247 (2018).
 99. 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).
 100. Laurance, W. F. *et al.* Rain forest fragmentation and the proliferation of successional trees. *Ecology* 87, 469–82 (2006).
 101. Michalski, F., Nishi, I. & Peres, C. A. Disturbance-mediated drift in tree functional groups in Amazonian forest fragments. *Biotropica* 39, 691–701 (2007).
 102. 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).
 103. 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).
 104. Silva Junior, C. H. L. *et al.* Deforestation-induced fragmentation increases forest fire occurrence in central Brazilian Amazonia. *Forests* 9, 305 (2018).
 105. 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).
 106. ITTO. Tropical Timber Market Report. *Int. Trop. Timber Organ. - ITTO* 24, 27p (2020).
 107. Asner, G. P. *et al.* Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science* 310, 480–482 (2005).
 108. 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).
 109. Matricardi, E. A. T. *et al.* Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* 369, 1378–1382 (2020).
 110. SFB & IMAZON. A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receita e mercados. (2010).
 111. 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).
 112. Mejía, E. *et al.* Actores, aprovechamiento de madera y mercados en la Amazonia peruana. (2015).
 113. 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).
 114. Brancalion, P. H. S. *et al.* Fake legal logging in the Brazilian Amazon. *Sci. Adv.* 4, eaat1192 (2018).
 115. 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).
 116. 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).
 117. 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).
 118. 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).

119. Antunes, A. P. *et al.* Empty forest or empty rivers? A century of commercial hunting in Amazonía. *Sci. Adv.* 2, e1600936 (2016).
120. 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).
121. 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).
122. 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).
123. Peres, C. A. Synergistic Effects of Subsistence Hunting and Habitat Fragmentation on Amazonian Forest Vertebrates. *Conserv. Biol.* 15, 1490–1505 (2001).
124. Ripple, W. J. *et al.* Bushmeat hunting and extinction risk to the world's mammals. *R. Soc. open Sci.* 3, 160498 (2016).
125. Venticinque, E. *et al.* An explicit GIS-based river basin framework for aquatic ecosystem conservation in the Amazon. *Earth Syst Sci Data* 651–661 https://kn.ecoinformatics.org/view/doi%3A10.5063%2FF1BG2KX8#snapp_computing.6.1 (2016).
126. INPE-PRODES. Monitoring Deforestation of the Brazilian Amazon Forest by Satel-lite. <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/Amazonia/prodes> (2021).