

MENOS BOSQUES, MÁS SEQUEDAD EN LA AMAZONÍA: IMPACTOS DE LA DEFORESTACIÓN DESDE EL MODELADO ACOPLADO SUPERFICIE–ATMÓSFERA

Omar Gutiérrez-Cori^{1,2,3}, Laurent Li³ y Jhan-Carlo Espinoza^{4,5}

¹ Wildlife Conservation Society (WCS), Lima, Perú.

² Departamento de Ordenamiento Territorial y Construcción, Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú.

³ Laboratoire de Météorologie Dynamique, LMD – IPSL, Sorbonne Université, CNRS, París, Francia.

⁴ Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, INRAE, Grenoble, Francia.

⁵ Instituto de Investigación Sobre la Enseñanza de las Matemáticas, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.



Omar Gutiérrez Cori es Ph.D. en Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente por la Sorbonne Université (París, Francia), M.Sc. en Recursos Hídricos por la Universidad Nacional Agraria La Molina (Lima, Perú) y B.Sc. en Ciencias Agrarias por la Universidad Nacional del Altiplano (Puno, Perú). Su línea de investigación se centra en comprender la dinámica de las retroalimentaciones físicas entre los cambios en el LULC, los procesos hidrológicos y la variabilidad climática, mediante observaciones en campo, sensores remotos y modelos. Actualmente es investigador postdoctoral en la Wildlife Conservation Society (WCS).

Palabras clave: Deforestación, Modelado superficie–atmósfera, Transición biofísica, ORCHIDEE y LMDZ

Citar como Gutiérrez-Cori, O., Li, L. & Espinoza, J.C. (2025). Menos bosques, más sequedad en la Amazonía: impactos de la deforestación desde el modelado acoplado superficie–atmósfera. Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 12 n.º 07, págs. 4-14.

¿Cuál es la contribución de esta investigación para los tomadores de decisiones?

Esta investigación brinda evidencia clave para la toma de decisiones al mostrar que la deforestación proyectada hacia 2050 intensificaría el estrés hídrico en el suroeste amazónico (Perú y Bolivia principalmente). Esto podría comprometer la resiliencia de los ecosistemas locales, el ingreso de aire húmedo que alimenta las lluvias en los Andes —particularmente en el Altiplano—, produciendo impactos en la seguridad hídrica y agrícola. La evidencia generada respalda la necesidad de implementar políticas urgentes de conservación y gestión forestal, integrando la protección de la Amazonía con estrategias nacionales y regionales de adaptación al cambio climático, gestión de los recursos hídricos y reducción del riesgo de desastres.

Resumen

Los bosques amazónicos juegan un papel crucial en la hidroclimatología regional, pues impulsan el ciclo del agua y actúan como amortiguadores frente a sequías extremas. No obstante, el cambio climático y la pérdida de bosques están alterando estas funciones debido al fuerte acoplamiento tierra-atmósfera, especialmente en la Amazonía sur. Esta investigación evalúa los impactos de la deforestación proyectada

hacia el 2050 sobre el ciclo hidrológico y el estrés hídrico regional, mediante simulaciones acopladas del modelo de superficie terrestre ORCHIDEE (ORganising Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms) y el modelo de circulación general LMDZ (Laboratoire de Météorologie Dynamique-Zoom). Los resultados muestran que la pérdida de cobertura forestal reduce la precipitación (P) y la evapotranspiración (E), mientras incrementa la

escorrentía (R), con efectos más marcados durante la estación seca. Regionalmente se observa un aumento del coeficiente de escorrentía (R/P) y una disminución del reciclaje local de agua (E/P), lo que indica un menor aprovechamiento del agua por parte del ecosistema. Además, se intensifica el estrés hídrico, reflejado en valores más negativos del Acumulado Máximo de Déficit de Agua (MCWD, por sus siglas en inglés) y en un aumento significativo del Déficit de Presión de Vapor (VPD, por sus siglas en inglés), particularmente en la Amazonía suroeste. Estos desequilibrios se asocian a cambios en la circulación atmosférica y a una reducción del reciclaje de humedad inducida por la deforestación, lo que amplifica el déficit hídrico. Los resultados también sugieren un debilitamiento de los flujos de humedad más allá de la cuenca amazónica, con posibles efectos en regiones como el Altiplano. En conjunto, los hallazgos subrayan la vulnerabilidad de la Amazonía ante escenarios de pérdida forestal y aportan evidencia sobre los riesgos crecientes asociados al estrés hídrico, contribuyendo a una mejor comprensión de los vínculos entre la deforestación, la disponibilidad de agua y la estabilidad ecohidrológica regional.

1. Introducción

La Amazonía constituye uno de los principales núcleos de biodiversidad, proporciona servicios ecosistémicos (Barlow et al., 2018) y desempeña un papel fundamental como el mayor sumidero natural de carbono terrestre (Gatti et al., 2021). Más aún, los bosques amazónicos actúan como reguladores del sistema climático e impulsores del ciclo hidrológico (Worden et al., 2021), pues influyen en el clima y la hidrología mediante procesos biofísicos, como el reciclaje de agua (Zemp et al., 2017; Jenkins et al., 2025). Funcionan como bombas hidráulicas que extraen grandes volúmenes de agua del subsuelo profundo y los liberan a la atmósfera gracias al fuerte acoplamiento tierra-atmósfera (Aragão, 2012) y a complejos mecanismos de retroalimentación (Flores & Staal, 2022), los cuales pueden mitigar el impacto de eventos climáticos extremos, como las sequías (Staal et al., 2018). Estas dinámicas están moduladas por la interacción entre sistemas atmosféricos de gran escala (Marengo et al., 2010), las altas tasas de precipitación (Builes-Jaramillo and Poveda, 2018) y las condiciones geomorfológicas locales, factores que, en conjunto, explican la composición, dinámica y heterogeneidad forestal (Marca-Zevallos et al., 2022).

En un estado ecológico estable, esta configuración resulta esencial para determinar la respuesta del ecosistema amazónico al estrés hídrico y al cambio climático (Esquivel-Muelbert et al., 2019). No obstante, bajo condiciones de perturbación, la circulación atmosférica y los flujos de agua y energía del sistema tierra-atmósfera pueden modificarse por factores internos y externos (Sierra et al., 2023). En este contexto, sistemas interconectados como el Andes–Amazon–Atlantic (AAA) evidencian cómo una alteración local puede desencadenar respuestas en cascada a lo largo de toda la cuenca. Así, los impactos se manifiestan mediante retroalimentaciones positivas, que amplifican el cambio, o negativas, que lo amortiguan (Beveridge et al., 2024).

La cuenca amazónica es un ecosistema dinámico en constante cambio que, en los últimos años, ha experimentado perturbaciones en el equilibrio del sistema clima-vegetación. Dichas alteraciones se atribuyen al cambio climático global y a la intensa presión antropogénica, principales impulsores de las transformaciones sobre un ecosistema cada vez más frágil (Lapola et al., 2023). Además, las retroalimentaciones entre actividades humanas y fenómenos climáticos —por ejemplo, el déficit de lluvias— tienen el potencial de transformar la Amazonía en un ecosistema más seco (Staal et al., 2020). Esto es preocupante, pues acentúa el debate planteado sobre el posible colapso de todo el ecosistema amazónico vinculado a estas sinergias (Wunderling et al., 2022). De hecho, el ciclo hidrológico regional se ha intensificado: se registran episodios secos más frecuentes e intensos durante las últimas décadas (Espinoza et al., 2024), lo que favorece la ocurrencia de incendios forestales y una mayor mortalidad de bosques (Barlow et al., 2020).

En años recientes se ha informado, además, que los procesos humanos ya superan en magnitud a los estrictamente climáticos (Albert et al., 2023). Las tasas de deforestación se han incrementado sustancialmente por la expansión de la frontera agrícola, sobre todo en la Amazonía sur (Silva-Junior et al., 2021). Dado que la deforestación puede reducir las lluvias e intensificar los episodios secos (Staal et al., 2020), resulta crucial determinar sus impactos y comprender la dirección futura de los cambios en la estabilidad hidroclimática.

Debido a todo lo anterior, la Amazonía es reconocida como un posible punto de inflexión en el sistema climático de la Tierra; es decir, podría desencadenarse una transición biofísica abrupta del bosque tropical

hacia un ambiente más seco, lo que representaría una amenaza para la estabilidad de todo el ecosistema (Wunderling et al., 2022). Una reducción de la evapotranspiración forestal —mecanismo clave en el reciclaje y transporte de humedad (Zemp et al., 2017)— afectaría especialmente a las regiones ubicadas al suroeste de la cuenca, incluidos los Andes, que dependen del suministro de agua reciclada para su estabilidad, dado que influye en las precipitaciones y la disponibilidad hídrica (Ruiz-Vásquez et al., 2020). Sin embargo, la deforestación, combinada con períodos secos intensos y prolongados, podría alterar el equilibrio vegetación-atmósfera y generar riesgos significativos para toda la región debido a sus efectos autoamplificados (Zemp et al., 2017). Comprender cómo la pérdida de bosques altera los procesos hidroclimáticos es, por tanto, fundamental; ello subraya la importancia de profundizar en el conocimiento de las interacciones clima-vegetación y sus cambios. En los últimos años, los modelos han contribuido significativamente a mejorar este entendimiento (Guimberteau et al., 2017; Wongchuig et al., 2023). No obstante, persisten incertidumbres, por lo que resulta necesario seguir explorando

diversas perspectivas, especialmente considerando que las proyecciones hacia 2050 indican que los impulsores climáticos y antropogénicos continuarán representando una amenaza latente (Lapola et al., 2023).

En este contexto, la presente investigación analiza cómo escenarios de deforestación futura podría afectar los procesos hidrológicos e intensificar la sequedad en la Amazonía, mediante simulaciones acopladas entre el modelo de superficie terrestre ORCHIDEE y el modelo de circulación atmosférica global LMDZ (Figura 1a). Aunque el análisis abarca toda la cuenca, se enfoca en el suroeste amazónico (Figura 1b), una región clave por su biodiversidad, sus contrastes hidroclimáticos y la creciente presión antrópica. Se trata, por ende, de un escenario crucial para comprender las posibles alteraciones en la estabilidad hidroclimática de toda la Amazonía.

Los resultados presentados en esta investigación forman parte de la tesis doctoral titulada “Relationship and Feedback Between LULC Changes and Hydroclimatic Variability in Amazonia” (Gutierrez Cori, 2024).

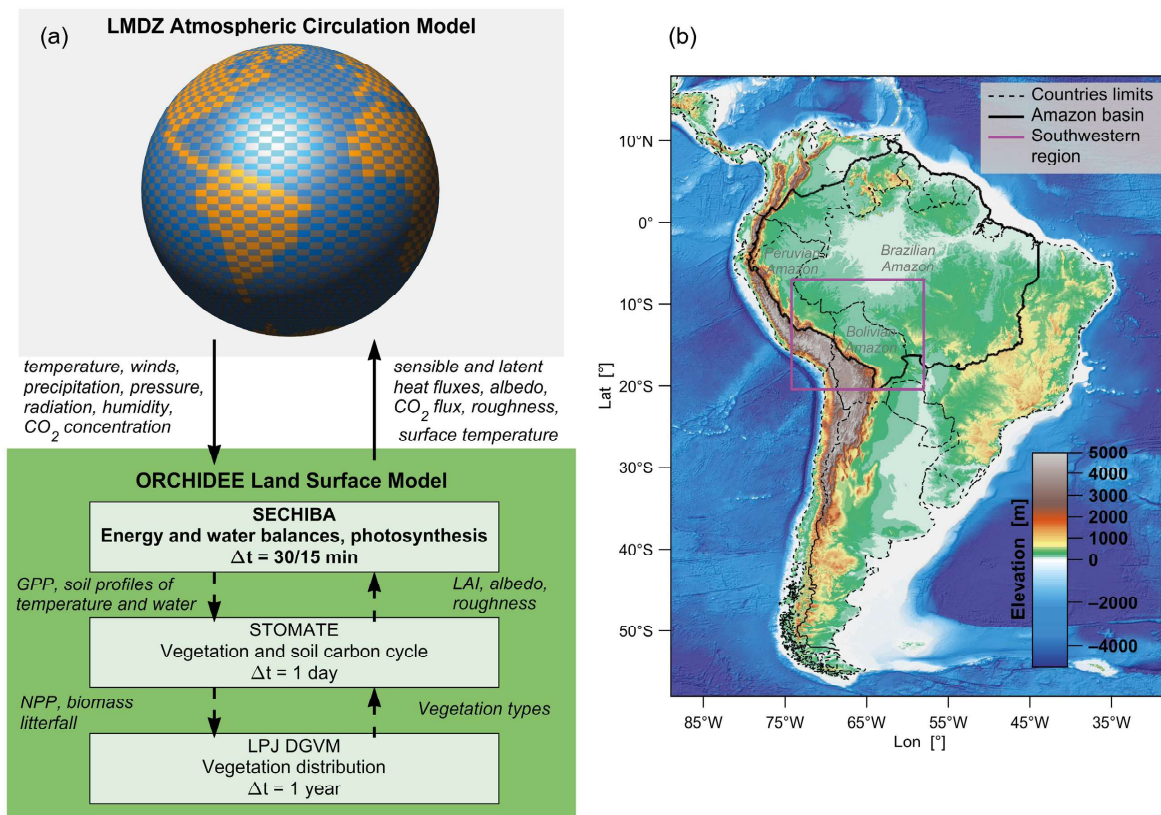


Figura 1. Conceptualización del modelo ORCHIDEE acoplado a LMDZ (a) y ubicación de la región de estudio (b). La línea magenta indica el suroeste de la Amazonía.

2. Datos y métodos

Modelo de superficie ORCHIDEE

ORCHIDEE (ORganizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems) es el componente de superficie del Modelo del Sistema Terrestre del Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL-ESM) y evalúa las interacciones y los intercambios de energía, agua y carbono en el sistema vegetación-suelo-atmósfera (Krinner et al., 2005). Consta de dos módulos principales: SECHIBA (Schématisation des EChanges Hydriques à l'Interface entre la Biosphère et l'Atmosphère) y STOMATE (Saclay Toulouse Orsay Model for the Analysis of Terrestrial Ecosystems), los cuales resuelven procesos asociados a los ciclos de energía, agua y carbono (Campoy et al., 2013). SECHIBA simula los intercambios de energía y agua entre el sistema tierra-atmósfera, así como la hidrología del suelo (Krinner et al., 2005). Este módulo interactúa con la atmósfera y resuelve procesos térmicos e hidrológicos clave de la superficie, como la temperatura, la evapotranspiración y el escurrimiento (Guimberteau et al., 2017). SECHIBA opera sobre celdas de cuadrículas rectangulares, donde la cobertura vegetal se representa mediante mosaicos homogéneos distribuidos en Tipos Funcionales de Plantas (PFT, por sus siglas en inglés). Cada PFT se caracteriza por un conjunto de parámetros que describen los procesos biofísicos que rigen las interacciones superficie-atmósfera (Campoy et al., 2013).

Modelo atmosférico LMDZ

LMDZ es un modelo de circulación general atmosférica (General Circulation Model, GCM) desarrollado por el Laboratoire de Météorologie Dynamique (Hourdin et al., 2013). Su núcleo dinámico se basa en una discretización por diferencias finitas de las ecuaciones primitivas de la meteorología. Horizontalmente utiliza una cuadrícula longitud-latitud con posibilidad de refinamiento en ambas direcciones (la "Z" en LMDZ hace referencia a zoom); verticalmente emplea una coordenada híbrida clásica sigma-presión (Hourdin et al., 2020). LMDZ es el componente atmosférico del modelo de Sistema Tierra IPSL-ESM y ha estado presente de esta manera en diversas fases de los ejercicios CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) (Hourdin et al., 2013). En cuanto a las parametrizaciones físicas, el IPSL participó en el CMIP5 con dos versiones: Standard Physics y New Physics. Sin embargo, esta última

presentó deficiencias frente a la primera, especialmente en métricas relacionadas con nubes, convección profunda y la alta variabilidad de las precipitaciones en los trópicos (Hourdin et al., 2020). Ante esto, se desarrolló una versión revisada de New Physics, con mejoras en las parametrizaciones de turbulencia, convección y nubes. Dicha versión fue incorporada al modelo LMDZ6A-LR, utilizado en IPSL-CM6A-LR para CMIP6, que opera con una grilla horizontal regular de 144x143 puntos (2.5°x1.25°) y 79 niveles verticales que se extienden desde los 10 m hasta los 80 km sobre la superficie terrestre (Hourdin et al., 2020).

Diseño del experimento

Se realizaron dos experimentos acoplados con LMDZ y ORCHIDEE: (i) uno considerando las condiciones de vegetación histórica y (ii) otro bajo un escenario de deforestación futura.

- El experimento de control (CTRL): simula los procesos bajo las condiciones actuales de uso y cobertura del suelo (LULC), utilizando un mapa de cobertura forestal correspondiente al año 2014 (Figura 2a).
- El experimento de deforestación (DFOR): reemplaza el mapa de uso y cobertura del suelo en la Amazonía con un escenario proyectado para 2050 (Figura 2b), que estima pérdidas de bosques superiores al 45 %, y refleja un escenario pesimista con cambios sustanciales en el LULC debido a la sustitución de bosques por cultivos (Soares-Filho et al., 2006).

Los mapas de LULC son integrados en el modelo y representados mediante Tipos Funcionales de Plantas (PFT, por sus siglas en inglés) en las simulaciones LMDZ-ORC CTRL (Figura 2c) y LMDZ-ORC DFOR (Figura 2d).

El acoplamiento en ambos experimentos se realiza según el protocolo del Proyecto de Intercomparación de Modelos Atmosféricos (AMIP, por sus siglas en inglés), que prescribe la Temperatura de la Superficie del Mar y la Concentración de Hielo Marino, con simulaciones para el periodo 1971-2014 y un análisis enfocado en 1981-2014.

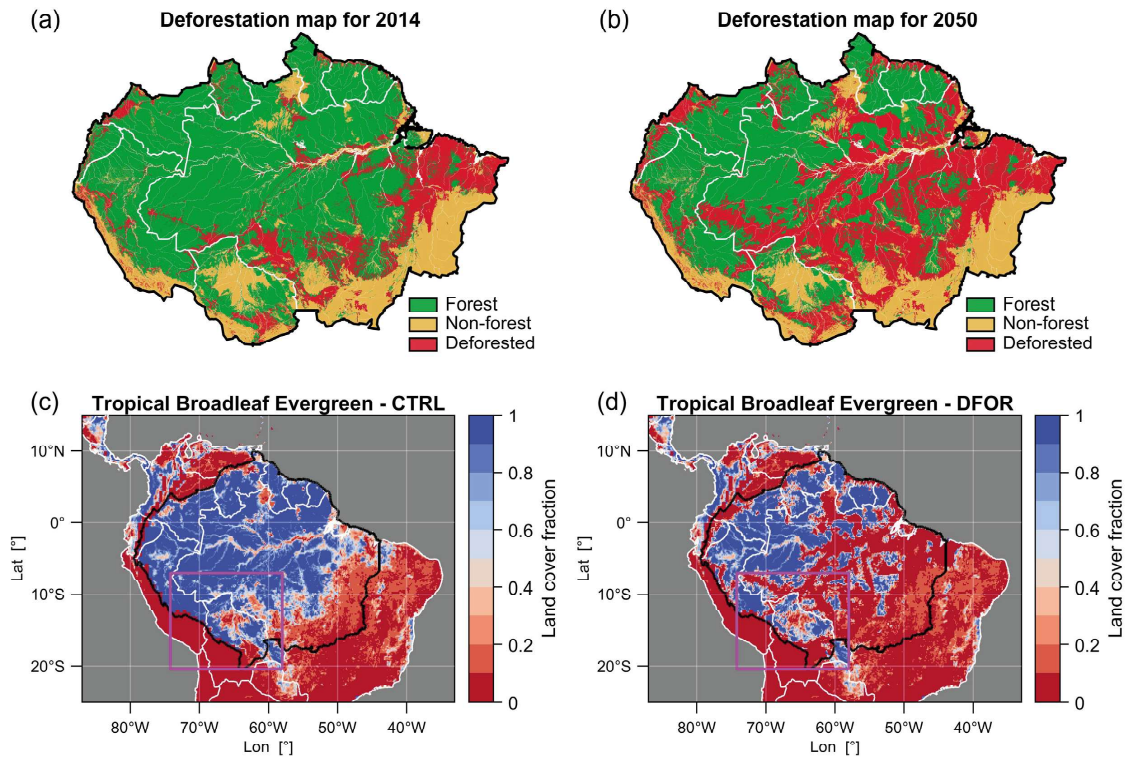


Figura 2. Mapas de deforestación Amazónica para los años 2014 (a) y 2050 (b), y fracción de cobertura boscosa en los experimentos de control (c) y bajo deforestación (d), derivadas de los mapas mostrados.

Indicadores de cambios hidrológicos y biofísicos

Se utilizaron diversos índices para analizar los impactos de la deforestación proyectada en el ciclo hidrológico, el estrés hídrico y la intensidad de la sequedad.

Para evaluar cómo la pérdida de bosques podría modificar la partición de los flujos de agua, se analizaron los cambios en dos relaciones clave. Se consideró el coeficiente de escurrimiento, definido como el cociente entre escurrimiento y precipitación (R/P), que representa la fracción de agua no utilizada por el ecosistema, y el cociente entre evapotranspiración y precipitación (E/P), indicador de la capacidad de reciclaje local del agua.

Para caracterizar la intensidad del estrés hídrico superficial, se calculó el Acumulado Máximo de Déficit de Agua (MCWD, por sus siglas en inglés), una métrica que cuantifica el déficit de agua en función de la duración e intensidad de la estación seca (Esquivel-Muelbert et al., 2019). Este índice ha sido ampliamente utilizado para evaluar la estabilidad del

ecosistema, la severidad del estrés hídrico y la posible muerte regresiva de los bosques amazónicos (Zemp et al., 2017; Wunderling et al., 2022). El MCWD se define como el valor más negativo del déficit de agua acumulado durante el año; cuanto mayor es el estrés hídrico, más negativo es su valor.

También se empleó el Déficit de Presión de Vapor (VPD, por sus siglas en inglés) como indicador del estrés hídrico atmosférico. El VPD se calcula a partir de la ecuación de Clausius-Clapeyron, que describe la relación entre la presión de vapor de saturación del aire y la presión de vapor real (Green et al., 2022). Cuanto mayor es la diferencia entre ambos valores, mayor es la demanda atmosférica de agua, lo que se traduce en un VPD más elevado. Este índice también es un indicador de la aridez atmosférica y está estrechamente vinculado con los procesos biofísicos de la vegetación.

3. Resultados

Evaluamos los posibles impactos de la deforestación proyectada para 2050 sobre el ciclo hidrológico

terrestre de la Amazonía suroeste (área en magenta en la Figura 1b). La Figura 3 presenta una comparación de los valores anuales y estacionales de los componentes del ciclo hidrológico, estimados a partir de los experimentos CTRL y DFOR, e incluye una estimación de los cambios inducidos por la pérdida de bosques, calculados como la diferencia entre ambos experimentos. Bajo escenarios de deforestación, la precipitación anual (P) disminuye, la escorrentía total (R; disponibilidad de agua terrestre) aumenta y la evapotranspiración (E; flujo de agua entre la superficie y la atmósfera) se reduce (Figura 3a).

Cuantitativamente, estos cambios se traducen en una disminución del 2.9% en P, un incremento del 11.2% en R y una reducción del 7.8% en E (Figura 3d). Sin embargo, a escala estacional las diferencias se acentúan. Durante la estación húmeda (octubre-marzo) P y E no presentan variaciones significativas (Figuras 3b y 3e), pero R aumenta en un 15.9% y el almacenamiento de agua terrestre (ΔS_w) disminuye en un 13.6%, con el mayor aumento en R registrado entre enero-marzo. En contraste, durante la

estación seca (abril-septiembre), los cambios son aún más pronunciados. P y E disminuyen en un 5.8% y un 13.7%, respectivamente (Figuras 3c y 3f), mientras que R y ΔS_w se incrementan en 6.2% y 13.2%, concentrándose las mayores reducciones de E en los meses de junio-agosto. A nivel de toda la cuenca amazónica, los mayores desequilibrios en las particiones de flujos de agua inducidos por la pérdida de bosques se localizan en el sur, sobre el denominado "arco de deforestación" (Figura 4). En la Amazonía suroeste, la dirección de los cambios sugiere que, en promedio, el coeficiente de escorrentía (R/P) aumenta significativamente en un 5.5% (Figura 4a), y el reciclaje de agua (E/P) disminuye en un 5.1% (Figura 4b). Lo cual, desde una perspectiva ec hidrológica, implica un aumento en la cantidad de agua que se pierde por escurrimiento sin ser aprovechada por el ecosistema, junto con una disminución en la humedad devuelta a la atmósfera por la vegetación. En conjunto, estos desequilibrios tienen el potencial de intensificar el déficit hídrico en la región.

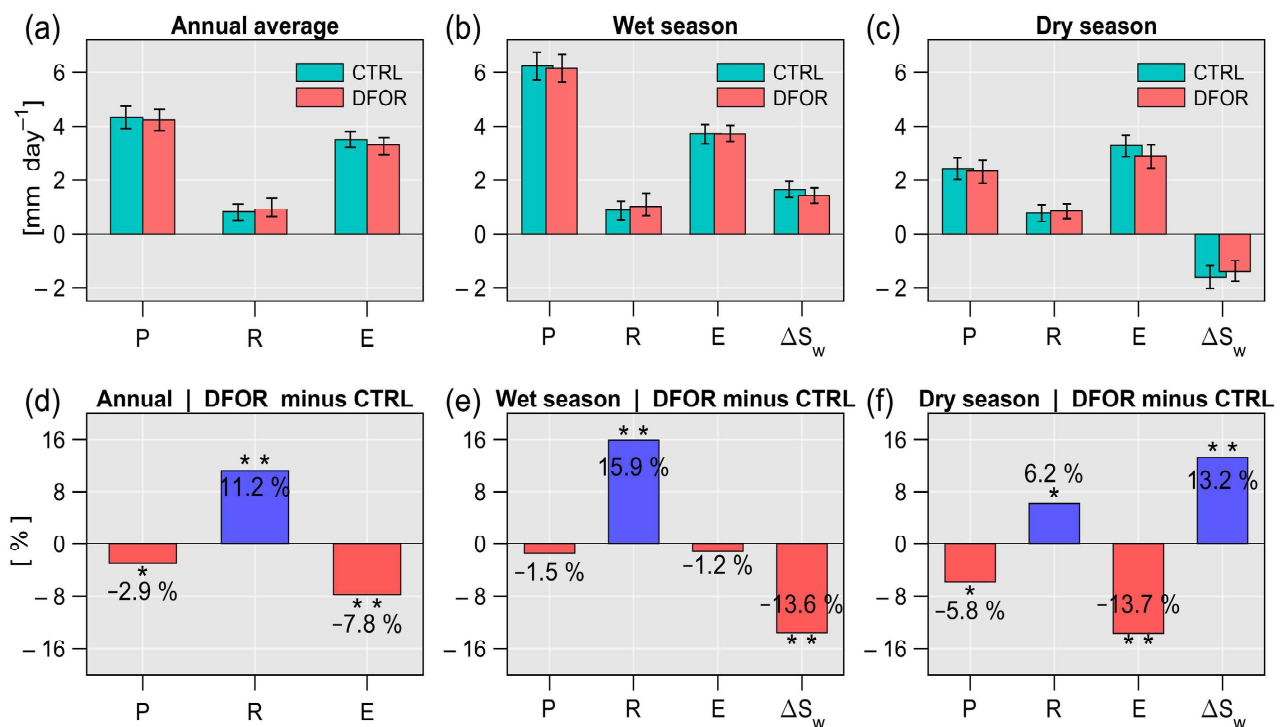


Figura 3. Valores anuales (a) y estacionales (b y c) de los componentes del ciclo hidrológico, estimados a partir de los experimentos CTRL y DFOR en la Amazonía suroeste. Los paneles d a f muestran los cambios porcentuales inducidos por la deforestación. "*" y "**" indican diferencias significativas al 90 % ($p < 0.1$) y 99 % ($p < 0.01$), respectivamente.

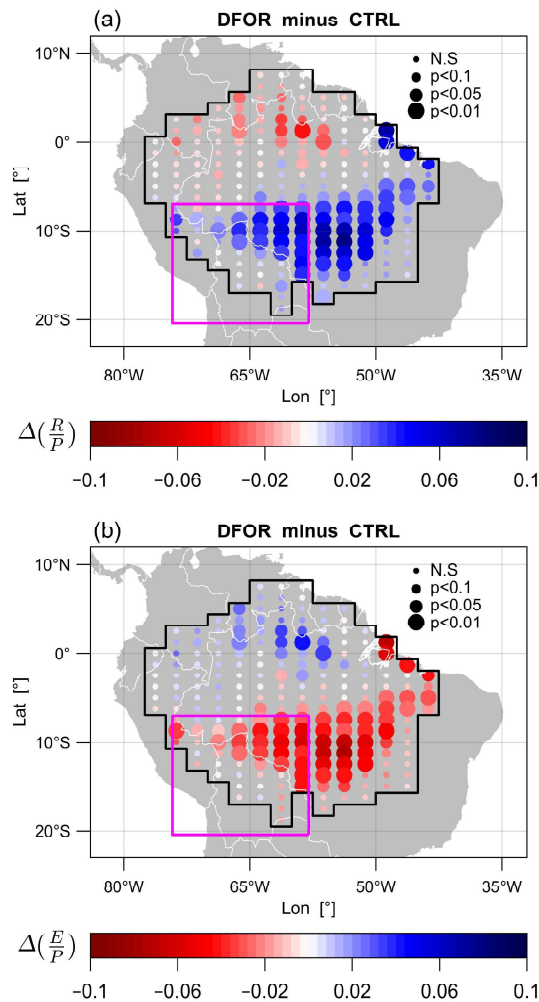


Figura 4. Cambios en el coeficiente de escorrentía (R/P; a) y en el reciclaje local del agua (E/P; b) inducidos por la deforestación. El tamaño de los puntos se asocia con la significancia de los cambios.

Para inferir los impactos de la deforestación sobre el estrés hídrico, se analizaron los cambios en el MCWD y el VPD (a un nivel de presión de 1000 hPa), observándose modificaciones de las condiciones estacionarias a largo plazo en ambos índices debido a la pérdida de cobertura boscosa (Figura 5). La deforestación proyectada induce valores de MCWD significativamente más negativos en la Amazonía occidental y suroeste, lo que indica una intensificación de las condiciones secas y un mayor estrés hídrico en los bosques de estas regiones (Figura 5a). De hecho, en comparación con el conjunto de la Amazonía, es en la región suroeste donde el VPD muestra un aumento más pronunciado como resultado de la deforestación (Figura 5b), lo que genera un ecosistema considerablemente más seco, limitando los procesos biofísicos de la vegetación.

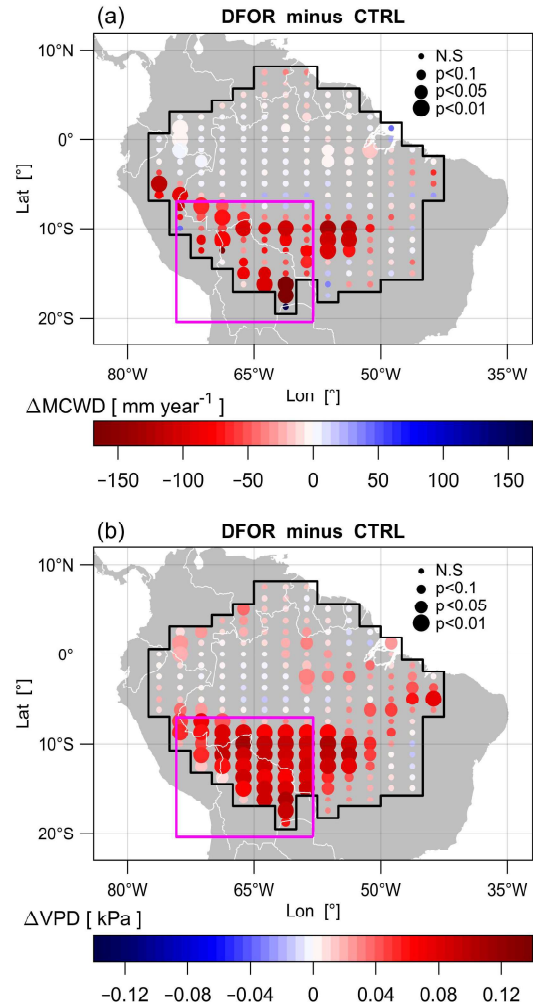


Figura 5. Cambios en el Acumulado Máximo de Déficit de Agua (MCWD; a) y en el Déficit de Presión de Vapor (VPD; b) inducidos por la deforestación. El tamaño de los puntos se asocia con la significancia de los cambios.

El análisis vertical longitud-altura sobre la Amazonía sur (8°–20°S, 78°–45°W; Figura 6a en magenta) revela que el aumento de la aridez y del estrés hídrico en la región suroeste se asocia a cambios en la dinámica atmosférica, principalmente durante la estación seca. La deforestación intensifica los vientos zonales (u) hacia el este en los niveles altos de la troposfera, debilita el movimiento vertical (w) y reduce la humedad específica (q) (Figura 6b). Los valores más negativos de humedad específica se concentran en la baja troposfera, sobre la Amazonía boliviana y brasileña, como resultado de una menor evapotranspiración. Durante la estación húmeda también se observan cambios en la dinámica atmosférica inducidos por la pérdida de bosques (Figura 6c). En este período, se debilitan los vientos zonales hacia el oeste en los niveles altos sobre la

Amazonía brasileña, junto con una reducción del movimiento vertical y de la humedad específica, especialmente en el suroeste de la cuenca. Los valores

más negativos se concentran entre los 800 y 500 hPa sobre la Amazonía boliviana, y se extienden incluso hacia los Andes tropicales en el Altiplano.

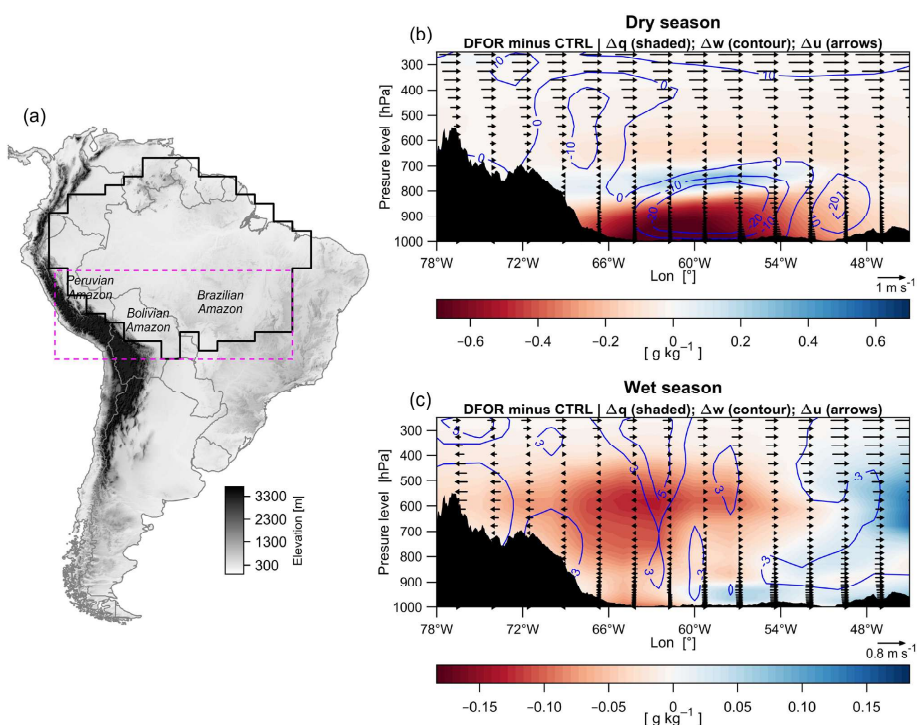


Figura 6. Sección transversal longitud-altura de los cambios en la humedad específica q (g kg^{-1} color), el movimiento vertical w (Pa h^{-1} ; contornos) y la velocidad del viento zonal u (m s^{-1} ; flechas), inducidos por la deforestación. El panel (a) muestra la ubicación de la sección transversal, promediada entre 8° y 20°S (en magenta); el panel (b) muestra los cambios durante el período seco, y el panel (c), durante el período húmedo. El color negro representa el perfil topográfico.

4. Conclusiones

Los resultados de este trabajo, a escala anual, coinciden con los supuestos de Aragão (2012): la deforestación reduce la precipitación, disminuye la evapotranspiración y aumenta la escorrentía. A escala estacional, los desequilibrios son más complejos (Wongchuig et al., 2023). Durante la temporada de lluvias, aunque la precipitación cambia poco, la deforestación reduce la capacidad del suelo para retener agua, lo que incrementa la escorrentía. En la estación seca, los efectos se intensifican: disminuyen la precipitación y la evapotranspiración, mientras aumenta la escorrentía y el almacenamiento de agua en el suelo, lo que sugiere una menor extracción hídrica por parte de la vegetación.

Los resultados también revelan que los desequilibrios inducidos por la deforestación pueden exacerbar el estrés hídrico tanto en la atmósfera como en la superficie terrestre, especialmente en la Amazonía suroeste, una de las regiones más vulnerables a estos

cambios (Weng et al., 2018). De hecho, el aumento del VPD, combinado con la disminución del MCWD, convierte a esta región en un núcleo de pérdida de resiliencia forestal (Zemp et al., 2017). Este proceso está vinculado a cambios en la circulación atmosférica y a la reducción del reciclaje de agua por los bosques (Ruiz-Vásquez et al., 2020; Sierra et al., 2023). La deforestación disminuye la evapotranspiración y el aporte de humedad a la atmósfera, lo que puede intensificar el estrés hídrico incluso en otras regiones debido al debilitamiento de las "cascadas de lluvia forestal" y los impactos autoamplificados (Zemp et al., 2017; Staal et al., 2020; Wunderling et al., 2022). Aunque no se analiza a fondo, los resultados sugieren una reducción de los flujos de humedad hacia el Altiplano, lo que implicaría condiciones más secas, dada la estrecha conexión entre los procesos atmosféricos de la Amazonía y los Andes (Segura et al., 2019).

Estos hallazgos contribuyen a las discusiones sobre la retroalimentación vegetación-atmósfera, los impactos de la pérdida de bosques y la intensificación de las

sequías, particularmente en la región suroeste (Weng et al., 2018; Zemp et al., 2017; Staal et al., 2020). Sin embargo, es importante señalar que, debido a la baja resolución horizontal del modelo LMDZ-ORCHIDEE, algunos procesos locales podrían estar subestimados o sobreestimados. Adicionalmente, para reducir las incertidumbres, es necesario incluir y examinar el acoplamiento entre la humedad del suelo y la atmósfera —incluso bajo escenarios de calentamiento global—, un aspecto que no fue considerado en este análisis. Finalmente, persiste la urgencia de comprender mejor estas interacciones y sus implicancias futuras, dentro como fuera de la cuenca, ante la evidencia de cambios abruptos que ya superan la capacidad adaptativa del sistema amazónico.

Referencias

- Albert, J. S., Carnaval, A. C., Flantua, S. G., Lohmann, L. G., Ribas, C. C., Riff, D., Carrillo, J. D., Fan, Y., Figueiredo, J. J. P., Guayasamin, J. M., Hoorn, C., de Melo, G. H., Nascimento, N., Quesada, C. A., Ulloa Ulloa, C., Val, P., Arieira, J., Encalada, A. C., & Nobre, C. A. (2023). Human impacts outpace natural processes in the Amazon. *Science*, 379(6630), eabo5003. <https://doi.org/10.1126/science.abo5003>
- Aragão, L. E. O. C. (2012). The rainforest's water pump. *Nature*, 489(7415), 217–218. <https://doi.org/10.1038/nature11485>
- Barlow, J., França, F., Gardner, T. A., Hicks, C. C., Lennox, G. D., Berenguer, E., Castello, L., Economo, E. P., Ferreira, J., Guénard, B., Gontijo Leal, C., Isaac, V., Lees, A. C., Parr, C. L., Wilson, S. K., Young, P. J., & Graham, N. A. (2018). The future of hyperdiverse tropical ecosystems. *Nature*, 559(7715), 517–526. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0301-1>
- Barlow, J., Berenguer, E., Carmenta, R., & França, F. (2020). Clarifying Amazonia's burning crisis. *Global Change Biology*, 26(2), 319–321. <https://doi.org/10.1111/gcb.14872>
- Beveridge, C. F., Espinoza, J. C., Athayde, S., Correa, S. B., Couto, T. B., Heilpern, S. A., ... & Anderson, E. P. (2024). The Andes–Amazon–Atlantic pathway: A foundational hydroclimate system for social–ecological system sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(22), e2306229121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2306229121>
- Builes-Jaramillo, A., & Poveda, G. (2018). Conjoint analysis of surface and atmospheric water balances in the Andes–Amazon system. *Water Resources Research*, 54(5), 3472–3489. <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>
- Campoy, A., Ducharne, A., Cheruy, F., Hourdin, F., Polcher, J., & Dupont, J. C. (2013). Response of land surface fluxes and precipitation to different soil bottom hydrological conditions in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19), 10,725–10,739. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50627>
- Espinoza, J. C., Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., & Ribeiro, J. V. M. (2024). The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. *Scientific Reports*, 14(1), 8107. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>
- Esquivel-Muelbert, A., Baker, T. R., Dexter, K. G., Lewis, S. L., Brienen, R. J., Feldpausch, T. R., Lloyd, J., Monteagudo-Mendoza, A., Arroyo, L., Álvarez-Dávila, E., Higuchi, N., Marimon, B. S., Marimon-Junior, B. H., Silveira, M., Vilanova, E., Gloor, E., Malhi, Y., Chave, J., Barlow, J., & Phillips, O. L. (2019). Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global change biology*, 25(1), 39–56. <https://doi.org/10.1111/gcb.14413>
- Flores, B. M., & Staal, A. (2022). Feedback in tropical forests of the Anthropocene. *Global Change Biology*, 28(17), 5041–5061. <https://doi.org/10.1111/gcb.16293>
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., & Neves, R. A. (2021). Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, 595(7867), 388–393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Gutierrez Cori, O. (2024). Relationship and feedback between LULC changes and hydroclimatic variability in Amazonia [Tesis doctoral, Sorbonne Université]. TEL

(thèses-en-ligne).

<https://theses.hal.science/tel-04681119>

Green, J. K., Ballantyne, A., Abramoff, R., Gentine, P., Makowski, D., & Ciais, P. (2022). Surface temperatures reveal the patterns of vegetation water stress and their environmental drivers across the tropical Americas. *Global change biology*, 28(9), 2940-2955.

<https://doi.org/10.1111/gcb.16139>

Guimberteau, M., Ciais, P., Ducharne, A., Boisier, J. P., Dutra Aguiar, A. P., Biemans, H., De Deurwaerder, H., Galbraith, D., Kruijt, B., Langerwisch, F., Poveda, G., Rammig, A., Rodriguez, D. A., Tejada, G., Thonicke, K., Von Randow, C., Von Randow, R. C. S., Zhang, K., & Verbeeck, H. (2017). Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3), 1455-1475.

<https://doi.org/10.5194/hess-21-1455-2017>

Hourdin, F., Grandpeix, J. Y., Rio, C., Bony, S., Jam, A., Cheruy, F., Rochetin, N., Fairhead, L., Idelkadi, A., Musat, I., Dufresne, J.-L., Lahellec, A., Lefebvre, M.-P., & Roehrig, R. (2013). LMDZ5B: The atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterizations for clouds and convection. *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2193-2222.

<https://doi.org/10.1007/s00382-012-1343-y>

Hourdin, F., Rio, C., Grandpeix, J. Y., Madeleine, J. B., Cheruy, F., Rochetin, N., Jam, A., Musat, I., Idelkadi, A., Fairhead, L., Foujols, M., Mellul, L., Traore, A., Dufresne, J., Boucher, O., Lefebvre, M., Millour, E., Vignon, E., Jouhaud, J., ... & Ghattas, J. (2020). LMDZ6A: The atmospheric component of the IPSL climate model with improved and better tuned physics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(7), e2019MS001892.

<https://doi.org/10.1029/2019MS001892>

Jenkins, C. N., Athayde, S., Beveridge, C. F., Correa, S. B., Espinoza, J. C., Heilpern, S. A., ... & Anderson, E. P. (2025). Global importance of Amazonian freshwaters. *Frontiers in Ecology and the Environment*, e2868.

<https://doi.org/10.1002/fee.2868>

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., ... & Prentice, I. C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system.

Global Biogeochemical Cycles, 19(1), GB1015.

<https://doi.org/10.1029/2003GB002199>

Lapola, D. M., Pinho, P., Barlow, J., Aragão, L. E. O. C., Berenguer, E., Carmenta, R., Liddy, H. M., Seixas, H., Silva, C. V. J., Silva-Junior, C. H. L., Alencar, A. A. C., Anderson, L. O., Armenteras, D., Brovkin, V., Calders, K., Chambers, J., Chini, L., Costa, M. H., Faria, B. L., Fearnside, P. M., ... Walker, W. S. (2023). The drivers and impacts of Amazon forest degradation. *Science*, 379(6630), eabp8622.

<https://doi.org/10.1126/science.abp8622>

Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. D., Cavalcanti, I. F. A., ... & Alves, L. M. (2010). Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, 32(1), 1-21.

<https://doi.org/10.1002/joc.2254>

Marca-Zevallos, M. J., Moulatlet, G. M., Sousa, T. R., Schietti, J., Coelho, L. D. S., Ramos, J. F., J. F., Lima Filho, D. de A., Amaral, I. L., de Almeida Matos, F. D., Rincón, L. M., Cardenas Revilla, J. D., Gribel, R., Barbosa, E. M., Miranda, I. P. de A., Bonates, L. C. de M., Guevara, J. E., Salomão, R. P., Ferreira, L. V., Vriesendorp, C., & Costa, F. R. (2022). Local hydrological conditions influence tree diversity and composition across the Amazon basin. *Ecography*, 2022(11), e06125.

<https://doi.org/10.1111/ecog.06125>

Ruiz-Vásquez, M., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54(9-10), 4169-4189.

<https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>

Segura, H., Junquas, C., Espinoza, J. C., Vuille, M., Jauregui, Y. R., Rabatel, A., Condom, T., & Lebel, T. (2019). New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. *Climate dynamics*, 53(1-2), 405-426.

<https://doi.org/10.1007/s00382-018-4590-8>

Sierra, J. P., Espinoza, J. C., Junquas, C., Wongchuig, S., Polcher, J., Moron, V., Fita, L., Arias, P. A., Schrapfner, A., & Pennel, R. (2023). Impacts of land-surface heterogeneities and Amazonian deforestation on the wet season onset in southern Amazon. *Climate Dynamics*, 61(9), 4867-4898.

<https://doi.org/10.1007/s00382-023-06835-2>

Silva-Junior, C. H., Pessôa, A. C., Carvalho, N. S., Reis, J. B., Anderson, L. O., & Aragão, L. E. (2021). The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. *Nature ecology & evolution*, 5(2), 144-145.
<https://doi.org/10.1038/s41559-020-01368-x>

Soares-Filho, B. S., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Cerqueira, G. C., Garcia, R. A., Ramos, C. A., ... & Schlesinger, P. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440(7083), 520-523.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nature04389>

Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H., Holmgren, M., van Nes, E. H., Scheffer, M., Zemp, D. C., & Dekker, S. C. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8(6), 539-543.
<https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>

Staal, A., Flores, B. M., Aguiar, A. P. D., Bosmans, J. H., Fetzer, I., & Tuinenburg, O. A. (2020). Feedback between drought and deforestation in the Amazon. *Environmental Research Letters*, 15(4), 044024.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab738e>

Weng, W., Luedeke, M. K. B., Zemp, D. C., Lakes, T., & Kropp, J. P. (2018). Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 911-927.
<https://doi.org/10.5194/hess-22-911-2018>

Wongchuig, S., Espinoza, J. C., Condom, T., Junquas, C., Sierra, J. P., Fita, L., Sörensson, A., & Polcher, J. (2023). Changes in the surface and atmospheric water budget due to projected Amazon deforestation: Lessons from a fully coupled model simulation. *Journal of Hydrology*, 625(A), 130082.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130082>

Worden, J., Saatchi, S., Keller, M., Bloom, A. A., Liu, J., Parazoo, N., Fisher, J. B., Bowman, K., Reager, J. T., Fahy, K., Schimel, D., Fu, R., Worden, S., Yin, Y., Gentile, P., Konings, A. G., Quetin, G. R., Williams, M., Worden, H., ... & Barkhordarian, A. (2021). [Rev. of Satellite observations of the tropical terrestrial carbon balance and interactions with the water cycle during the 21st century]. *Reviews of Geophysics* (1985), 59(1).
<https://doi.org/10.1029/2020RG000711>

Wunderling, N., Staal, A., Sakschewski, B., Hirota,

M., Tuinenburg, O. A., Donges, J. F., Barbosa, H. M. J., & Winkelmann, R. (2022). Recurrent droughts increase risk of cascading tipping events by outpacing adaptive capacities in the Amazon rainforest. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(32), e2120777119.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2120777119>

Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., Staal, A., Wang-Erlandsson, L., & Rammig, A. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature communications*, 8(1), 14681.
<https://doi.org/10.1038/ncomms14681>