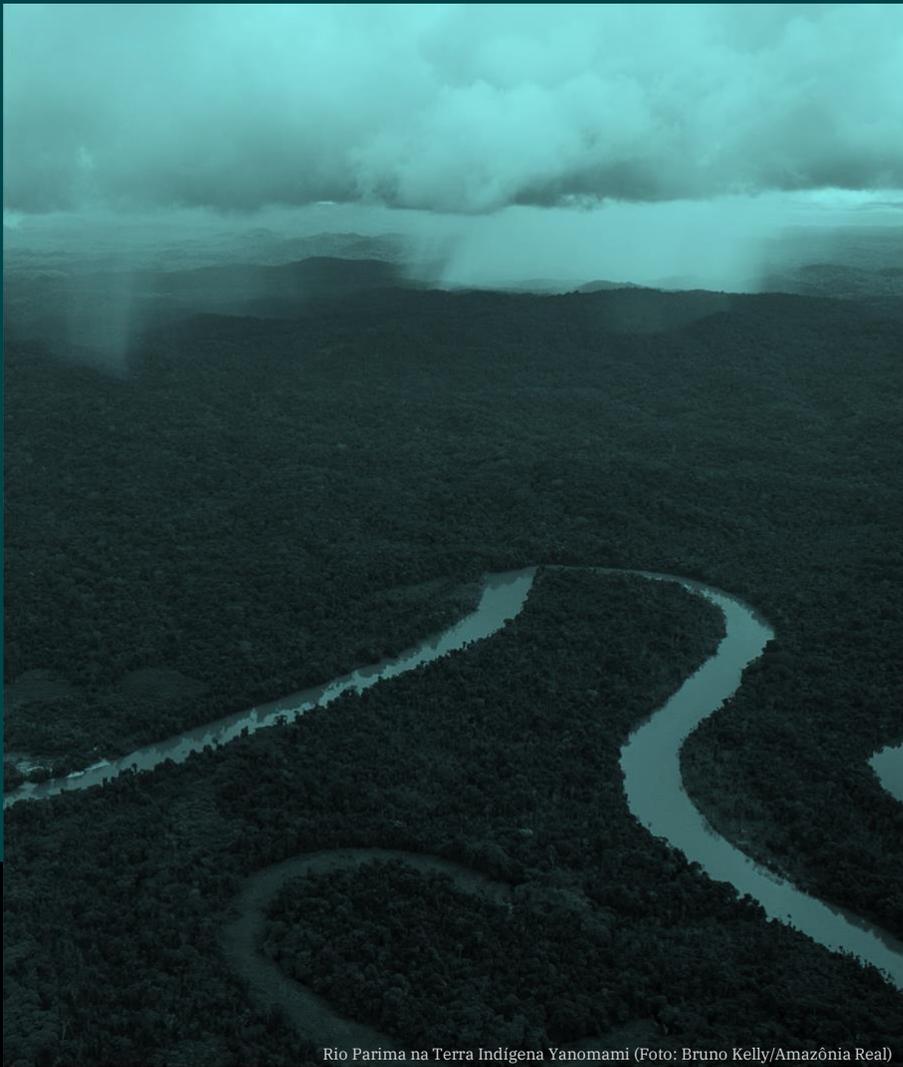


Capítulo 7 En Resumen

Ciclos biogeofísicos: Reciclaje del agua y regulación del clima



Río Parima na Terra Indígena Yanomami (Foto: Bruno Kelly/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Ciclos biogeofísicos: Reciclaje del agua y regulación del clima

Marcos H. Costa^a, Laura Borma^b, Paulo M. Brando^c, José A. Marengo^d, Scott R. Saleska^e, Luciana V. Gatti^b

Mensajes clave y recomendaciones

- 1) La selva amazónica puede reciclar grandes cantidades de vapor de agua del suelo a la atmósfera mediante la evapotranspiración (ET). El índice de reciclaje medio de la cuenca amazónica varía entre 24% y 35%, con un valor medio de 28%.
- 2) El centro y el noroeste del Amazonas exportan humedad a los Andes a través de ríos atmosféricos que suministran agua a los glaciares tropicales, páramos y ciudades. La parte suroeste de la cuenca amazónica es una importante fuente de humedad durante todo el año para la cuenca de La Plata, debido a la humedad transportada a través de la corriente en chorro de bajo nivel de América del Sur.
- 3) La cantidad y el intervalo de las precipitaciones están regulados por la cantidad de cobertura forestal, y la pérdida o el aumento de los bosques conlleva una reducción o un aumento de las precipitaciones, respectivamente. Si se sustituye la selva tropical por otro uso del suelo, la Amazonía experimentaría un clima más cálido y la tasa de ET cambiaría, especialmente durante la estación seca, afectando a los volúmenes de precipitación y disminuyendo la duración de la estación de lluvias, que conlleva a la degradación de los bosques, la inflamabilidad de los mismos y el rendimiento de los cultivos regionales.
- 4) Los cambios más importantes en el sistema hidroclimático se producen en la transición entre la estación seca y la lluviosa, con un alargamiento de la estación seca, que tiene importantes consecuencias ecológicas e hidrológicas. Futuros

estudios deberían centrarse en estas estaciones concretas.

- 5) Muy pocos (o ninguno) de los nuevos avances en materia de estudios del efecto de borde y degradación de los bosques se han incluido en los Modelos del Sistema Terrestre (ESM). La proyección del futuro de los bosques del Amazonas requiere una mejor una mejor representación del efecto de borde forestal en los ESM.

Resumen Este capítulo evalúa las interacciones biogeofísicas entre la selva amazónica y su clima e hidrología. Se presenta una perspectiva histórica, destacando los avances que mejoraron nuestra comprensión de los mecanismos por los que la selva tropical interactúa con la atmósfera.

Introducción La selva tropical interactúa con la atmósfera de varias maneras, afectando al clima local, continental y global. Un proceso importante es el reciclaje del agua. Siguiendo el proceso del ciclo del agua, los vientos cercanos a la superficie del océano traen la humedad del océano Atlántico tropical al Amazonas (Figura 7.1). Parte de esta humedad cae en forma de lluvia, y una parte de la lluvia caída puede volver rápidamente a la atmósfera a través de la ET. Una parte de este vapor de agua retornará en forma de lluvia sobre la selva, y otra se desplazará a las regiones vecinas. Esta inyección de vapor de agua no presenta una variabilidad estacional o interanual significativa, lo que puede explicarse por varios rasgos y procesos asociados a la selva tropical

^a Dpto. de Ingeniería Agrícola, Universidad Federal de Viçosa (UFV), Av. Peter Henry Rolfs s/n, Campus Universitário, Viçosa MG 36570-900, Brasil, mhcosta@ufv.br

^b Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE), Av. dos Astronautas 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos SP 12227-010, Brasil

^c Instituto de Investigación Ambiental de la Amazonía (IPAM), Asa Norte CLN 211 BL B Sala 201, Asa Norte, Brasília DF 70863-520, Brasil; University of California Irvine, Irvine CA 92697-1075, EE. UU.

^d Centro Nacional de Monitoreo y Alerta de Desastres Naturales (CEMADEN), Estrada Dr. Altino Bondensan 500, Eugênio de Melo, São José dos Campos SP 12247-016, Brasil

^e Dept. of Ecology and Evolutionary Ecology, University of Arizona, PO Box 210088, Tucson AZ 85721-0088, EE. UU.

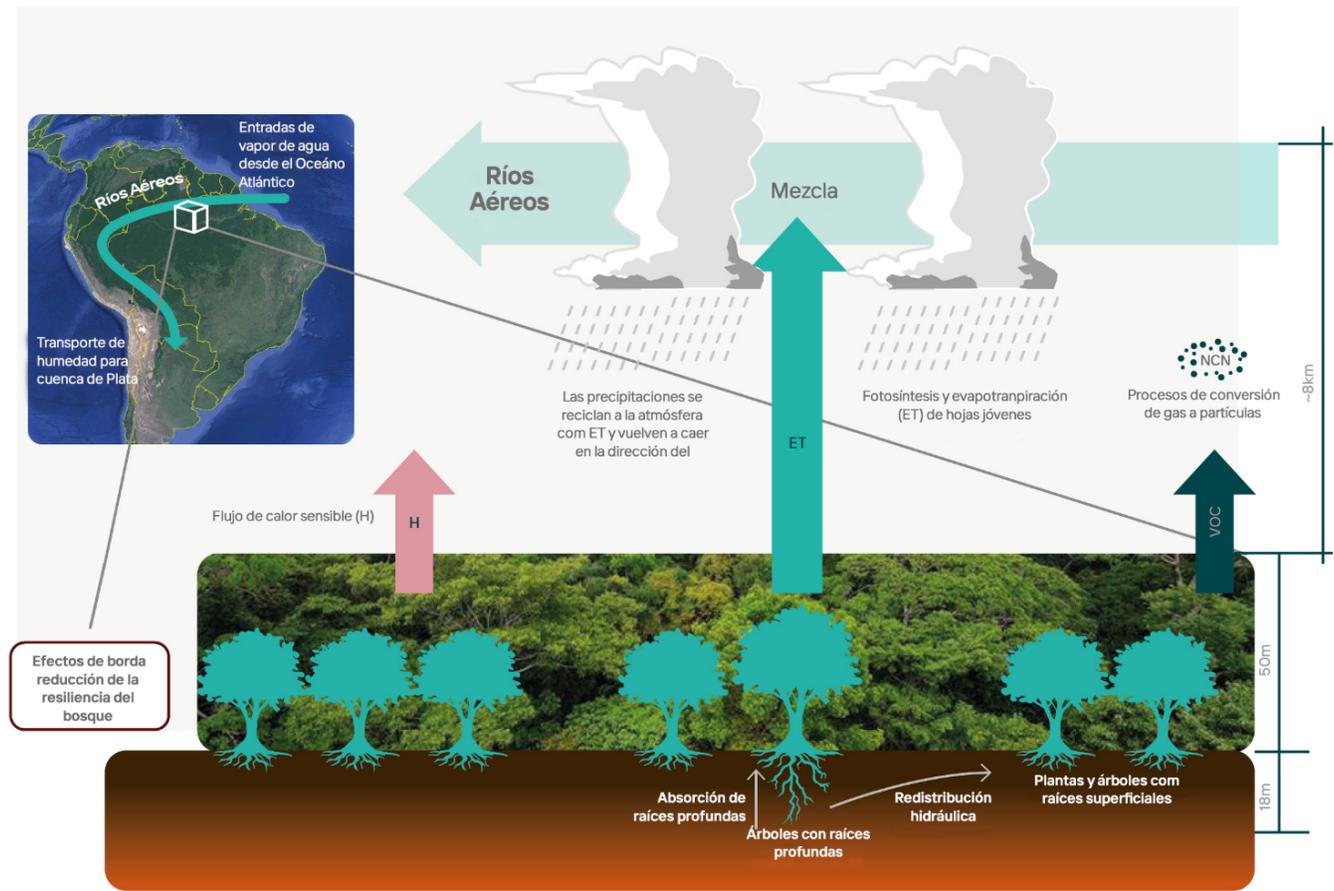


Figura 7.1 Diagrama de los principales procesos biogeofísicos de las interacciones biosfera-atmósfera en la Amazonía, a diferentes escalas. Los sistemas de raíces profundas, la redistribución hidráulica y la fotosíntesis de hojas jóvenes mantienen altas tasas de ET que liberan vapor de agua a la atmósfera; luego se recicla en forma de lluvia. Los bosques emiten compuestos orgánicos volátiles (COV) que se convierten en Núcleos de Condensación de Nubes (NCN) que favorecen la formación de gotas de lluvia. La Amazonía es también una importante fuente de humedad para varias regiones de Sudamérica, especialmente la cuenca del río de la Plata y zonas adyacentes.

El papel de los bosques en el reciclaje del agua El reciclaje del agua es el proceso por el cual la ET en un lugar del continente contribuye a la precipitación en otro lugar del continente¹. La proporción de reciclado (ρ) es la relación entre la precipitación de origen continental y la precipitación total. Depende de varias condiciones, como la escala, la relación entre la ET local y otras fuentes de vapor de agua, y la extensión de la región respecto a la dirección del viento. Una región extensa, como la Amazonía, tiende a tener una proporción de reciclado alta, pero el reciclado regional es más complejo². La proporción media de reciclado de la cuenca amazónica varía entre el 24% y el 35%, con un valor

medio del 28%, es decir, aproximadamente la mitad de lo que se estimaba en las décadas de 1970 y 1980. Van der Ent *et al.* (2010)³ y Zemp *et al.* (2014)¹ muestran que ρ es cercano a cero próximo a la desembocadura del río Amazonas, donde la humedad del océano entra en la Amazonía, hasta >50% al acercarse a los Andes (Figura 7.2). El levantamiento mecánico de las montañas y la forma cóncava de los Andes inducen una convergencia de bajo nivel a lo largo de varios cientos de kilómetros antes de los Andes, facilitando altas tasas de precipitación y dificultando que la humedad cruce los Andes y salga de la cuenca.

El reciclaje también es mayor durante la estación seca que durante la estación húmeda. Durante la estación seca, la entrada de humedad del océano disminuye, y el flujo continuo de agua de la selva tropical aumenta la importancia de esta fuente a nivel local. En la mayor parte de la Amazonía, la ET no está controlada por la disponibilidad de humedad del suelo, sino por la disponibilidad de energía para evaporar el agua, de ahí la baja variabilidad estacional. Esto se debe a que los árboles amazónicos tienen acceso al agua almacenada en las profundidades del suelo y, en consecuencia, no sufren mucho estrés hídrico. La dinámica estacional más compleja de la ET de bosques de altura con humedad limitada al sur de la Amazonía indica una regulación conjunta por factores ambientales (por ejemplo, radiación neta, déficit de presión de vapor) y biológicos

(conductancia del dosel forestal) en estos bosques⁴⁻⁶.

La estabilidad de la ET local también está asociada a la variabilidad de ρ en escalas temporales interanuales y decenales. Costa y Foley (1999)⁷ encontraron un debilitamiento de los vientos alisios que transportan vapor de agua desde el Atlántico tropical a la cuenca del Amazonas durante 1976-1996, lo que provocó una disminución de la entrada de vapor de agua en la cuenca amazónica. En este caso, en el que la principal fuente de vapor de agua a la cuenca ha disminuido unos 720 mm año^{-1} en 20 años (de 3430 mm a^{-1} en 1976-77 a 2710 mm a^{-1} en 1995-96, es decir, 36 mm a^{-1}), la Cuenca Amazónica mantuvo precipitaciones y escorrentías constantes aumentando la contribución relativa del vapor de agua de fuente local (ET regional) del 28% en 1976-77 al 33% en 1995-96.

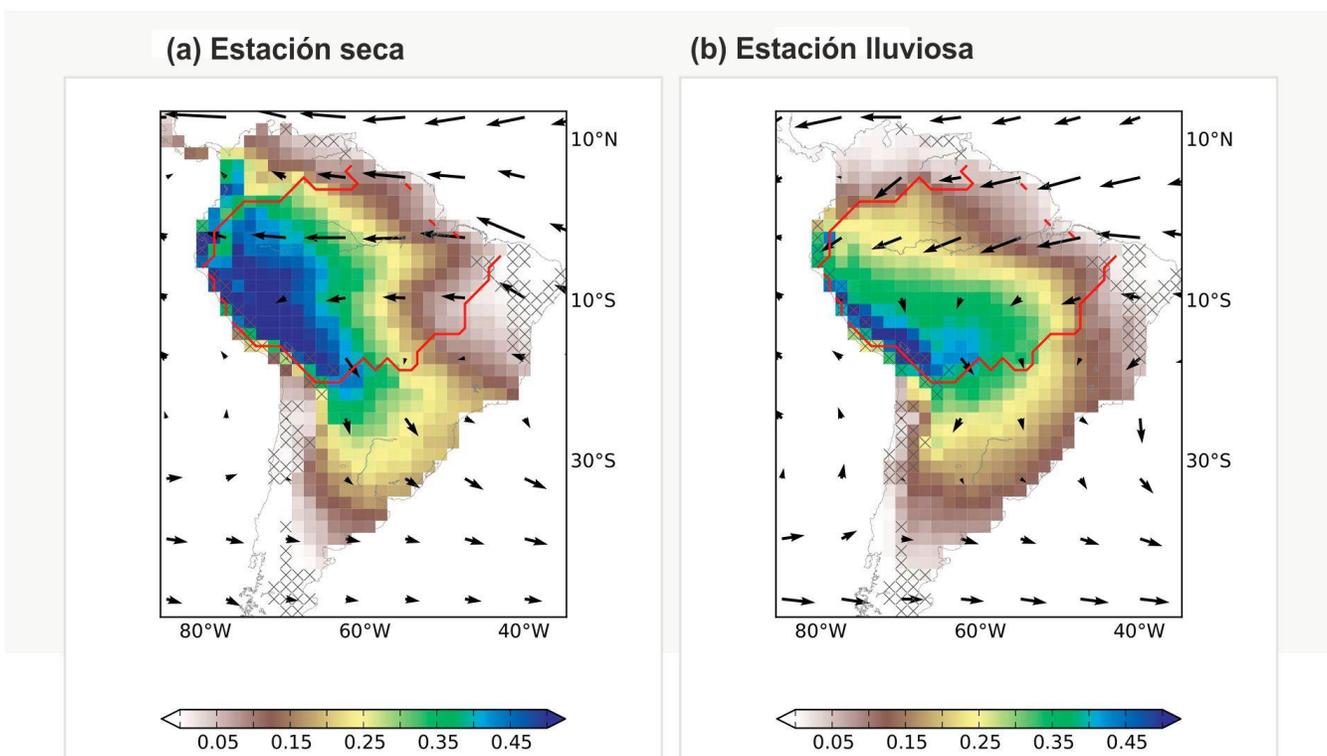


Figura 7.2 Fracción de precipitaciones originadas dentro de la cuenca amazónica (contorno en rojo), utilizando los datos de evapotranspiración del MOD16 y los datos de precipitación del TRMM para el período 2001-2010, y los cálculos directos de reciclaje de la humedad. (a) Estación seca (Junio-Septiembre), (b) Estación lluviosa (Diciembre-Marzo). Extraído de la Figura 8 de Zemp *et al.* (2014)¹.

Captación de humedad del suelo profundo por parte de los árboles Varios estudios han propuesto diferentes mecanismos para explicar la tolerancia a la sequía (estacional o extrema) de la selva amazónica. Estos mecanismos incluyen la absorción de agua por parte de las raíces profundas, ascensos hidráulicos de plantas y regeneración de hojas en la estación seca. Raíces finas muy profundas (> 6 m), aunque poco frecuentes, se han encontrado en algunos sitios de la Amazonía oriental⁸ y central^{9,10}. En la Amazonía oriental, donde las precipitaciones son más estacionales, Nepstad *et al.* (1994)⁸ encontraron raíces que alcanzaban los 18 m. La existencia de estas raíces, junto con el bajo nivel de agua disponible para las plantas en las capas superiores del suelo (< 1 m), permite entender el papel de las raíces profundas como la principal estrategia de las plantas para hacer frente a las sequías estacionales y, potencialmente, a las sequías severas^{8,11-13}. Sin embargo, a pesar de la aparición documentada de raíces profundas, se reconoce que, en la Amazonía, las raíces superficiales (< 1 m) son mucho más abundantes^{8,9}. Aunque las raíces profundas tienen una baja densidad, las investigaciones realizadas por Hodnett *et al.* (1995)¹² cerca de Manaus han demostrado que, en muchos años, es imposible ajustar el balance hídrico de la estación seca de la selva amazónica sin utilizar el agua almacenada a profundidades superiores a 2 m. La capa de 250-550 cm contribuyó con ~20% de la demanda de agua, mientras que las capas más profundas (550-1150 cm) contribuyeron con ~10%.

Otros estudios han sugerido la existencia de mecanismos para transportar el agua desde las capas profundas del suelo a las más superficiales, ya sea a través del sistema de raíces, es decir, la ascensión hidráulica de la planta^{14,15}, o a través del mecanismo de ascenso capilar en suelos de textura fina^{16,17}. Algunos han sugerido un tercer mecanismo, la partición del nicho de la raíz^{18,19}, por el cual las plantas absorben el agua del suelo de diferentes fuentes, como una función de su altura, profundidad de la raíz y atributos hidráulicos de la planta, como la resistencia al embolismo de los vasos del xilema²⁰.

Mecanismos como el desarrollo de raíces profundas, el ascenso hidráulico de las plantas y la regeneración de las hojas en la estación seca sugieren que los bosques amazónicos pueden ser resistentes a las sequías extremas, y que esta trayectoria evolutiva podría haber sido seleccionada en paleoclimas con una fuerte variabilidad interanual. Con estos mecanismos, la selva puede tener acceso a unos 800-3000 mm de agua almacenada en el suelo^{8,21}. Es posible que estos mecanismos no estén disponibles en todos los bosques tropicales; asimismo, desconocemos si la capacidad de echar raíces profundas se limita a unas pocas especies o es compartida por muchas.

El acceso de las raíces al agua del suelo está relacionado con la regulación de la pérdida de agua a través de las hojas. Los estomas de las hojas regulan la ET y facilitan la ET de los bosques en la estación seca²². Christoffersen *et al.* (2014)²³ destacan las importantes y complementarias funciones de las raíces y las hojas en la regulación de la ET.

El papel de los bosques tropicales amazónicos en la producción de su propio hidroclima Las selvas tropicales y los climas cálidos y húmedos están fuertemente conectados, formando un sistema de refuerzo bidireccional. En otras palabras, el clima tropical húmedo permite la existencia de la selva tropical, que, a su vez, ayuda a producir el clima lluvioso que necesita. En una media anual de la Amazonía, alrededor del 72% del vapor de agua que entra en la atmósfera es de origen oceánico, y el 28% se evapora localmente. Además de su papel como fuente de vapor de agua, el bosque tropical perenne tiene otra función en el clima local. Estudios teóricos^{24,25} y de modelización²⁶ demuestran que el bajo albedo del bosque tropical favorece la convección sobre la cuenca, mientras que un aumento del albedo de superficie provoca una anomalía de subsidencia sobre la región. Además, los bosques también emiten compuestos orgánicos volátiles (COV) que se convierten en núcleos de condensación de nubes (NCN) que favorecen la formación de gotas de lluvia (véase el capítulo 6). Dado que el vapor de agua y la convección son los

principales factores que contribuyen a la precipitación, es probable que los bosques tropicales a gran escala tengan cierta capacidad para mantener su propio clima.

El papel del bosque al inicio de la estación lluviosa Una elevada ET durante la estación seca estimula un retorno de la estación húmeda más temprano de lo que cabría esperar²⁷. En concreto, la transpiración de la selva aumenta la convección superficial que humedece y desestabiliza la atmósfera durante las etapas iniciales de la transición de la estación seca a la húmeda, condicionando la atmósfera regional a un rápido aumento de la convección profunda portadora de lluvia. A su vez, este proceso impulsa la convergencia de la humedad y el inicio de la estación húmeda de dos a tres meses antes de la llegada de la convergencia principal tipo monzón sobre la Amazonía. Pruebas recientes que utilizan datos pluviométricos y de precipitación obtenidos por satélites (TRMM-NASA/JAXA) demuestran empíricamente el papel de los bosques tropicales en varias características críticas de la estación lluviosa del sur de la Amazonía. Leite Filho *et al.* (2020)²⁸ han demostrado que la presencia de bosques está asociada a un inicio más temprano y un final más tardío de la estación de lluvias, es decir, a una estación de lluvias más larga. Asimismo, Leite-Filho *et al.* (2019)⁴⁴ han demostrado que una mayor cobertura forestal está asociada a una menor frecuencia de periodos secos en septiembre, octubre, abril y mayo, los meses de transición entre la estación seca y la lluviosa. En otras palabras, en los bosques bien conservados, la temporada de lluvias comienza antes y es menos probable que se vea interrumpida por un largo periodo de sequía en sus primeros días. En cambio, en las zonas muy deforestadas, la temporada de lluvias comienza tarde y es más probable que se vea interrumpida por un largo periodo de sequía.

Los estudios de observación de Spracklen *et al.* (2012)⁴⁵ confirman la dependencia de las precipitaciones sobre la vegetación. Utilizaron datos de teledetección por satélite de las precipitaciones tropicales y del índice de área foliar (IAF), combinados con patrones de transporte

atmosférico simulados, y concluyeron que el aire que ha pasado sobre una vegetación extensa en los 10 días anteriores produce al menos el doble de lluvia que el aire que ha pasado sobre poca vegetación. Esta correlación empírica es coherente con el mantenimiento de la humedad atmosférica por parte de la ET en el aire que pasa por encima de una vegetación extensa.

Estos mecanismos implican una retroalimentación activa y positiva. La cantidad de cubierta forestal regula la cantidad y el periodo de precipitaciones que reciben esos bosques, con lo que la pérdida o el aumento de los bosques conlleva las respectivas reducciones o aumentos de las precipitaciones y los consiguientes impactos en la cubierta forestal.

El papel del bosque como fuente de vapor de agua para otras regiones La región amazónica es una importante fuente de humedad para varias regiones de Sudamérica, como los Andes, proporcionando humedad y precipitaciones a los glaciares, páramos y grandes ciudades³¹, y también a la cuenca del río de La Plata^{1,32-35}. Sobre esta cuenca, y posiblemente sobre las regiones del Pantanal y de los Andes, la Amazonía es el segundo mayor contribuyente continental de precipitaciones medias anuales³⁶, siendo el reciclaje local del agua sobre la cuenca de La Plata la principal fuente. Sobre la región de la cuenca de La Plata, varios autores coinciden en que las áreas continentales son la principal fuente de vapor de agua³⁷. El transporte de vapor de agua ocurre en espacios relativamente estrechos de la atmósfera conocidos como "ríos aéreos". Además, fuentes externas del Pacífico sur y del Atlántico tropical también contribuyen a la precipitación en la cuenca³⁷. Drumond *et al.* (2008)³⁷ destacaron la influencia del océano Atlántico tropical, que varía estacionalmente desde las regiones del norte en los meses del verano austral³⁶.

La parte suroccidental de la cuenca amazónica es una importante fuente directa de humedad entrante sobre la cuenca de La Plata, la Amazonía andina y las regiones del Pantanal durante todo el año. El agua de la Amazonía se exporta fuera de la cuenca, transportada a través del chorro de bajo nivel

sudamericano (SALLJ sigla en inglés) a lo largo de los Andes^{3,32-34,37}. Esta circulación regional en la estación cálida y lluviosa representa un núcleo de fuertes vientos de en niveles bajos del transporte de humedad por los vientos alisios provenientes del Atlántico tropical. Este sistema transporta y distribuye la humedad de toda la cuenca amazónica hacia la cuenca de La Plata y la región amazónica andina, produciendo precipitaciones, así como sobre el Pantanal y las tierras agrícolas del centro-oeste de Brasil. Estudios anteriores analizaron el papel de este chorro de bajo nivel en el transporte de humedad y en eventos de precipitación extrema ocasionales^{35,38,39}. Este sistema también transporta humo y aerosoles procedentes de la quema de biomasa en la Amazonía a las regiones adyacentes, agravando la contaminación atmosférica sobre las ciudades de esas zonas⁴⁰.

Regulación del clima proporcionada por los bosques ¿Por qué los bosques amazónicos son mucho más fríos que los usos del suelo que suelen sustituirlos? Estudios recientes sobre la regulación de la temperatura de la superficie terrestre indican que los bosques amazónicos actúan como un gigantesco aire acondicionado^{41,42}. Esto se debe principalmente a la capacidad de los bosques de transportar grandes cantidades de vapor de agua del suelo a la atmósfera mediante la evapotranspiración⁴³. En comparación con la mayoría de los cultivos de la región, los bosques amazónicos tienen mantiene vegetación boscosa densa con alto estrato arbóreo durante la mayor parte del año, raíces más profundas y una mayor capacidad general de absorber energía solar y devolverla a la atmósfera de forma contundente en forma de calor latente⁵⁸ (Figura 7.1). En combinación con la elevada radiación neta de la superficie y las precipitaciones inherentes a la región, estas características confieren a los bosques una capacidad desproporcionada para enfriar sus hojas. Por ejemplo, la temperatura diurna de la superficie terrestre en las zonas boscosas del sureste de la Amazonía tiende a ser 5°C inferior a la de las zonas deforestadas durante la estación seca, como resultado de la disminución de la ET, en

promedio, en un tercio a medida que los bosques son sustituidos por pastos y tierras de cultivo⁴¹.

La superficie relativamente fría de los bosques amazónicos está relacionada con complejas interacciones entre procesos biológicos, físicos y químicos⁴⁵. La mayor parte de las especies arbóreas amazónicas evitan que la temperatura de las hojas aumente por encima de los niveles críticos, para evitar el sobrecalentamiento y las reducciones en el crecimiento y el almacenamiento de carbono, que influyen en la supervivencia de la planta⁴⁶. Algunos estudios sugieren que la temperatura óptima para la fotosíntesis de las hojas es inferior a 30°C, y que la fotosíntesis de las hojas disminuye bruscamente cuando las temperaturas se elevan por encima de los 35°C⁴⁷, aunque existe un debate sobre si el mecanismo es impulsado por la temperatura o por el déficit de presión de vapor, que también depende de la temperatura⁴⁸. Un reciente estudio de larga duración descubrió que las reservas de carbono de los bosques tropicales de Sudamérica y las ganancias de carbono disminuían significativamente ($P < 0,001$) con la temperatura máxima diaria media en el mes más cálido⁴⁹. Este proceso ayuda a explicar por qué la temperatura media de la superficie de los bosques amazónicos suele estar por debajo de los 30°C⁴⁴. Aunque la ET controla gran parte de la capacidad de regulación de las temperaturas de superficie, el ángulo de las hojas, la pubescencia, el tamaño, la forma, la posición del dosel, el número de hojas por tallo y la estructura del dosel desempeñan un papel determinado⁴⁵.

La ET y las temperaturas de la superficie terrestre parecen ser relativamente constantes en toda la cuenca amazónica. Sin embargo, existe una importante variabilidad espacial y temporal muy precisa en las propiedades del dosel, la ET y la temperatura de la superficie terrestre. El principal proceso ambiental que controla esta variabilidad espacial es la radiación solar⁵⁰. Aunque la radiación potencial de onda corta entrante es alta en toda la región, algunas partes de la Amazonía (por ejemplo, cerca de los Andes) reciben menos radiación debido a condiciones de mayor nubosidad que otras (por

ejemplo, el sureste de la Amazonía). El segundo factor está relacionado con la disponibilidad de agua de los suelos. Cuando hay una estación seca intensa (o en años extremadamente secos como los de El Niño 2015-2016), la baja disponibilidad de agua de los suelos hacia el final de la estación seca puede limitar la ET y causar aumentos de la temperatura de la superficie terrestre relacionados con ella⁵¹. En el Cerrado, la ET de la estación seca puede ser menos de la mitad de la ET de la estación húmeda⁵², con temperaturas de superficie que aumentan proporcionalmente a la disminución de la ET durante la estación seca tardía. De igual manera, cuando la humedad del suelo cae por debajo de los niveles críticos durante los años de sequía, el estrés hídrico de las plantas puede desencadenar reducciones en la conductancia estomática y la ET, lo que resulta en un aumento de las temperaturas de la superficie terrestre⁵³. Por lo tanto, aunque el clima en gran parte de la Amazonía es adecuado para que las plantas mantengan una alta ET y temperaturas frescas asociadas, existen amplios patrones en toda la región.

La temperatura del aire y de la superficie terrestre, aunque con la misma tendencia, a menudo divergen, con variaciones resultantes de las diferencias en los valores de calor específico del aire, suelo y agua, y de las interacciones complejas entre propiedades atmosféricas, humedad del suelo, radiación neta y elevación. En general, las temperaturas del aire y de la superficie terrestre convergen en valores similares durante la noche, pero divergen durante las partes más calurosas del día, cuando las temperaturas de la superficie terrestre suelen superar la temperatura del aire en varios grados⁴⁵. A medida que se van talando grandes extensiones de bosques amazónicos, se espera un aumento importante en las temperaturas de la superficie⁴¹, dado que la deforestación provoca una disminución de la evapotranspiración. Este calentamiento puede ser mayor que los efectos de enfriamiento que la deforestación provoca al aumentar el albedo.

El efecto de borde de los bosques en la temperatura y en la humedad Más del 70% de los

bosques remanentes en el mundo se encuentra a menos de 1 km del borde (límite adyacente), y el 20% está a menos de 100 m del borde⁵⁴. En los paisajes tropicales dominados por las personas, los bordes de los bosques y sus efectos son generalizados^{55,56}. En el sureste de la Amazonía, casi el 14% de los bosques crecen ahora a menos de 100 m de una zona deforestada⁵⁷.

Los bordes de los bosques adyacentes a los campos despejados están sujetos a una degradación forestal prolongada. Estos bordes y parches de bosque están expuestos a condiciones más cálidas, secas y ventosas^{58,59}. Estos efectos de borde degradan los bosques a lo largo del tiempo y tienen importantes repercusiones en la estructura forestal, especialmente porque tienden a aumentar de forma desproporcionada la mortalidad de los árboles con dosel dominante a corto plazo⁶⁰. Los cambios resultantes en el microclima facilitan entonces la sucesión de especies pioneras de madera ligera (baja densidad de madera), de pequeño tamaño y de rápido crecimiento⁶¹, lo que provoca reducciones regionales de las reservas de carbono a largo plazo^{62,63}.

Los bosques tropicales son altamente resilientes a las perturbaciones ocasionales, pero los efectos combinados de la deforestación continua y un clima cambiante hacen que grandes áreas de la selva amazónica corran el riesgo de sufrir una mayor degradación en las próximas décadas⁶⁴, especialmente a lo largo de los bordes de los bosques colindantes con áreas deforestadas y en parches forestales aislados^{65,66}.

La cuantificación de los factores que impulsan la degradación de los bosques en la Amazonía es fundamental para desarrollar, validar y parametrizar Modelos del Sistema Terrestre (ESM) que simulen mecánicamente los cambios en los depósitos y flujos de carbono entre la biosfera y la atmósfera⁶⁷. Los avances en el mapeo de la degradación de los bosques y sus impulsores han permitido mejorar sustancialmente la capacidad de los ESM para proyectar las trayectorias potenciales de los bosques amazónicos. Sin embargo, muy

pocos (o ninguno) de estos nuevos avances han abordado la cuestión de la degradación de los bosques y sus bordes. Por lo tanto, la proyección del futuro de los bosques amazónicos requiere una mejor representación de los efectos del borde del bosque en los ESM.

Conclusiones Los procesos biogeofísicos internos controlan fuertemente el sistema hidrológico y climático de la cuenca del Amazonas. Esto es posible porque la selva tropical ha desarrollado varios mecanismos para acceder al agua almacenada en las capas profundas del suelo y proporcionar la energía necesaria para desencadenar y mantener la convección. Estos mecanismos combinados conducen a un clima más lluvioso en promedio y a una temporada de lluvias más larga. Al mismo tiempo, mantienen la temperatura del aire de la superficie de forma que sea lo suficientemente cálida para la convección, pero sin sobrepasar los límites de las plantas. Estos mecanismos, junto con la temperatura del microclima y el control de la humedad en los bordes del bosque, son características fundamentales del sistema acoplado biosfera-atmósfera en la Amazonía, ayudando a definir el clima de la Amazonía y el de otras partes de Sudamérica. Además, estos mecanismos aseguran la capacidad de este sistema acoplado para soportar la estación seca a lo largo de su frontera sur y proporcionar una fuente constante de vapor de agua a la atmósfera cuando la entrada de vapor de agua desde el Atlántico se debilita.

Referencias

- Zemp, D. C. *et al.* On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 13337–13359 (2014).
- Eltahir, E. A. B. & Bras, R. L. Precipitation recycling. *Rev. Geophys.* 34, 367–378 (1996).
- Van-der Ent, R., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B. & Steele-Dunne, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resour. Res.* 46, (2010).
- Da-Rocha, H. R. *et al.* Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *J. Geophys. Res.* 114, G00B12 (2009).
- Costa, M. H. *et al.* Atmospheric versus vegetation controls of Amazonian tropical rain forest evapotranspiration: Are the wet and seasonally dry rain forests any different? *J. Geophys. Res.* 115, G04021 (2010).
- Restrepo-Coupe, N. *et al.* Understanding water and energy fluxes in the Amazonía: Lessons from an observation-model intercomparison. *Glob. Chang. Biol.* gcb.15555 (2021) doi:10.1111/gcb.15555.
- Costa, M. H. & Foley, J. A. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon Basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 104, 14189–14198 (1999).
- Nepstad, D. C. *et al.* The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372, 666–669 (1994).
- Chauvel, A. *et al.* O papel das raízes no ciclo hidrológico da floresta amazônica. *VII Congr. Bras. Meteorol.* 298–302 (1992).
- Negrón-Juárez, R. *et al.* Calibration, measurement, and characterization of soil moisture dynamics in a central Amazonian tropical forest. *Vadose Zo. J.* 19, 0–16 (2020).
- Bruno, R. D., da Rocha, H. R., de Freitas, H. C., Goulden, M. L. & Miller, S. D. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrol. Process.* 20, 2477–2489 (2006).
- Hodnett, M. G., da Silva, L. P., da Rocha, H. R. & Cruz Senna, R. Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *J. Hydrol.* 170, 233–254 (1995).
- Jipp, P. H., Nepstad, D. C., Cassel, D. K. & Reis De Carvalho, C. Deep Soil Moisture Storage and Transpiration in Forests and Pastures of Seasonally-Dry Amazonia. *Clim. Change* 39, 395–412 (1998).
- Dawson, T. E., Mambelli, S., Plamboeck, A. H., Templer, P. H. & Tu, K. P. Stable Isotopes in Plant Ecology. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 33, 507–559 (2002).
- Oliveira, R. S., Dawson, T. E., Burgess, S. S. O. & Nepstad, D. C. Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. *Oecologia* 145, 354–363 (2005).
- Fan, Y. & Miguez-Macho, G. Potential groundwater contribution to Amazon evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 2039–2056 (2010).
- Romero-Saltos, H., Sternberg, L. D. S. L., Moreira, M. Z. & Nepstad, D. C. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake. *Am. J. Bot.* 92, 443–455 (2005).
- Brum, M. *et al.* Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. *J. Ecol.* 107, 318–333 (2019).
- Ivanov, V. Y. *et al.* Root niche separation can explain avoidance of seasonal drought stress and vulnerability of overstory trees to extended drought in a mature Amazonian forest. *Water Resour. Res.* 48, (2012).
- Rowland, L. *et al.* Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature* 528, 119–122 (2015).
- Singh, C., Wang-Erlandsson, L., Fetzer, I., Rockström, J. & van der Ent, R. Rootzone storage capacity reveals drought coping strategies along rainforest-savanna transitions. *Environ. Res. Lett.* 15, 124021 (2020).
- Hasler, N. & Avissar, R. What controls evapotranspiration in the Amazon basin? *J. Hydrometeorol.* 8, 380–395 (2007).
- Christoffersen, B. O. *et al.* Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado. *Agric. For.*

- Meteorol.* 191, 33–50 (2014).
24. Eltahir, E. A. B. Role of vegetation in sustaining large-scale atmospheric circulations in the tropics. *J. Geophys. Res. Atmos.* 101, 4255–4268 (1996).
 25. Zeng, N. & Neelin, J. D. A Land–Atmosphere Interaction Theory for the Tropical Deforestation Problem. *J. Clim.* 12, 857–872 (1999).
 26. Dirmeyer, P. A. & Shukla, J. Albedo as a modulator of climate response to tropical deforestation. *J. Geophys. Res.* 99, 20863 (1994).
 27. Wright, J. S. *et al.* Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 8481–8486 (2017).
 28. Leite-Filho, A. T., Costa, M. H. & Fu, R. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. *Int. J. Climatol.* 40, 2328–2341 (2020).
 29. Leite-Filho, A. T., Sousa Pontes, V. Y. & Costa, M. H. Effects of Deforestation on the Onset of the Rainy Season and the Duration of Dry Spells in Southern Amazonia. *J. Geophys. Res. Atmos.* 124, 5268–5281 (2019).
 30. Spracklen, D. V., Arnold, S. R. & Taylor, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature* 489, 282–285 (2012).
 31. Poveda, G., Jaramillo, L. & Vallejo, L. F. Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resour. Res.* 50, 98–118 (2014).
 32. Marengo, J. A., Soares, W. R., Saulo, C. & Nicolini, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP–NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. *J. Clim.* 17, 2261–2280 (2004).
 33. Arraut, J. M., Nobre, C., Barbosa, H. M. J., Obregon, G. & Marengo, J. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. *J. Clim.* 25, 543–556 (2012).
 34. Drumond, A. *et al.* The role of the Amazon Basin moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 2577–2598 (2014).
 35. Gimeno, L. *et al.* Recent progress on the sources of continental precipitation as revealed by moisture transport analysis. *Earth-Science Rev.* 201, 103070 (2020).
 36. Martinez, J. A. & Dominguez, F. Sources of Atmospheric Moisture for the La Plata River Basin*. *J. Clim.* 27, 6737–6753 (2014).
 37. Drumond, A., Nieto, R., Gimeno, L. & Ambrizzi, T. A Lagrangian identification of major sources of moisture over Central Brazil and La Plata Basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113, (2008).
 38. Gimeno, L. *et al.* Major mechanisms of atmospheric moisture transport and their role in extreme precipitation events. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 41, 117–141 (2016).
 39. Marengo, J. A. Drought, Floods, Climate Change, and Forest Loss in the Amazon Region: A Present and Future Danger? *Front. Young Minds* 7, (2020).
 40. Mendez-Espinosa, J. F., Belalcazar, L. C. & Morales Betancourt, R. Regional air quality impact of northern South America biomass burning emissions. *Atmos. Environ.* 203, 131–140 (2019).
 41. Silvério, D. V. *et al.* Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. *Environ. Res. Lett.* 10, 104015 (2015).
 42. Coe, M. T. *et al.* The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. *Trop. Conserv. Sci.* 10, 194008291772067 (2017).
 43. 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.* 113, 10759–10768 (2016).
 44. Coe, M. T. *et al.* The Hydrology and Energy Balance of the Amazon Basin. in *Interactions Between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)* 35–53 (Springer, Berlin, Heidelberg, 2016). doi:10.1007/978-3-662-49902-3_3.
 45. Still, C. *et al.* Thermal imaging in plant and ecosystem ecology: applications and challenges. *Ecosphere* 10, (2019).
 46. Brando, P. M. *et al.* Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 47, 555–581 (2019).
 47. Doughty, C. E. & Goulden, M. L. Are tropical forests near a high temperature threshold? *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 113, n/a–n/a (2008).
 48. Smith, M. N. *et al.* Empirical evidence for resilience of tropical forest photosynthesis in a warmer world. *Nat. Plants* 6, 1225–1230 (2020).
 49. Sullivan, M. J. P. *et al.* Long-term thermal sensitivity of Earth’s tropical forests. *Science* 368, 869–874 (2020).
 50. Fisher, J. B. *et al.* The land-atmosphere water flux in the tropics. *Glob. Chang. Biol.* 15, 2694–2714 (2009).
 51. Gimenez, B. O. *et al.* Species-Specific Shifts in Diurnal Sap Velocity Dynamics and Hysteretic Behavior of Ecophysiological Variables During the 2015–2016 El Niño Event in the Amazon Forest. *Front. Plant Sci.* 10, (2019).
 52. Costa, M. H. & Pires, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *Int. J. Climatol.* 30, 1970–1979 (2010).
 53. Toomey, M., Roberts, D. A., Still, C., Goulden, M. L. & McFadden, J. P. Remotely sensed heat anomalies linked with Amazonian forest biomass declines. *Geophys. Res. Lett.* 38, n/a–n/a (2011).
 54. Haddad, N. M. *et al.* Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth’s ecosystems. *Sci. Adv.* 1, e1500052 (2015).
 55. Skole, D. & Tucker, C. Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon: Satellite Data from 1978 to 1988. *Science* 260, 1905–1910 (1993).
 56. Pfeifer, M. *et al.* Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates. *Nature* 551, 187–191 (2017).
 57. Brando, P. M. *et al.* Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 6347–6352 (2014).
 58. Didham, R. K. & Lawton, J. H. Edge structure determines the magnitude of changes in microclimate and vegetation structure in tropical forest fragments. *Biotropica* 31, 17–30 (1999).

59. Schwalm, C. R. *et al.* Global patterns of drought recovery. *Nature* 548, 202–205 (2017).
60. Laurance, W. F., Delamônica, P., Laurance, S. G., Vasconcelos, H. L. & Lovejoy, T. E. Rainforest fragmentation kills big trees. *Nature* 404, 836–836 (2000).
61. Laurance, W. F. *et al.* Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. *Conserv. Biol.* 16, 605–618 (2002).
62. Chaplin-Kramer, R. *et al.* Spatial patterns of agricultural expansion determine impacts on biodiversity and carbon storage. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 7402–7407 (2015).
63. 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).
64. Maxwell, S. L. *et al.* Degradation and forgone removals increase the carbon impact of intact forest loss by 626%. *Sci. Adv.* 5, eaax2546 (2019).
65. Gascon, C., Williamson, G. B. & Da Fonseca, G. A. B. Receding forest edges and vanishing reserves. *Science* 288, 1356–1358 (2000).
66. Matricardi, E. A. T. *et al.* Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* 369, 1378–1382 (2020).
67. Rödig, E. *et al.* The importance of forest structure for carbon fluxes of the Amazon rainforest. *Environ. Res. Lett.* 13, 054013 (2018).