

Capítulo 21 En Resumen

Bienestar humano e impactos sanitarios de la degradación de los ecosistemas terrestres y acuáticos



Queimadas em Rio Branco, no Acre, 2020 (Foto: Sérgio Vale/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Bienestar humano e impactos sanitarios de la degradación de los ecosistemas terrestres y acuáticos

Dolors Armenteras^a, Erika Berenguer^b, Cecilia S. Andreazzi^c, Liliana M. Dávalos^d, Fabrice Duponchelle^e, Sandra Hacon^f, Andres G. Lescano^f, Marcia N. Macedo^g, Nathália Nascimento^h

Mensajes claves y recomendaciones

- 1) Existen pruebas sustanciales que demuestran que la degradación del medio ambiente puede tener impactos agudos y crónicos en la salud humana.
- 2) La degradación de los ecosistemas terrestres y acuáticos genera complejas reacciones en cadena, con diversos impactos en la salud y el bienestar humano.
- 3) Los brotes y la creciente incidencia de diferentes enfermedades infecciosas emergentes, reemergentes y endémicas en la Amazonía pueden estar asociados a los cambios ambientales, incluyendo la deforestación.
- 4) La contaminación, incluida la polución del aire producida por la deforestación y los incendios forestales, y la contaminación por mercurio en los sistemas acuáticos a causa de la minería afectan la salud humana en el corto y largo plazo.
- 5) Es necesario mejorar los servicios de salud pública en toda la región, incluyendo un mayor acceso, saneamiento ambiental y una estrecha vigilancia de las enfermedades infecciosas en las poblaciones humanas para reducir el riesgo de aparición de virus en las poblaciones silvestres
- 6) La prevención de enfermedades infecciosas requiere un sólido sistema de vigilancia centrado en la circulación de patógenos en el medio ambiente (agua, suelo y sedimentos), así como también en las poblaciones con vectores de enfermedades y en reservorios animales.
- 7) Es necesario seguir investigando las complejas interacciones entre los factores que impulsan la deforestación y la degradación de los ecosistemas y la sucesiva carga de enfermedades en la región Amazónica. Es especialmente importante incorporar el papel que juegan la deforestación y el cambio climático en la modelización de enfermedades transmitidas por vectores.
- 8) La reducción de la deforestación y, como consecuencia, de los incendios forestales, es imprescindible para disminuir los síndromes respiratorios en la región.
- 9) Es fundamental frenar las operaciones mineras ilegales para detener la contaminación por mercurio del agua y la pesca.
- 10) Se necesitan métodos y enfoques innovadores para abordar los impactos acumulativos más complejos de la degradación de ecosistemas acuáticos y forestales sobre la salud humana.

^a Ecología del Paisaje y Modelación de Ecosistemas ECOLMOD, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, Colombia, darmenterasp@unal.edu.co

^b Environmental Change Institute, School of Geography and the Environment, University of Oxford, OX1 3QY, Oxford, UK; Lancaster Environment Centre, Lancaster University, LA1 4YQ, Lancaster, Reino Unido

^c Instituto Oswaldo Cruz (IOC), FIOCRUZ, Av. Brasil, 4365, Manguinhos, Rio de Janeiro RJ, 21040-900, Brasil

^d State University of New York at Stony Brook, 100 Nicolls Rd, Stony Brook NY 11794, EE.UU.

^e Institut de Recherche pour le Développement (IRD), MARBEC (Univ Montpellier, CNRS, IFREMER, IRD), Montpellier, Francia

^f Universidad Peruana Cayetano Heredia, Centro Latinoamericano de Excelencia en Cambio Climático y Salud, San Martín de Porres, Perú

^g Woodwell Climate Research Center, Falmouth, USA / Centro de Investigación Ambiental del Amazonas (IPAM), Brasilia, Brasil

^h Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Instituto de Estudos Climáticos, Vitória, Espírito Santo, Brazilamaz

11) Se requieren políticas legítimas de gestión participativa, desarrolladas en un marco intercultural (por ejemplo, Indígena, académico e institucional) para mejorar las estrategias tanto de seguridad alimentaria como de salud humana. El fomento de prácticas socialmente justas y culturalmente sensibles puede lograrse a través de una investigación orientada a la acción, en la que el mundo académico y los actores comunitarios desarrollen conjuntamente soluciones prácticas.

Resumen Los bosques Amazónicos y los ecosistemas acuáticos son la base de varios servicios ecosistémicos, los cuales desempeñan un papel crucial en los medios de vida, bienestar y salud de los seres humanos. Algunos de los problemas de salud más relevantes y desafiantes de la Amazonía están relacionados con la deforestación y la degradación de los ecosistemas terrestres y acuáticos, incluyendo el riesgo de contraer enfermedades infecciosas y problemas respiratorios a causa de la exposición al humo proveniente de la deforestación e incendios forestales y por la contaminación por mercurio provocada por la minería del oro. Aquí demostramos que esta degradación ambiental afecta a la salud de millones de habitantes de la región.

Introducción Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la salud es "un estado de completo bienestar físico, mental y social", que va más allá de la ausencia de enfermedades o dolencias¹. Disfrutar de un medio ambiente limpio y sostenible es esencial para la salud y el bienestar de los seres humanos², y preservar regiones cruciales como la cuenca del Amazonas es fundamental para lograr ese objetivo. Sin embargo, la cuantificación de los riesgos e impactos de la degradación ambiental en la salud humana plantea varios retos metodológicos, sobre todo cuando se consideran complejidades como la salud mental o el bienestar social. Por ejemplo, la pérdida de la cultura, lengua y tradiciones tiene indudablemente un profundo impacto a largo plazo en

el bienestar de los pueblos Indígenas y las comunidades locales, que ya de por sí son vulnerables^{3,4}.

En general los factores que impulsan la deforestación y la degradación ambiental en la Amazonía son múltiples: la expansión agrícola, la tala de árboles, los incendios, la minería, la expansión urbana y las represas hidroeléctricas^{5,6}. El tipo y el nivel de degradación asociados a cada una de estas actividades puede tener impactos específicos en la transmisión de enfermedades infecciosas, especialmente las zoonóticas o aquellas que se contagian por vectores⁷. También pueden contribuir a otros problemas de salud como son los síndromes respiratorios, exposición a mercurio y la inseguridad alimentaria. Los procesos relacionados con estas actividades pueden tener impactos adicionales, que a menudo agravan las condiciones de bienestar.

Impactos de la deforestación en la diversidad y la propagación de enfermedades Los cambios ambientales en la Amazonía -en particular aquellos asociados con el clima, microclimas y el uso de la tierra-, se han relacionado repetidamente con el mayor riesgo (y la incidencia) de enfermedades infecciosas que emergen y que vuelven a surgir, y que se espera que aumenten con la deforestación y el cambio climático antropogénico. Existen importantes diferencias en función de la dinámica de cada agente infeccioso. A continuación, se comentan algunos casos.

Malaria Tras décadas de trabajo en torno a la deforestación de la Amazonía y los parásitos *Plasmodium* que causan malaria en los seres humanos, se ha demostrado que existe una relación a escala dependiente no lineal con la incidencia de la enfermedad⁸, así como también una importante retroalimentación entre su incidencia y la deforestación⁹. Los análisis de la densidad del mosquito *Anopheles darlingi*, principal vector de malaria en Sudamérica, revelan una relación positiva con la deforestación reciente¹⁰.

¹², lo que implica que la tala forestal aumenta el riesgo de malaria cerca de los bordes del bosque. Sin embargo, en regiones con asentamientos humanos consolidados, la incidencia de la malaria está correlacionada de manera positiva con la cobertura forestal^{13,14}. Esta aparente no linealidad se explica en parte por la ecología de *A. darlingi*, que se ve favorecida en los bordes del bosque, lo que se traduce en un mayor riesgo de malaria tanto en las áreas recién deforestadas^{15,16} como en los parches de bosques en las zonas urbanas.

Los factores socioeconómicos, incluyendo el momento de la actividad humana y los patrones de migración, pueden también tener un papel importante en la modulación del riesgo de malaria y los resultados de la enfermedad, lo que refleja una estrecha relación entre la ecología del vector y las actividades humanas. Asimismo, a una escala espacial distinta, la presencia de minas de oro se ha relacionado con una mayor incidencia de la malaria en Brasil¹⁴, lo que demuestra cómo el cambio ambiental aumenta la exposición.

Por último, a escala de la Amazonía brasileña, estudios recientes sugieren una relación compleja y bidireccional entre el riesgo de malaria y la deforestación. Aunque la deforestación incrementó significativamente la transmisión de la enfermedad (un aumento del 10% en la deforestación condujo a un crecimiento del 3,3% en la incidencia de malaria), una alta carga de malaria a su vez redujo la tala de bosques (un 1% más en la incidencia de malaria condujo a una disminución del 1,4% en la deforestación). Esto último fue asociado a cambios en el comportamiento humano, actividad económica, migración, asentamiento y la fuerza de la interacción, que se atenuó a medida que se intensificaba el uso de la tierra⁹.

Chagas La enfermedad de Chagas, transmitida por los triatominos *Rhodnius* y *Triatoma*, también

responde a los cambios ambientales. En la interfaz entre los asentamientos humanos y los hábitats forestales, los vectores de Chagas parecen haberse adaptado rápidamente en asentamientos recientes, lo que conlleva a una correlación positiva entre la fragmentación de los bosques y la incidencia de la enfermedad¹⁷. Sin embargo, los entornos urbanizados no están completamente exentos de transmisión a pesar de la falta de cobertura forestal. Esto se debe a que el mal de Chagas puede contagiarse vía oral, a través de la ingesta de jugos de fruta contaminados, como en el caso del açai y del bacaba¹⁸⁻²⁰. Por lo tanto, los nuevos asentamientos forestales experimentan ciclos de Chagas selvático, pero los sitios más urbanizados -que se esperaría que tuviesen menor abundancia de vectores debido a las altas temperaturas y a la baja cobertura forestal¹⁷-, experimentan brotes a través de un mecanismo epidemiológico diferente⁷.

Leishmaniosis cutánea americana Factores ambientales como la deforestación pueden correlacionarse positivamente con la incidencia de la leishmaniosis cutánea^{21,22}. Sin embargo, en los municipios Amazónicos, la leishmaniosis cutánea disminuye con el aumento en la eficacia del sistema sanitario²³. Además, la introducción de animales domésticos en zonas de reciente asentamiento también puede contribuir a la aclimatación de los vectores a los paisajes humanos, aumentando los riesgos de enfermedad por la deforestación²⁴. Así pues, las relaciones no lineales entre la pérdida de bosques y el riesgo de enfermedades están mediadas por los sistemas sanitarios locales y sus interacciones con una diversa fauna de vectores.

Surgimiento de nuevas enfermedades Los esfuerzos de vigilancia para identificar focos zoonóticos de coronavirus con potencial de propagación, señalan a la Amazonía como una región con una diversidad excepcionalmente alta, aunque poco conocida, de huéspedes virales y de virus²⁵. El aumento del

contacto entre seres humanos y fauna silvestre también aumenta el potencial de propagación zoonótica²⁶. Las predicciones de riesgo se basan originalmente en los hallazgos de coronavirus alfa y beta en unas pocas especies de murciélagos, este último es sobre todo en la subfamilia de coronavirus que incluye los patógenos humanos que causan el SARS, MERS y COVID-19²⁵ (aunque no se han encontrado variedades asociadas de estos patógenos humanos en la fauna de América). Otros virus también circulan en la región Amazónica y presentan serios riesgos de brotes incluyendo los arbovirus Rocío, Oro-pouche, Mayaro y Saint Louis^{27,28}, hantavirus²⁹ y arenavirus³⁰. De las 500 especies registradas en el Catálogo Internacional de Arbovirus, 220 ocurren solamente en la Amazonía brasileña³¹. Dado el escaso registro, el conocimiento sobre como el cambio en el uso de la tierra incrementaría el riesgo de propagación, sigue siendo limitado.

Puesto que la diversidad de virus en las poblaciones de animales silvestres es enorme pero el potencial de propagación es limitado, una forma eficaz de evitar futuras pandemias es realizar una estrecha vigilancia de las enfermedades infecciosas en la población humana^{32,33}. La mejora de los servicios de salud pública en toda la región también reduciría la carga de reconocidos patógenos como el *Plasmodium* o la *Leishmania*, y es necesaria para disminuir el riesgo de surgimiento de virus en las poblaciones silvestres. Aunque la Amazonía alberga una diversa gama de huéspedes y diversas comunidades de virus de potencial patógeno humano desconocido, la prevención de una pandemia catastrófica requiere la aplicación de estrategias que mejoren la salud humana en general.

La pandemia de COVID-19 ha recordado al mundo los riesgos de los efectos zoonóticos. Sin embargo, el potencial de contagio o contaminación patógena de seres humanos a la fauna silvestre es igual de importante para la biodiversidad³⁴. Décadas de

investigación sobre los arbovirus transmitidos por vectores han revelado las consecuencias del contagio. Fuera de la Amazonía, en Espírito Santo (Brasil), un brote de fiebre amarilla mató a docenas de primates no humanos. Esto provocó una rápida respuesta por parte de la salud pública para vacunar a las personas³⁵. Aunque no se ha establecido una cadena de transmisión entre primates salvajes, se han documentado mosquitos silvestres que albergan los virus Chikungunya y Zika, recientemente introducidos. Esto indica un riesgo plausible para la fauna silvestre³⁶. El hallazgo de que los endémicos monos nocturnos *Aotus* no contraen dengue después de la exposición a mosquitos infectados en Iquitos, sugiere que la transmisión del dengue permanece limitado a los animales y fauna silvestre. Al igual que con el riesgo de aparición de zoonosis, para evitar el establecimiento de reservorios zoonóticos para los arbovirus se requiere invertir de forma sostenida en la vigilancia de la diversidad de los virus que circulan en la población humana.

Impactos por la minería de mercurio en la salud humana y en la seguridad alimentaria Las explotaciones mineras de oro suelen estar asociadas a la contaminación en una serie de elementos como el arsénico (As), cobalto (Co), plomo (Pb), manganeso (Mn) y zinc (Zn)^{37,38}. Estos elementos químicos están asociados a una serie de efectos adversos para la salud, incluida la mortalidad infantil. Sin embargo, los impactos de estas sustancias para la salud humana en la Amazonía son todavía muy desconocidos. En la región, el principal impacto de las minas de oro en la salud humana es la contaminación por mercurio (Hg). Las comunidades que viven cerca de las minas de oro están expuestas a concentraciones nocivas de Hg que se liberan durante la extracción del oro y se vierten en los cauces de agua, en los suelos y en la atmósfera³⁹. Una vez que el Hg metálico inorgánico es liberado por las actividades antropogénicas, ciertas bacterias lo transforman en su versión orgánica más tóxica: el metilmercurio (MeHg). Este proceso

permite que el MeHg ingrese a las redes alimentarias acuáticas, donde puede acumularse en organismos individuales (bioacumulación), proceso que se magnifica a medida que pasa a niveles tróficos superiores (por ejemplo, biomagnificación en peces depredadores)^{40,41}. Esto puede afectar a peces de gran importancia para la seguridad alimentaria de las comunidades locales⁴².

A pesar de la falta de análisis sistemáticos, estudios realizados en los últimos 20 años en Colombia, Perú y Bolivia han documentado la intoxicación por Hg incluso en poblaciones Indígenas remotas. Además, la exposición al Hg puede ser tóxica incluso a dosis muy bajas, y los efectos toxicológicos del MeHg son de especial interés para la salud pública dada su capacidad de atravesar la placenta y la barrera hemoencefálica⁴³. El MeHg alcanza elevados niveles tanto para la circulación materna como la fetal, con el potencial de causar daños irreversibles en el desarrollo del bebé, incluyendo la disminución de su capacidad intelectual y motora³⁹. Los estudios que investigan las asociaciones entre los niveles de Hg en el cabello y el rendimiento neuropsicológico encontraron estrechos vínculos entre el Hg y las deficiencias cognitivas en niños y adolescentes de toda la Amazonía⁴⁴⁻⁴⁶. El mercurio también puede impactar en la salud de los adultos, afectando así al sistema digestivo, renal, nervioso y cardiovascular. Puede incluso causar depresión, irritabilidad extrema, alucinaciones y pérdida de memoria⁴⁷. Recientemente, en comunidades Amazónicas se confirmó la enfermedad de Minamata como resultado de la exposición a altos niveles de MeHg, con síntomas que incluyen temblores, insomnio, ansiedad, alteración de las sensaciones táctiles y de vibración, déficit visual y finalmente, la muerte.

Impacto de los incendios en la calidad del aire y la salud humana La deforestación y los incendios forestales emiten grandes cantidades de partículas contaminantes a la atmósfera. Esto degrada la

calidad del aire, afectando la salud humana, especialmente entre los grupos vulnerables, como los niños pequeños⁴⁸. La estación seca es el periodo más crítico de exposición de la población al humo de los incendios; los niveles de partículas durante estos meses suelen estar muy por encima de los niveles de seguridad recomendados por la OMS. Las visitas a urgencias aumentan durante la estación seca, especialmente entre niños y niñas menores de diez años. Están positivamente correlacionadas con las concentraciones de PM_{2.5} (es decir, partículas de menos de 2,5 micrómetros de diámetro), que corresponden a las partículas finas presentes en el humo⁴⁹. Las partículas finas pueden permanecer en la atmósfera hasta por una semana, y pueden ser transportadas por el viento hasta zonas urbanas, donde incluso llegan a afectar la salud de habitantes que se encuentran alejados del lugar de origen del incendio^{50,51}.

Otros componentes del humo son el PM₁₀ (material particulado de menos de 10 micrómetros de diámetro, pero de más de 2,5 micrómetros) y el carbono negro. Ambos son extremadamente tóxicos para los seres humanos. El PM₁₀ tiene el potencial de causar daños en el ADN y matar las células⁵², lo que conlleva al desarrollo de cáncer al pulmón⁵³. Pueden penetrar las zonas alveolares del pulmón, atravesar la membrana celular, llegar al torrente sanguíneo y acumularse en otros órganos. El PM_{2.5} y el carbono negro se asocian a una reducción de la función pulmonar en niños de 6 a 15 años⁵⁴⁻⁵⁶. Escolares de municipios donde hay altos niveles de deforestación, y por tanto de incendios y humo, tienen una alta prevalencia de tener asma^{20,57}. Las embarazadas son también muy vulnerables a la contaminación por humo. La exposición a material particulado (PM_{2.5}) y a monóxido de carbono (CO) procedentes de la quema de biomasa, durante el segundo y tercer trimestre de embarazo aumentan la incidencia de bajo peso en un 50% en recién nacidos⁵⁸.

Interacciones entre impulsores e impactos Las interacciones entre impulsores e impactos de la degradación son complejas, y afectan tanto a las personas como a la biodiversidad a través de múltiples contextos específicos. Por ejemplo, la tala y la minería del oro conllevan una degradación ambiental que facilita la transmisión de enfermedades por vectores, como la malaria⁵⁹⁻⁶¹, leishmaniasis^{62,63}, hantavirus⁶⁴ y la enfermedad de Chagas⁶⁵. Se crean nuevos nichos ecológicos que propician la introducción de vectores de enfermedades asimiladas y que pueden llegar a mantenerse a largo plazo^{10,11}. La transformación de la tierra para la agricultura genera un escenario similar para la irrupción de la malaria "fronteriza"⁶⁶ y posiblemente de la leishmaniosis. Con el tiempo, la agricultura industrial a gran escala agrava el cambio climático^{67,68}, reduciendo la diversidad y calidad del suministro de alimentos. Posteriormente, estos factores contribuyen a la doble carga de malnutrición y al aumento de obesidad y enfermedades cardiovasculares.

Muchas de las sinergias descritas se han producido durante décadas y a menudo aumentan las desigualdades que históricamente han afectado a la cuenca del Amazonas⁶⁹. Lo que hoy es diferente es la escala y magnitud de la degradación ya provocada, sus efectos acumulativos y el decreciente potencial para revertir estos procesos.

Incertidumbres y brechas de conocimiento Relaciones complejas impiden realizar generalizaciones sobre el impacto global de la degradación medioambiental en el bienestar y la salud de las personas. La caracterización de estas complejas relaciones requiere estudios más detallados, que abarquen escalas temporales y espaciales más amplias. Además, existe una necesidad de extender la investigación más allá de la salud física para ampliar nuestra comprensión de cómo la degradación ambiental afecta a la salud mental. El análisis y la predicción de impactos que interactúan a diferentes escalas, requiere

marcos conceptuales más amplios y flexibles. Los enfoques ecosistémicos pueden ser valiosos para entender las interacciones, sinergias y complejidades generales inherentes a las relaciones entre la pérdida de bosques, degradación de recursos hídricos y la salud humana. Del mismo modo, la investigación multidisciplinaria que combina campos como la observación de la tierra, la ciencia de la información, la modelización matemática, la economía, las ciencias sociales y la antropología es fundamental para cuantificar estas brechas de conocimiento y abordar las incertidumbres.

Conclusiones La relación entre la conversión y la fragmentación de los bosques con la incidencia de las enfermedades infecciosas es compleja, dependiente de la escala y a menudo condicionada por las repercusiones socioecológicas. Ciertos vectores de enfermedades pueden aumentar en las fronteras de deforestación, mientras que las enfermedades emergentes asociadas a la propagación zoonótica de los hantavirus y arenavirus se han relacionado con las actividades de deforestación. Además, la matriz espacial, la abundancia de animales domésticos y ciertas actividades humanas modifican las enfermedades de manera que se pueda evitar su propagación. Hay una necesidad urgente de aclarar la relación entre los impactos individuales y los acumulativos de las diferentes perturbaciones ambientales para orientar las políticas y minimizar sus impactos. La degradación ambiental no es sólo un problema ecológico sino también uno de carácter socioeconómico y sanitario que afecta a millones de hombres y mujeres de la región.

Referencias

1. World Health Organization. CONSTITUTION of the World Health Organization. *Chronicle of the World Health Organization* vol. 1 29–43 <https://www.who.int/about/who-we-are/constitution> (1947).
2. European Environment Agency. Environment and Health. (2020).
3. Athayde, S. & Silva-Lugo, J. Adaptive Strategies to Displacement and Environmental Change Among the Kaiabi

- Indigenous People of the Brazilian Amazon. *Soc. Nat. Resour.* 31, 666–682 (2018).
4. Damiani, S., Guimarães, S. M. F., Montalvão, M. T. L. & Passos, C. J. S. “All That’s Left is Bare Land and Sky”: Palm Oil Culture and Socioenvironmental Impacts on a Tembê Indigenous Territory in the Brazilian Amazon. *Ambient. Soc.* 23, (2020).
 5. Kalamandeen, M. *et al.* Pervasive Rise of Small-scale Deforestation in Amazonia. *Sci. Rep.* 8, 1–10 (2018).
 6. Piotrowski, M. & Ortiz, E. Nearing the Tipping Point. Drivers of Deforestation in the Amazon Region. *Dialogue. Leadersh. Am.* 1–28 (2019).
 7. Ellwanger, J. H. *et al.* Beyond diversity loss and climate change: Impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. *An. Acad. Bras. Cienc.* 92, 20191375 (2020).
 8. Laporta, G. Z. Amazonian rainforest loss and declining malaria burden in Brazil. *The Lancet Planetary Health* vol. 3 e4–e5 (2019).
 9. MacDonald, A. J. & Mordecai, E. A. Amazon deforestation drives malaria transmission, and malaria burden reduces forest clearing. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 116, 22212–22218 (2019).
 10. Vittor, A. Y. *et al.* The effect of deforestation on the human-biting rate of *Anopheles darlingi*, the primary vector of falciparum malaria in the Peruvian Amazon. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 74, 3–11 (2006).
 11. Vittor, A. Y. *et al.* Linking deforestation to malaria in the Amazon: Characterization of the breeding habitat of the principal malaria vector, *Anopheles darlingi*. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 81, 5–12 (2009).
 12. Burkett-Cadena, N. D. & Vittor, A. Y. Deforestation and vector-borne disease: Forest conversion favors important mosquito vectors of human pathogens. *Basic Appl. Ecol.* 26, 101–110 (2018).
 13. Valle, D. & Clark, J. Conservation Efforts May Increase Malaria Burden in the Brazilian Amazon. *PLoS One* 8, e57519 (2013).
 14. Valle, D. & Tucker Lima, J. M. Large-scale drivers of malaria and priority areas for prevention and control in the Brazilian Amazon region using a novel multi-pathogen geospatial model. *Malar. J.* 13, 443 (2014).
 15. Barros, F. S. M. & Honório, N. A. Deforestation and Malaria on the Amazon Frontier: Larval Clustering of *Anopheles darlingi* (Diptera: Culicidae) Determines Focal Distribution of Malaria. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 93, 939–953 (2015).
 16. Terrazas, W. C. M. *et al.* Deforestation, drainage network, indigenous status, and geographical differences of malaria in the State of Amazonas. *Malar. J.* 14, 379 (2015).
 17. Brito, R. N. *et al.* Drivers of house invasion by sylvatic Chagas disease vectors in the Amazon-Cerrado transition: A multi-year, state-wide assessment of municipality-aggregated surveillance data. *PLoS Negl. Trop. Dis.* 11, e0006035 (2017).
 18. de Barros Moreira Beltrão, H. *et al.* Investigation of two outbreaks of suspected oral transmission of acute Chagas disease in the Amazon region, Pará State, Brazil, in 2007. *Trop. Doct.* 39, 231–232 (2009).
 19. Valente, S. A. da S. *et al.* Analysis of an acute Chagas disease outbreak in the Brazilian Amazon: human cases, triatomines, reservoir mammals and parasites. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.* 103, 291–297 (2009).
 20. Sousa Júnior, A. da S. *et al.* Análise espaço-temporal da doença de Chagas e seus fatores de risco ambientais e demográficos no município de Barcarena, Pará, Brasil. *Rev. Bras. Epidemiol.* 20, 742–755 (2017).
 21. Olalla, H. R. *et al.* An analysis of reported cases of leishmaniasis in the southern Ecuadorian Amazon region, 1986–2012. *Acta Trop.* 146, 119–126 (2015).
 22. Gonçalves, N. V. *et al.* Cutaneous leishmaniasis: Spatial distribution and environmental risk factors in the state of Pará, Brazilian Eastern Amazon. *J. Infect. Dev. Ctries.* 13, 939–944 (2019).
 23. Rodrigues, M. G. de A., Sousa, J. D. de B., Dias, Á. L. B., Monteiro, W. M. & Sampaio, V. de S. The role of deforestation on American cutaneous leishmaniasis incidence: spatial-temporal distribution, environmental and socioeconomic factors associated in the Brazilian Amazon. *Trop. Med. Int. Heal.* 24, 348–355 (2019).
 24. Rosário, I. N. G., Andrade, A. J., Ligeiro, R., Ishak, R. & Silva, I. M. Evaluating the Adaptation Process of Sandfly Fauna to Anthropized Environments in a Leishmaniasis Transmission Area in the Brazilian Amazon. *J. Med. Entomol.* 54, tjw182 (2016).
 25. Anthony, S. J. *et al.* Global patterns in coronavirus diversity. *Virus Evol.* 3, (2017).
 26. Olival, K. J. *et al.* Host and viral traits predict zoonotic spillover from mammals. *Nature* 546, 646–650 (2017).
 27. Vasconcelos, P. F. C. *et al.* Inadequate management of natural ecosystem in the Brazilian Amazon region results in the emergence and reemergence of arboviruses. *Cad. Saude Publica* 17, S155–S164 (2001).
 28. Araújo, P. A. *et al.* Investigation about the Occurrence of Transmission Cycles of Arbovirus in the Tropical Forest, Amazon Region. *Viruses* 11, 774 (2019).
 29. Guterres, A., de Oliveira, R. C., Fernandes, J., Schrago, C. G. & de Lemos, E. R. S. Detection of different South American hantaviruses. *Virus Res.* 210, 106–113 (2015).
 30. Bausch, D. G. & Mills, J. N. Arenaviruses: Lassa Fever, Lujo Hemorrhagic Fever, Lymphocytic Choriomeningitis, and the South American Hemorrhagic Fevers. in *Viral Infections of Humans* 147–171 (Springer US, 2014). doi:10.1007/978-1-4899-7448-8_8.
 31. Medeiros, D. B. A. & Vasconcelos, P. F. C. Is the Brazilian diverse environment a crib for the emergence and maintenance of exotic arboviruses? *An. Acad. Bras. Cienc.* 91, (2019).
 32. Holmes, E. C., Rambaut, A. & Andersen, K. G. Pandemics: Spend on surveillance, not prediction comment. *Nature* vol.

- 558 180–182 (2018).
33. Carlson, C. J. From PREDICT to prevention, one pandemic later. *The Lancet Microbe* 1, e6–e7 (2020).
 34. Nuñez, G. n. B., A. *et al.* IUCN SSC Bat Specialist Group (BSG) Recommended Strategy for Researchers to Reduce the Risk of Transmission of SARS-CoV-2 from Humans to Bats MAP: Minimize, Assess, Protect. (2020).
 35. Fernandes, N. C. C. de A. *et al.* Outbreak of Yellow Fever among Nonhuman Primates, Espirito Santo, Brazil, 2017. *Emerg. Infect. Dis.* 23, 2038–2041 (2017).
 36. Valentine, M. J., Murdock, C. C. & Kelly, P. J. Sylvatic cycles of arboviruses in non-human primates. *Parasites and Vectors* vol. 12 (2019).
 37. Filho, S. R. & Maddock, J. E. L. Mercury pollution in two gold mining areas of the Brazilian Amazon. *J. Geochemical Explor.* 58, 231–240 (1997).
 38. Pereira, W. V. da S. *et al.* Chemical fractionation and bioaccessibility of potentially toxic elements in area of artisanal gold mining in the Amazon. *J. Environ. Manage.* 267, 110644 (2020).
 39. Gibb, H. & O’Leary, K. G. Mercury Exposure and Health Impacts among Individuals in the Artisanal and Small-Scale Gold Mining Community: A Comprehensive Review. *Environ. Health Perspect.* 122, 667–672 (2014).
 40. Morel, F. M. M., Kraepiel, A. M. L. & Amyot, M. The Chemical Cycle and Bioaccumulation Of Mercury. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29, 543–566 (1998).
 41. Ullrich, S. M., Tanton, T. W. & Abdrashitova, S. A. Mercury in the Aquatic Environment: A Review of Factors Affecting Methylation. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 31, 241–293 (2001).
 42. Diringer, S. E. *et al.* River transport of mercury from artisanal and small-scale gold mining and risks for dietary mercury exposure in Madre de Dios, Peru. *Environ. Sci. Process. Impacts* 17, 478–487 (2015).
 43. Rice, K. M., Walker, E. M., Wu, M., Gillette, C. & Blough, E. R. Environmental Mercury and Its Toxic Effects. *J. Prev. Med. Public Heal.* 47, 74–83 (2014).
 44. Santos-Lima, C. dos *et al.* Neuropsychological Effects of Mercury Exposure in Children and Adolescents of the Amazon Region, Brazil. *Neurotoxicology* 79, 48–57 (2020).
 45. Grandjean, P., White, R. F., Nielsen, A., Cleary, D. & de Oliveira Santos, E. C. Methylmercury neurotoxicity in Amazonian children downstream from gold mining. *Environ. Health Perspect.* 107, 587–591 (1999).
 46. Reuben, A. *et al.* Elevated Hair Mercury Levels Are Associated With Neurodevelopmental Deficits in Children Living Near Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Peru. *GeoHealth* 4, (2020).
 47. World Health Organization. *Guidance For Identifying Populations At Risk From Mercury Exposure.* <http://www.who.int/foodsafety/en/> (2008).
 48. Smith, L. T., Aragão, L. E. O. C., Sabel, C. E. & Nakaya, T. Drought impacts on children’s respiratory health in the Brazilian Amazon. *Sci. Rep.* 4, 3726 (2015).
 49. Mascarenhas, M. D. M. *et al.* Anthropogenic air pollution and respiratory disease-related emergency room visits in Rio Branco, Brazil - September, 2005. *J. Bras. Pneumol.* 34, 42–46 (2008).
 50. Freitas, S. R. *et al.* Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environ. Fluid Mech.* 5, 135–167 (2005).
 51. Liana Anderson & Marchezini, V. Incêndios Florestais na Amazônia: O Que Dizem os Dados Sobre Desenvolvimento, Desastres e Emergências em Saúde Pública. (2020) doi:10.1590/0103-11042020E220.
 52. Alves, L. Surge of respiratory illnesses in children due to fires in Brazil’s Amazon region. *Lancet Respir. Med.* 8, 21–22 (2020).
 53. de Oliveira Alves, N. *et al.* Biomass burning in the Amazon region causes DNA damage and cell death in human lung cells. *Sci. Rep.* 7, 10937 (2017).
 54. Jacobson, L. da S. V. *et al.* Association between fine particulate matter and the peak expiratory flow of schoolchildren in the Brazilian subequatorial Amazon: A panel study. *Environ. Res.* 117, 27–35 (2012).
 55. Jacobson, L. da S. V. Efeitos adversos da poluição atmosférica em crianças e adolescentes devido a queimadas na Amazônia : uma abordagem de modelos mistos em estudos de painel. (Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2013).
 56. Jacobson, L. da S. V. *et al.* Acute Effects of Particulate Matter and Black Carbon from Seasonal Fires on Peak Expiratory Flow of Schoolchildren in the Brazilian Amazon. *PLoS One* 9, e104177 (2014).
 57. Rosa, A. M., Ignotti, E., Hacon, S. de S. & Castro, H. A. de. Prevalência de asma em escolares e adolescentes em um município na região da Amazônia brasileira. *J. Bras. Pneumol.* 35, 7–13 (2009).
 58. Cândido da Silva, A. M., Moi, G. P., Mattos, I. E. & Hacon, S. de S. Low birth weight at term and the presence of fine particulate matter and carbon monoxide in the Brazilian Amazon: a population-based retrospective cohort study. *BMC Pregnancy Childbirth* 14, 309 (2014).
 59. Galardo, A. K. R., Zimmerman, R. & Galardo, C. D. Larval control of Anopheles (Nyssorhynchus) darlingi using granular formulation of Bacillus sphaericus in abandoned gold-miners excavation pools in the Brazilian Amazon Rainforest. *Rev. Soc. Bras. Med. Trop.* 46, 172–177 (2013).
 60. Adhin, M., Labadie-Bracho, M. & Vreden, S. Gold mining areas in Suriname: reservoirs of malaria resistance? *Infect. Drug Resist.* 7, 111 (2014).
 61. Sanchez, J. F. *et al.* Unstable Malaria Transmission in the Southern Peruvian Amazon and Its Association with Gold Mining, Madre de Dios, 2001–2012. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 96, 304–311 (2017).
 62. Rotureau, B., Joubert, M., Clyti, E., Djossou, F. & Carme, B. Leishmaniasis among gold miners, French Guiana [6].

Emerging Infectious Diseases vol. 12 1169–1170 (2006).

63. Loiseau, R. *et al.* American cutaneous leishmaniasis in French Guiana: an epidemiological update and study of environmental risk factors. *Int. J. Dermatol.* 58, 1323–1328 (2019).
64. Terças-Trettel, A. C. P. *et al.* Malaria and Hantavirus Pulmonary Syndrome in Gold Mining in the Amazon Region, Brazil. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16, 1852 (2019).
65. Almeida, C. E. *et al.* Could the bug triatoma sherlocki be vectoring chagas disease in small mining communities in Bahia, Brazil? *Med. Vet. Entomol.* 23, 410–417 (2009).
66. Bourke, B. P. *et al.* Exploring malaria vector diversity on the Amazon Frontier. *Malar. J.* 17, 342 (2018).
67. Schiesari, L. & Grillitsch, B. Pesticides meet megadiversity in the expansion of biofuel crops. *Front. Ecol. Environ.* 9, 215–221 (2011).
68. 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).
69. Dávalos, L. M. *et al.* Pandemics' historical role in creating inequality. *Science (80-.)*. 368, 1322.2-1323 (2020).