

Capítulo 24 En Resumen

Resiliencia de la selva Amazónica a los cambios globales: Evaluación del riesgo de los puntos de inflexión



Região Metropolitana de Manaus, estiagem incomum (Foto: Alberto Cesar Araújo/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Resiliencia de la selva Amazónica a los cambios globales: Evaluación del riesgo de los puntos de inflexión

Marina Hirota^a, Bernardo M. Flores^a, Richard Betts^b, Laura S. Borma^c, Adriane Esquivel-Muelbert^d, Catarina Jakovac^e, David M. Lapola^f, Encarni Montoya^g, Rafael S. Oliveira^h, Boris Sakschewskiⁱ

Mensajes clave y recomendaciones

- 1) Existen diferentes hipótesis sobre los puntos de inflexión en la Amazonía relacionados con las precipitaciones regionales, la temperatura global y la deforestación.
- 2) Se han propuesto diferentes configuraciones de ecosistemas para sustituir los bosques afectados por la deforestación y la degradación resultante de la acumulación de perturbaciones. En el futuro, amplias zonas podrían estar cubiertas por bosques secundarios degradados de dosel cerrado.
- 3) La heterogeneidad de las respuestas de los bosques y la conectividad en la Amazonía podrían aumentar la resiliencia del sistema en su conjunto. Sin embargo, si las perturbaciones se generalizan, existe un mayor riesgo de alcanzar un punto de inflexión sistémico.
- 4) Se necesitan pruebas observacionales y experimentales adicionales que mejoren la capacidad de los modelos de clima-vegetación para proyectar la probabilidad de cruzar un punto de inflexión en la Amazonía.
- 5) Es necesario invertir y planificar un sistema de seguimiento transnacional eficaz para mejorar nuestros conocimientos sobre la dinámica de los diferentes ecosistemas Amazónicos y sus respuestas al cambio ambiental
- 6) Gestionar la resiliencia Amazónica a nivel local puede reducir el riesgo de alcanzar un punto de inflexión sistémico. Para ello es necesario proteger y restaurar la cubierta forestal, la biodiversidad, la agro biodiversidad y la diversidad cultural, así como mejorar el manejo del fuego y los sistemas de alerta temprana de incendios. La gestión de la resiliencia Amazónica también requiere una acción global para detener las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Resumen En este capítulo se revisan y analizan las pruebas existentes de los cambios actuales y que se están produciendo en el sistema forestal de la Amazonía que pueden conducir a la pérdida de resiliencia y a la posibilidad de cruzar puntos de inflexión en los que el ecosistema puede cambiar gradual o abruptamente a una configuración ambientalmente degradada y persistente.

Introducción La Amazonía es un sistema complejo, dinámico y extremadamente heterogéneo y biodiverso, resultado de la interacción entre procesos naturales y antropogénicos que operan a diferentes escalas espaciales y temporales (capítulos 1-13). Los cambios en la vegetación de la Amazonía se han acelerado en el último siglo, debido principalmente a las actividades antropogénicas que han provocado

^a Universidad Federal de Santa Catarina, Campus Universitário Reitor João David Ferreira Lima, s/n. Trindade. 88040-900. Florianópolis, Brasil

^b MetOffice, FitzRoy Road, Exeter, Devon EX1 3PB, Reino Unido

^c INPE/DIAV, Av. dos Astronautas, 1758. São José dos Campos, Brasil

^d University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, Reino Unido

^e Forest Ecology and Management Group, Wageningen University & Research, Wageningen, 6700 AA, Países Bajos

^f Universidad de Campinas, Av. André Tosello 209. 13083-886, Campinas, Brasil

^g Department of Geography and Planning, School of Environmental Sciences, University of Liverpool, Roxby Building, L69 7ZT, Reino Unido

^h Universidad de Campinas, Rua Monteiro Lobato, 255. 13083-862, Campinas, Brasil

ⁱ Potsdam Institute for Climate Impact Research, Telegrafenberg A62. 14412 Potsdam, Alemania

niveles de perturbación sin precedentes en la región (véanse los capítulos 14-23).

Existe una gran preocupación por un posible punto de inflexión ecológico para la estabilidad de los ecosistemas forestales de la Amazonía, que si se supera podría dar lugar a un retroceso o colapso forestal a gran escala. Sin embargo, a pesar de las crecientes pruebas de mortalidad de los árboles causada por eventos extremos de lluvia, incendios, deforestación y sus efectos combinados¹⁻⁹ (véanse también los capítulos 22 y 23), el comportamiento real del sistema Amazónico sigue siendo incierto.

Puntos de inflexión potenciales y nuevas configuraciones Los umbrales de los puntos de inflexión propuestos hasta ahora para los bosques tropicales de la Amazonía incluyen (1) precipitaciones anuales totales inferiores a 1.000 mm/año^{10,11} (Figura 24.1a-d)^{12,13,14,15,16,17} o 1.500 mm/año¹⁸, (2) duración de la estación seca superior a siete meses¹¹, (3) valores máximos de déficit hídrico acumulado superiores a 200 mm/año¹⁸ o 350 mm/año¹⁹ (Figura 24.1e); (4) un aumento de 2°C de la temperatura de equilibrio de la Tierra²⁰, y (5) superar el 20-25% de deforestación acumulada en toda la cuenca^{21,22}

Una de las principales inquietudes es que, una vez sobrepasados estos posibles puntos de inflexión, la pérdida de bosques a gran escala provoque una retroalimentación positiva que implique la reducción de las precipitaciones, el aumento de los incendios y una mayor mortalidad forestal. Sobre la base de la evidencia existente, identificamos cuatro principales configuraciones hacia las cuales los bosques Amazónicos podrían desplazarse permanentemente debido a tales retroalimentaciones auto-reforzantes (Figura 24.2).

(i) Estado degradado con dosel forestal abierto Dado que la mayoría de los árboles del bosque Amazónico son sensibles al fuego, los incendios frecuentes suelen

matar a la mayor parte de la comunidad arbórea²³⁻²⁷, especialmente a los individuos más jóvenes, reduciendo el reclutamiento de árboles²⁵. Las perturbaciones que abren la estructura del bosque aumentan inmediatamente la disponibilidad de luz a nivel del suelo, permitiendo la invasión de plantas herbáceas^{23,28,29}. Como resultado, estos bosques perturbados pueden quedar atrapados en un estado abierto debido a los reiterados incendios forestales. Múltiples estudios en la Amazonía muestran que ya se están produciendo cambios hacia un estado abierto degradado^{24,26,30}. Dado que los bosques desempeñan un papel importante en el mantenimiento del régimen de lluvias de la Amazonía (capítulo 5), la degradación de los bosques probablemente reducirá las lluvias en la Amazonía central y occidental. Una retroalimentación positiva entre sequía y deforestación ya se está fortaleciendo con la deforestación acumulada, aumentando aún más las tasas de deforestación⁷ e incendios forestales³¹. La deforestación también aumenta las temperaturas regionales³². Debido a estas retroalimentaciones a gran escala, un punto de inflexión (el número 5 arriba mencionado) podría causar una importante regresión de los bosques de la cuenca del Amazonas^{21,22}.

(ii) Estado del bosque secundario con dosel forestal tipo cerrado En esta configuración, diferentes mecanismos de retroalimentación atrapan a los bosques en una etapa de sucesión temprana (Figura 24.2). En condiciones óptimas, los bosques secundarios cambian y maduran gradualmente en cuanto a composición funcional y de especies, aumentan la diversidad de especies y la biomasa, y las interacciones planta-animal recuperan complejidad y biomasa^{33,34}. Sin embargo, los bosques secundarios tienen casi el doble de probabilidades de ser intervenidos que los bosques maduros, posiblemente debido a las menores restricciones gubernamentales y a la mayor accesibilidad³⁵, provocando que los bosques secundarios persistan en un estado de sucesión temprana²⁴.

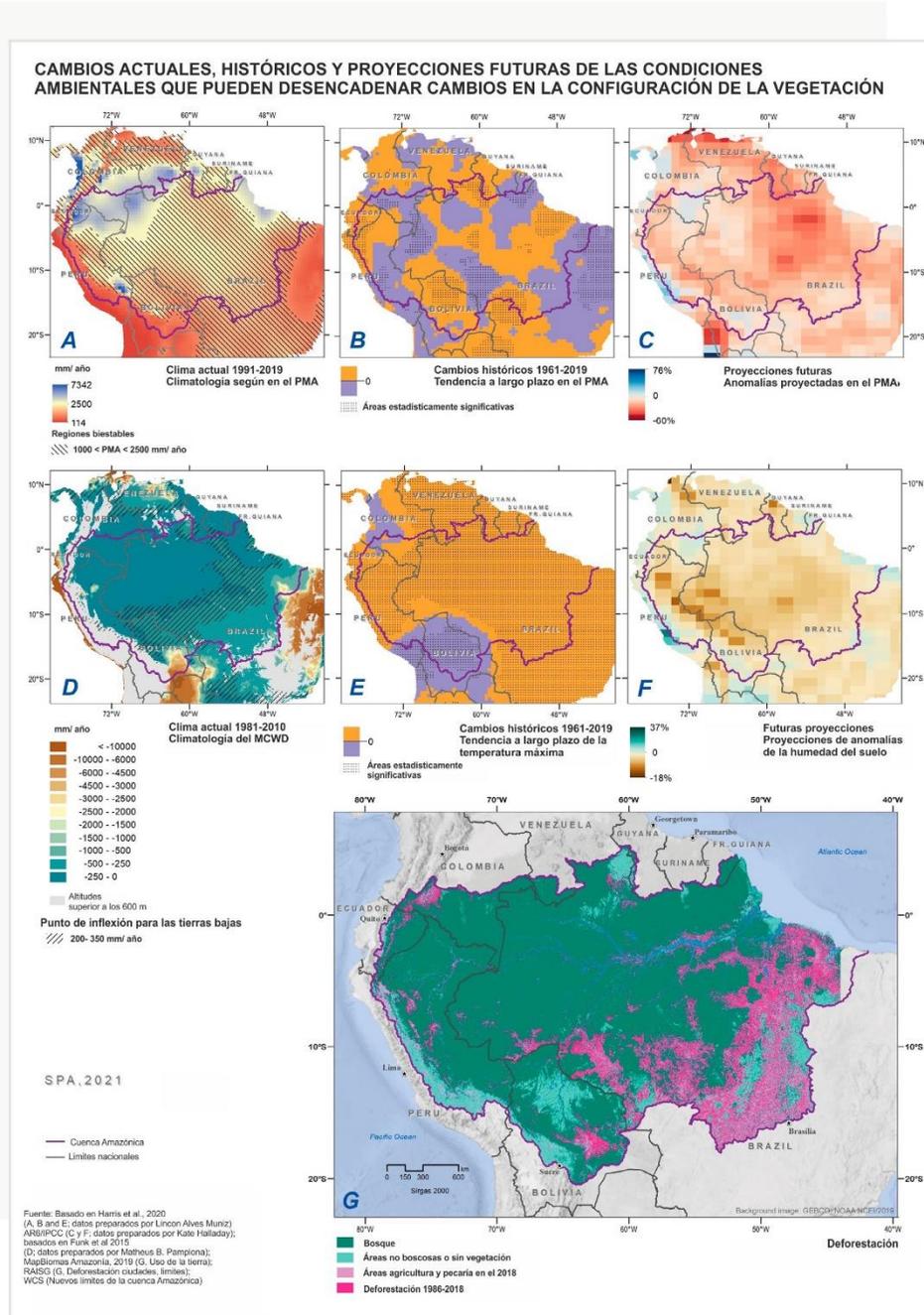


Figura 24.1 Puntos de inflexión y perturbaciones que pueden afectar la resiliencia de la Amazonía. (A) Climatología de 1991 - 2019 de la precipitación media anual (PMA, mm/año) mostrando las áreas biestables para el rango del punto de inflexión (punto de inflexión 1 arriba) usando el conjunto de datos CRU 4.04¹⁶; (B) tendencias a largo plazo (Kendall τ) en el PMA (las áreas sombreadas son estadísticamente significativas) utilizando el CRU 4.04¹⁶; (C) cambios relativos proyectados en el PMA a 4°C de calentamiento global con el modelo climático UKESM1¹⁷; (D) Climatología del MCWD de 1981-2010 mostrando los puntos de inflexión (-200 y -350 mm/año para las llanuras) (punto de inflexión 3 arriba); (E) tendencias a largo plazo (Kendall τ) de las temperaturas máximas (las áreas sombreadas son estadísticamente significativas) utilizando el conjunto de datos CRU 4.04¹⁶; (F) cambios relativos proyectados en la humedad del suelo con un calentamiento global de 4°C con el modelo climático UKESM1¹⁷ (G) deforestación según MapBiomas¹³, fuente: ^{14,15}.

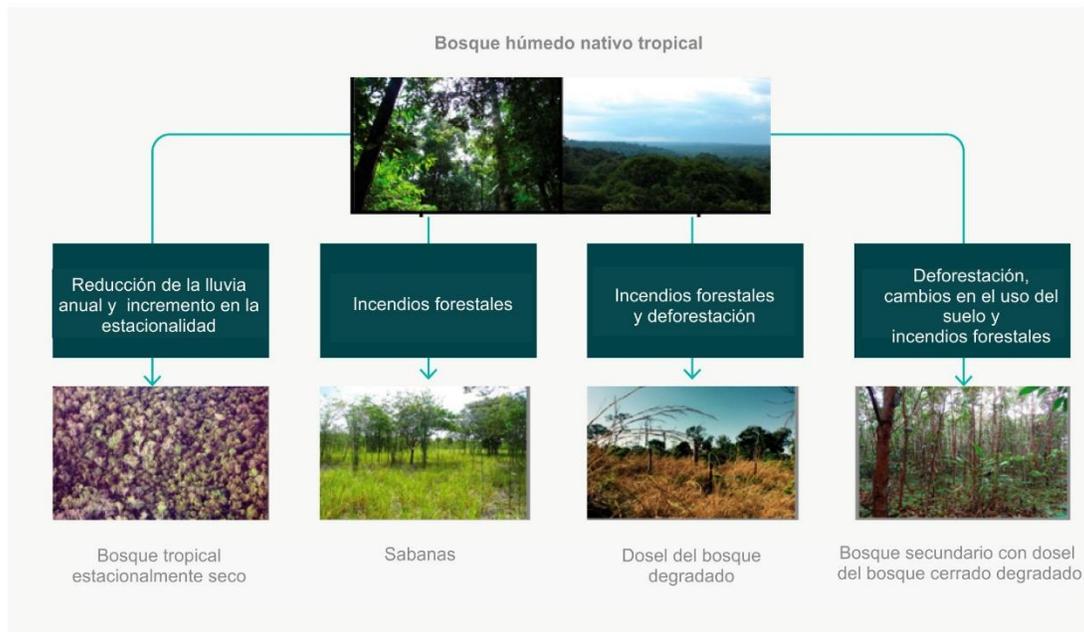


Figura 24.1 Posibles configuraciones alternativas e impulsores. Fotos: bosques tropicales nativos en la estación ZF2 (AM, Brasil) por Marina Hirota; bosques tropicales estacionalmente secos en la isla de Maracá (RR, Brasil) por Marcelo Trindade Nascimento; sabana en Barcelos (AM, Brasil) por Bernardo M. Flores; bosque abierto degradado en Fazenda Tanguro (MT, Brasil) por Paulo Brando; bosque secundario degradado de dosel cerrado en Tefé (AM, Brasil) por Catarina Jakovac.

La capacidad de los bosques secundarios para recuperarse completamente depende de los impactos de las actividades aplicadas antes del abandono, así como del contexto del paisaje³⁶. El uso del fuego para limpiar pastizales y fertilizar campos de cultivo reduce la fertilidad del suelo y, en consecuencia, los índices de recuperación de los bosques³⁶⁻³⁸. La fragmentación de los bosques y la caza excesiva reducen la dispersión de las semillas, lo que disminuye aún más el reclutamiento de árboles³⁹.

(iii) *Estado de sabana nativa* A menudo se asume que el bosque Amazónico pasará a un estado similar al de sabana una vez que haya superado los puntos de inflexión mencionados^{10,11,20,22,40}. Sin embargo, no se disponen de pruebas de tales cambios a escala local, sobre todo porque los bosques perturbados suelen estar invadidos por gramíneas exóticas⁴¹. Sin embargo, pruebas recientes revelan que esto ya está

ocurriendo en zonas remotas de la cuenca, lejos de la frontera agrícola, donde los bosques de las llanuras de inundación están siendo sustituidos por sabanas de arenas blancas tras reiterados incendios forestales⁴² (Figura 24.2). Estos cambios locales se están produciendo de forma abrupta, en un plazo de 40 años, probablemente acelerados por la erosión relacionada con las inundaciones, que altera las interacciones entre las plantas y el suelo y favorece las especies de la sabana.

(iv) *Bosque tropical estacionalmente seco con dosel tipo cerrado* Teniendo en cuenta las tendencias observadas hacia un clima más seco en algunas partes de la Amazonía (Capítulo 22), existe la posibilidad de que los bosques sobre suelos más ricos en nutrientes pasen a un estado de dosel cerrado que se asemeje, en términos de estructura y funcionamiento, a un bos-

que tropical estacionalmente seco (BTES)^{18,43}, dominado por árboles caducifolios de crecimiento rápido con una mayor tolerancia a las condiciones de sequía y una mayor demanda de nutrientes. Un cambio a un bosque semi caducifolio probablemente no seguiría una dinámica no lineal catastrófica, ni los puntos de inflexión asociados, debido a la larga distancia que deben recorrer las especies para migrar desde las regiones BTES⁴⁴.

Evidencias de la dinámica de los ecosistemas Amazónicos desde el Último Máximo Glacial (20 ka)

Pruebas paleoecológicas revelan dos procesos importantes para entender dinámicas futuras. En primer lugar, los bosques han experimentado cambios locales y regionales hacia bosques secundarios secos o sabanas⁴⁵, especialmente en las partes periféricas de la cuenca. Sin embargo, no han experimentado un retroceso abrupto en toda la cuenca, ni siquiera durante periodos significativamente más cálidos y secos que podrían ser análogos a los hipotéticos puntos de inflexión relacionados con el clima (los numerados 1-4 más arriba). En segundo lugar, la capacidad de recuperación de los bosques depende de su historial de perturbaciones; cuanto más adaptado esté el bosque a las perturbaciones, más rápido será su ritmo de recuperación. Sin embargo, hay que tener en cuenta algunas advertencias a la hora de utilizar datos paleoecológicos como referencia para dinámicas futuras: (i) las velocidades y las magnitudes de los cambios climáticos proyectados, combinados con eventos de perturbación que actúan de forma sincronizada, no tienen precedentes y pueden dificultar la recuperación de los bosques; (ii) las condiciones de referencia no son análogas a los impulsores ecofisiológicos, como el aumento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ del siglo XXI; y (iii) los datos ecológicos a largo plazo siguen siendo limitados en la cuenca y se concentran principalmente en los márgenes de la Amazonía; por lo tanto, es necesario trabajar más para desentrañar la dinámica de estos ecosistemas tan heterogéneos⁴⁶.

Impulsores resiliencia de los bosques Amazónicos

A pesar de las incertidumbres, los resultados actuales sugieren que, en ausencia de deforestación y degradación, por ejemplo debido a incendios forestales, los bosques Amazónicos pueden cambiar tanto en su composición como en su funcionalidad en respuesta a los cambios climáticos, pero seguirían siendo bosques de dosel cerrado. Además, si se superan los puntos de inflexión relacionados con el clima (los numerados 2-4 arriba), los cambios podrían ser escasos y locales debido a la gran heterogeneidad y diversidad de los tipos de bosque. El aumento de la mortalidad de los árboles a causa de perturbaciones de origen humano, y que se mantiene por el aumento de la vulnerabilidad de los bosques degradados a nuevas perturbaciones, puede conducir a una mayor desestabilización del bosque Amazónico⁴⁷, aumentando la probabilidad de que los bosques queden atrapados en un estado de degradación de dosel abierto a mayor escala, y que el sistema en su conjunto cruce el punto de inflexión (5).

Incertidumbres asociadas a los puntos de inflexión en el sistema Amazónico

¿Cómo afecta la heterogeneidad de los bosques a los puntos de inflexión a gran escala? En general, se estima que la diversidad de especies aumenta la resiliencia de los ecosistemas Amazónicos. En primer lugar, porque la diversidad tiene un impacto positivo en la productividad de los bosques⁴⁸ y en el almacenamiento de carbono⁴⁹, acelerando potencialmente el rebrote tras las perturbaciones. En segundo lugar, en la medida en que el número de especies se relaciona con el número de estrategias y respuestas potenciales a las perturbaciones, la diversidad aumenta la resiliencia del bosque en general⁵⁰⁻⁵².

Asimismo, una precipitación media anual más elevada (por encima de los 2.500 mm/año) aumenta la

resiliencia de los bosques^{10,11}, mientras que los bosques expuestos a una estacionalidad media y variabilidad interanual más elevadas parecen ser más tolerantes a la sequía, compensando una menor resiliencia⁵³. No obstante, los puntos de inflexión (los citados con los números 2 y 3) implican que en los bosques donde el clima ya es más seco, el aumento de la estacionalidad de las precipitaciones podría provocar una mayor pérdida de bosques. El aumento de la frecuencia de las sequías extremas, junto con los incendios forestales, también podría impedir la recuperación de los bosques^{54,55}.

Las llanuras aluviales de la Amazonía, que cubren el 14% de la cuenca, demostraron ser menos resilientes que los bosques de las zonas altas, con un punto de inflexión potencial de colapso de los bosques en aproximadamente 1.500 mm/año de precipitaciones⁵⁶.

¿Cómo afecta la conectividad de los bosques a los puntos de inflexión a gran escala? En teoría, la conectividad puede aumentar la resiliencia sistémica de los bosques, ya que las interacciones espaciales facilitan la recuperación de los lugares perturbados. Por ejemplo, las conexiones climáticas, hidrológicas y biogeoquímicas entre los Andes y las tierras bajas de la Amazonía son, sin duda, factores clave para determinar el funcionamiento del sistema actual y futuro a gran escala (capítulo 22)⁵⁷. Sin embargo, a medida que las condiciones cambian y los regímenes de perturbación se intensifican, aumentando la fragmentación del paisaje y los incendios forestales, las perturbaciones pueden llegar a ser contagiosas, provocando un colapso sistémico⁵⁸. Por lo tanto, la gestión de los diversos procesos que conectan las distintas partes de la Amazonía es fundamental para mejorar su resiliencia.

La interacción entre el efecto de fertilización por CO₂ y la disponibilidad de nutrientes Otras dos incógnitas se relacionan con los posibles efectos fisiológicos en las

plantas por el aumento del CO₂ atmosférico ("el efecto de fertilización del CO₂") y las hipotéticas limitaciones a la productividad forestal y a la acumulación de biomasa impuestas por las restricciones de nutrientes del suelo. Por un lado, el efecto de fertilización del CO₂ podría, en teoría, aumentar la productividad forestal, las tasas de acumulación de biomasa⁵⁹ y la eficiencia en el uso del agua⁶⁰. Por otro lado, la falta de disponibilidad de nutrientes clave para el metabolismo de las plantas reduce el incremento de biomasa en condiciones de CO₂ elevado⁶¹. Estas interacciones deben estudiarse más a fondo en bosques de gran diversidad. El CO₂ elevado también tiene el potencial de interferir con los flujos de humedad de los árboles a la atmósfera.

Si no se mejora la productividad y se reduce la transpiración del dosel forestal debido al aumento del CO₂ atmosférico, se cree que el bosque Amazónico y sus composiciones comunitarias y relaciones funcionales actuales serán menos resilientes a los cambios climáticos, la deforestación, la degradación y otras perturbaciones antropogénicas. Esta degradación a largo plazo puede tener impactos socioeconómicos regionales generalizados⁶².

Crear modelos para la resiliencia y los puntos de inflexión de la Amazonía Representar y evaluar la probabilidad y los mecanismos de un punto de inflexión en la Amazonía requiere de una mayor integración de modelos, datos y experimentos de campo. Los datos de campo muestran que la dinámica de la comunidad desempeña un papel clave en el impacto del cambio climático y los extremos climáticos en la Amazonía^{6,63,64}. Por lo tanto, una de las prioridades a la hora de elaborar modelos es mejorar la representación de estas dinámicas de reclutamiento y mortalidad y sus causas. Otros procesos, como el papel de la hidráulica de las plantas⁶⁵ y el aumento de la diversidad funcional de las plantas^{51,66}, así como las heterogeneidades a gran escala relacionadas con el

clima, la hidrología y la química del suelo, deberían explorarse con mayor profundidad.

El potencial efecto de fertilización del CO₂ sobre la fotosíntesis y el uso del agua, así como las posibles limitaciones de la productividad forestal por los nutrientes del suelo, representan una brecha casi completa en los modelos existentes sobre la vegetación forestal Amazónica. Reducir las incertidumbres de las proyecciones pluviométricas de la región también sería fundamental para mejorar los estudios sobre el punto de inflexión de la Amazonía.

Crear modelos para la resiliencia y los puntos de inflexión de la Amazonía Representar y evaluar la probabilidad y los mecanismos de un punto de inflexión en la Amazonía requiere de una mayor integración de modelos, datos y experimentos de campo. Los datos de campo muestran que la dinámica de la comunidad desempeña un papel clave en el impacto del cambio climático y los extremos climáticos en la Amazonía^{6,63,64}. Por lo tanto, una de las prioridades a la hora de elaborar modelos es mejorar la representación de estas dinámicas de reclutamiento y mortalidad y sus causas. Otros procesos, como el papel de la hidráulica de las plantas⁶⁵ y el aumento de la diversidad funcional de las plantas^{51,66}, así como las heterogeneidades a gran escala relacionadas con el clima, la hidrología y la química del suelo, deberían explorarse con mayor profundidad.

El potencial efecto de fertilización del CO₂ sobre la fotosíntesis y el uso del agua, así como las posibles limitaciones de la productividad forestal por los nutrientes del suelo, representan una brecha casi completa en los modelos existentes sobre la vegetación forestal amazónica. Reducir las incertidumbres de las proyecciones pluviométricas de la región también sería fundamental para mejorar los estudios sobre el punto de inflexión de la Amazonía.

Conclusiones Debido a la nueva retroalimentación asociada a las plantas invasoras y a los paisajes modificados por la actividad humana, consideramos que es más probable que el estado degradado abierto y el estado de bosque secundario de dosel cerrado se produzcan en amplias zonas, especialmente a lo largo del "arco de deforestación". Sin embargo, nuevas evidencias indican que en partes remotas de la cuenca del Amazonas, lejos de la frontera agrícola, el estado de sabana nativa podría estar sustituyendo a los bosques estacionalmente inundados perturbados por los incendios forestales. Las características ecológicas, incluyendo el crecimiento diferencial, el reclutamiento y la supervivencia entre las especies Amazónicas, son clave para promover la resistencia de los bosques a las perturbaciones, así como su posterior recuperación, a escala local. La falta de información ecológica sobre muchas especies Amazónicas, la incertidumbre sobre las posibles retroalimentaciones y la necesidad de seguir mejorando las proyecciones sobre el cambio climático dificultan el desarrollo de modelos sólidos que anticipen los posibles cambios que podrían sufrir los bosques Amazónicos en un futuro próximo, ya sea de forma gradual o abrupta. Incluso con modelos en los que no se alcanza un punto de inflexión, y teniendo en cuenta la incertidumbre debido a los datos disponibles limitados, es fundamental proteger, mantener y gestionar de forma sostenible la resiliencia de los bosques Amazónicos.

Referencias

1. Cochrane, M. A. *et al.* Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. *Science* (80-.). **284**, 1832–5 (1999).
2. Aragão, L. E. O. C. *et al.* Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophys. Res. Lett.* **34**, (2007).
3. Aragão, L. E. O. C. *et al.* Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* **363**, 1779–85 (2008).
4. Phillips, O. L. *et al.* Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science* (80-.). **323**, 1344–1347 (2009).

5. Brando, P. M. *et al.* Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **111**, 6347–6352 (2014).
6. Esquivel-Muelbert, A. *et al.* Tree mode of death and mortality risk factors across Amazon forests. *Nat. Commun.* **11**, (2020).
7. Staal, A. *et al.* Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environ. Res. Lett.* **15**, 44024 (2020).
8. Sullivan, M. J. P. *et al.* Long-term thermal sensitivity of earth's tropical forests. *Science (80-.)*. **368**, 869–874 (2020).
9. Esteban, E. J. L., Castilho, C. V., Melgaço, K. L. & Costa, F. R. C. The other side of droughts: wet extremes and topography as buffers of negative drought effects in an Amazonian forest. *New Phytol.* **229**, 1995–2006 (2021).
10. Hirota, M., Holmgren, M., Van Nes, E. H. & Scheffer, M. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. *Science (80-.)*. **334**, 232–235 (2011).
11. Staver, A. C., Archibald, S. & Levin, S. A. The global extent and determinants of savanna and forest as alternative biome states. *Science (80-.)*. **334**, 230–2 (2011).
12. Funk, C. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data* **2**, 150066 (2015).
13. MAPBIOMAS. Mapbiomas Amazonia. *Annual maps of land cover, land use and land use changes between 1985 to 2018 in the Pan-Amazon*. <https://Amazonia.mapbiomas.org/en> (2020).
14. RAISG. Amazonian Network of Georeferenced Socio-Environmental Information. <https://www.Amazoniasocioambiental.org/en/> (2020).
15. 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://knbn.ecoinformatics.org/view/doi%3A10.5063%2FF1BG2KX8#snapp_computing.6.1 (2016).
16. Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. & Lister, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data* **7**, (2020).
17. Sellar, A. A. *et al.* UKESM1: Description and Evaluation of the U.K. Earth System Model. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **11**, (2019).
18. Malhi, Y. *et al.* Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **106**, 20610–5 (2009).
19. Zelazowski, P., Malhi, Y., Huntingford, C., Sitch, S. & Fisher, J. B. Changes in the potential distribution of humid tropical forests on a warmer planet. in *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* vol. 369 (2011).
20. Jones, C., Lowe, J., Liddicoat, S. & Betts, R. Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nat. Geosci.* **2**, 484–487 (2009).
21. Nobre, C. A. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **113**, (2016).
22. Lovejoy, T. E. & Nobre, C. Amazon tipping point: Last chance for action. *Sci. Adv.* **5**, eaba2949 (2019).
23. Cochrane, M. A. & Schulze, M. D. Fire as a Recurrent Event in Tropical Forests of the Eastern Amazon: Effects on Forest Structure, Biomass, and Species Composition. *Biotropica* **31**, 2–16 (1999).
24. Barlow, J. & Peres, C. a. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. *Philos. Trans. R. Soc. London B* **363**, 1787–94 (2008).
25. Balch, J. K. *et al.* Size, species, and fire behavior predict tree and liana mortality from experimental burns in the Brazilian Amazon. *For. Ecol. Manage.* **261**, 68–77 (2011).
26. Brando, P. M. *et al.* Fire-induced tree mortality in a neotropical forest: the roles of bark traits, tree size, wood density and fire behavior. *Glob. Chang. Biol.* **18**, 630–641 (2012).
27. Staver, A. C. *et al.* Thinner bark increases sensitivity of wetter Amazonian tropical forests to fire. *Ecol. Lett.* **23**, 99–106 (2020).
28. Silvério, D. V. *et al.* Testing the Amazon savannization hypothesis: fire effects on invasion of a neotropical forest by native cerrado and exotic pasture grasses. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **368**, 20120427 (2013).
29. Longo, M. *et al.* Impacts of Degradation on Water, Energy, and Carbon Cycling of the Amazon Tropical Forests. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* **125**, (2020).
30. Flores, B. M., Fagoaga, R., Nelson, B. W. & Holmgren, M. Repeated fires trap Amazonian blackwater floodplains in an open vegetation state. *J. Appl. Ecol.* **53**, 1597–1603 (2016).
31. Xu, X., Jia, G., Zhang, X., Riley, W. J. & Xue, Y. Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. *Glob. Chang. Biol.* **26**, 5874–5885 (2020).
32. Zeppetello, L. R. V. *et al.* Large scale tropical deforestation drives extreme warming. *Environ. Res. Lett.* **15**, (2020).
33. Poorter, L. *et al.* Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature* **530**, 211–214 (2016).
34. Rozendaal, D. M. A. *et al.* Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. *Sci. Adv.* **5**, eaau3114 (2019).
35. Wang, Y. *et al.* Upturn in secondary forest clearing buffers primary forest loss in the Brazilian Amazon. *Nat. Sustain.* **3**, 290–295 (2020).
36. Jakovac, C. C. *et al.* The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for the restoration of tropical forests. *Biol. Rev.* brv.12694 (2021).
37. Zarin, D. J. *et al.* Legacy of fire slows carbon accumulation in Amazonian forest regrowth. *Front. Ecol. Environ.* **3**, 365–369 (2005).
38. Heinrich, V. H. A. *et al.* Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. *Nat. Commun.* **12**, 1785 (2021).
39. Arroyo-Rodríguez, V. *et al.* Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: new insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research. *Biol. Rev.* **92**, 326–340 (2015).

40. Cox, P. M. *et al.* Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theor. Appl. Climatol.* **78**, 137–156 (2004).
41. Veldman, J. W. Clarifying the confusion: old-growth savannahs and tropical ecosystem degradation. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **371**, 20150306 (2016).
42. Flores, B. M. & Holmgren, M. White-Sand Savannas Expand at the Core of the Amazon After Forest Wildfires. *Ecosystems* (2021).
43. Dexter, K. G. *et al.* Inserting Tropical Dry Forests Into the Discussion on Biome Transitions in the Tropics. *Front. Ecol. Evol.* **6**, 1–7 (2018).
44. Silva de Miranda, P. L. *et al.* Using tree species inventories to map biomes and assess their climatic overlaps in lowland tropical South America. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **27**, 899–912 (2018).
45. Montoya, E., Rull, V. & Nogué, S. Early human occupation and land use changes near the boundary of the Orinoco and the Amazon basins (SE Venezuela): Palynological evidence from El Pauji record. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **310**, 413–426 (2011).
46. Lombardo, U., McMichael, C. & Kazuo Tamanaha, E. Mapping pre-Columbian land use in Amazonia. *Past Glob. Chang. Mag.* **26**, 14–15 (2018).
47. 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).
48. Coelho de Souza, F. *et al.* Evolutionary diversity is associated with wood productivity in Amazonian forests. *Nat. Ecol. Evol.* **3**, 1754–1761 (2019).
49. Poorter, L. *et al.* Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **24**, 1314–1328 (2015).
50. Elmqvist, T. *et al.* Response diversity, ecosystem change, and resilience. *Front. Ecol. Environ.* **1**, 488–494 (2003).
51. Sakschewski, B. *et al.* Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. *Nat. Clim. Chang.* **6**, 1032–1036 (2016).
52. Anderegg, W. R. L. *et al.* Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought. *Nature* **561**, 538–541 (2018).
53. Ciemer, C. *et al.* Higher resilience to climatic disturbances in tropical vegetation exposed to more variable rainfall. *Nat. Geosci.* **12**, 174–179 (2019).
54. Longo, M. *et al.* Ecosystem heterogeneity and diversity mitigate Amazon forest resilience to frequent extreme droughts. *New Phytol.* **219**, 914–931 (2018).
55. Anderson, L. O. *et al.* Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **373**, (2018).
56. Flores, B. M. *et al.* Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **114**, (2017).
57. Builes-Jaramillo, A. & Poveda, G. Conjoint Analysis of Surface and Atmospheric Water Balances in the Andes-Amazon System. *Water Resour. Res.* **54**, 3472–3489 (2018).
58. Scheffer, M. *et al.* Anticipating critical transitions. *Science (80-.)*. **338**, 344–348 (2012).
59. Ainsworth, E. A. & Long, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytol.* **165**, 351–372 (2005).
60. Kauwe, M. G. *et al.* Forest water use and water use efficiency at elevated CO₂: A model-data intercomparison at two contrasting temperate forest FACE sites. *Glob. Chang. Biol.* **19**, 1759–1779 (2013).
61. Norby, R. J., Warren, J. M., Iversen, C. M., Medlyn, B. E. & McMurtrie, R. E. CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **107**, 19368–19373 (2010).
62. Lapola, D. M. Bytes and boots to understand the future of the Amazon forest. *New Phytol.* **219**, 845–847 (2018).
63. Esquivel-Muelbert, A. *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. *Glob. Chang. Biol.* **25**, (2019).
64. Hubau, W. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* **579**, 80–87 (2020).
65. Eller, C. B. *et al.* Modelling tropical forest responses to drought and El Niño with a stomatal optimization model based on xylem hydraulics. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* **373**, 20170315 (2018).
66. Scheiter, S., Langan, L. & Higgins, S. I. Next-generation dynamic global vegetation models: Learning from community ecology. *New Phytol.* **198**, 957–969 (2013).