



Trabajar con plantas, suelos y agua para enfriar el clima y rehidratar los paisajes de la Tierra

Antecedentes

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) publica los Informes Foresight con el fin de destacar aspectos críticos del cambio ambiental, exponer cuestiones científicas emergentes o tratar problemas ambientales contemporáneos. Estos informes ofrecen al público la oportunidad de conocer qué cambios están teniendo lugar en su entorno y las consecuencias de sus decisiones cotidianas, así como de reflexionar sobre la futura orientación de las políticas. La edición número 25 permite comprender mejor las relaciones entrecruzadas y los consiguientes flujos de energía entre las plantas, los suelos y el agua en el suelo, así como en la atmósfera y con ella. Asimismo, explica cómo pueden contribuir a mitigar el cambio climático y, al mismo tiempo, a crear un ecosistema resiliente.

Resumen

La continua destrucción de los bosques, el deterioro de los suelos, la consiguiente pérdida de almacenamiento de agua en el suelo y la reducción de la retención de agua en el paisaje están perturbando el movimiento del agua en la atmósfera y a través de ella. Esta perturbación provoca importantes cambios en las precipitaciones que podrían producir menos lluvias y más sequías en muchas zonas del mundo, un aumento de las temperaturas regionales y una exacerbación del cambio climático. Tales cambios afectan al clima regional, pero también pueden repercutir en regiones lejanas. Comprender las relaciones entrelazadas y los consiguientes flujos de energía entre las plantas, los suelos y el agua en el suelo, así como en la atmósfera, puede ayudar a mitigar el cambio climático y a crear ecosistemas más resilientes.

Introducción

La vegetación desempeña un papel importante —y a menudo ignorado— en la regulación del clima. Basta pensar en la diferencia entre estar en una calurosa tarde de verano en un campo arado y estéril o en un bosque denso. Es evidente que la conversión, por ejemplo, de bosques en tierras de cultivo o en zonas urbanas conlleva importantes cambios que pueden influir en el clima.

De la radiación solar que llega a la superficie de un campo con vegetación densa, solo el 1% se utiliza para la fotosíntesis y entre el 5% y el 10% calienta el aire (“calor sensible”). Más del 70% de la radiación se utiliza para la transpiración de las plantas, mediante la cual el agua en estado líquido se transforma en vapor de agua, un proceso que requiere mucha energía (“calor latente”) (**figura 1**). Contando con las superficies no vegetales y el agua,



Crédito de la fotografía: Shutterstock.com

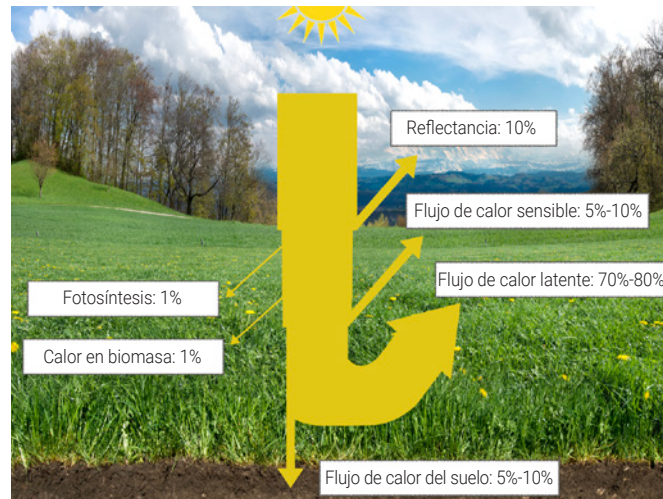


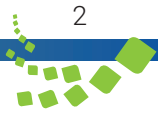
Figura 1: Distribución de la energía solar que incide sobre la vegetación¹.

alrededor del 50% de la energía solar que llega al suelo se utiliza para la evaporación y la transpiración del agua (“evapotranspiración”) ¹⁻⁴.

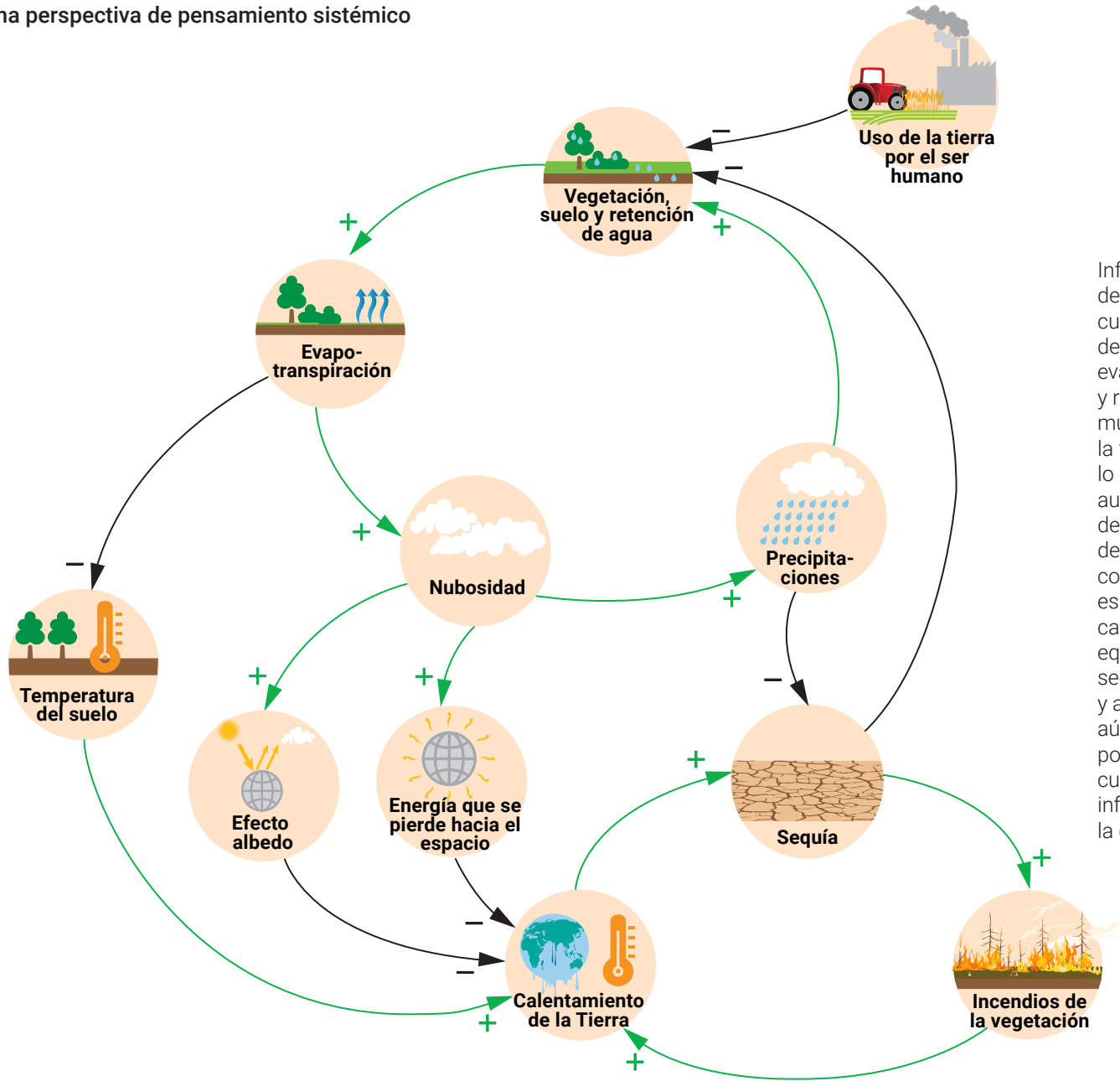
A medida que estas masas de aire suben a la atmósfera, el vapor de agua termina condensándose y liberando la misma cantidad de energía que se consume en el suelo, y parte de ella se disipa en el espacio. Las nubes recién creadas reflejan la radiación solar entrante y son la fuente de nuevas precipitaciones.

¹ El calor latente y el sensible son tipos de energía liberada o absorbida en la atmósfera. El calor latente está relacionado con los cambios de fase entre líquidos, gases y sólidos. El calor sensible está relacionado con los cambios de temperatura de un gas u objeto sin cambio de fase. (<https://climate.ncsu.edu/edu/Heat>)

ⁱⁱ Los procesos combinados de evaporación y transpiración del agua de la superficie terrestre a la atmósfera.



Una perspectiva de pensamiento sistémico



Influencias causales clave en este sistema: el aumento del uso de la tierra por el hombre ha dado lugar a una reducción de la cubierta vegetal, a la degradación del suelo y a la disminución de la retención de agua, lo que reduce directamente la evapotranspiración, aumentando la temperatura del suelo y repercutiendo, a su vez, en el aumento de la temperatura mundial. El aumento de la vegetación en la tierra incrementará la fertilidad del suelo y la recarga de las aguas subterráneas, lo que aumentará la evapotranspiración y dará lugar a un aumento de la nubosidad y de las precipitaciones. El aumento de la nubosidad causa un mayor enfriamiento atmosférico debido a la reflexión adicional de la radiación solar entrante, así como un aumento de la transferencia de energía de vuelta al espacio, lo que en conjunto tiene efectos reguladores sobre el calentamiento de la Tierra. Cuando esta retroalimentación de equilibrio se debilita, una tierra más caliente dará lugar a más sequías, agravadas por la reducción de las precipitaciones, y a más incendios de la vegetación que, a su vez, calientan aún más la tierra. Estos ciclos pueden invertirse mediante políticas que promuevan un uso de la tierra que aumente la cubierta vegetal y mejore la retención de agua en el suelo. (+) La influencia actúa en la misma dirección, (-) la influencia actúa en la dirección opuesta.

¿Por qué es importante este tema?

De los aproximadamente 120.000 km³ de agua que caen sobre las superficies terrestres en forma de precipitaciones cada año, alrededor del 60% procede del océano, mientras que el 40% proviene de la tierra (ver **figura 2**)^{5,6}. Entre el 60% y el 80% de esta humedad atmosférica que proviene de la tierra procede de la transpiración de las plantas^{2,7,8}, lo que demuestra el importante papel que desempeña la vegetación en la alimentación del ciclo de las precipitaciones, así como en la transferencia de energía del suelo a la atmósfera superior. Hasta hace poco, se suponía que el impacto humano sobre el vapor de agua en la atmósfera era insignificante en

comparación con la evaporación de los océanos. Sin embargo, el impacto humano en el vapor de agua atmosférico se debe a los grandes cambios en la cubierta terrestre inducidos por el hombre, y no solo a las emisiones industriales, como se ha afirmado anteriormente. En efecto, estos cambios en la cubierta terrestre ejercen una gran influencia en los ciclos del vapor de agua atmosférico⁹⁻¹¹.

Casi la mitad de los bosques del mundo se han perdido desde el inicio de la agricultura (la mayor parte de la deforestación se ha producido a partir de 1950)^{12,13} y se han convertido en campos con mucha menos vegetación. ¿Qué impacto tienen estos enormes cambios de la cubierta terrestre inducidos por el hombre en los flujos de agua y energía de la Tierra?

Principales conclusiones

Los árboles como generadores de vapor de agua

Cada árbol del bosque es una fuente de agua, que la extrae del suelo por sus raíces; la bombea a través del tronco, las ramas y las hojas, y la libera como vapor de agua a través de los poros de su follaje hacia la atmósfera. En un día soleado normal, un solo árbol puede transpirar varios cientos de litros de agua, enfriando su entorno con una potencia de 70 kWh por cada 100 litros, lo que representa un efecto de enfriamiento equivalente al de dos aires acondicionados domésticos funcionando durante 24 horas^{14,15}. Los árboles, que se cuentan por miles de millones, crean gigantes ríos de agua en el aire ("ríos voladores") —ríos que forman nubes y generan precipitaciones a cientos o incluso miles de kilómetros (**figura 3**)^{16,17}—.

La evapotranspiración como fuente de precipitaciones

A escala mundial, entre el 40% y el 60% de la lluvia que cae sobre la tierra procede de la humedad generada por la evapotranspiración terrestre a barlovento, principalmente por la transpiración de los árboles^{11,14,18-20}. En algunas regiones del mundo, la proporción alcanza el 70% de las precipitaciones¹¹. Este reciclaje se hace más dominante hacia el interior (**figura 4**).

Los bosques tropicales perennes de hoja ancha solo ocupan alrededor del 10% de la superficie terrestre, pero contribuyen con el 22% de la evapotranspiración mundial²², lo que pone de manifiesto su importancia para el ciclo hidrológico suprarregional. Las distancias típicas que recorre la humedad evaporada de la tierra en la atmósfera antes de volver a caer a la tierra son del orden de 500-5000 km; la escala temporal típica oscila entre 8 y 10 días^{23,24}. Por ejemplo, la humedad que se evapora desde el continente euroasiático es responsable del 80% de los recursos hídricos de China¹¹. La principal fuente de precipitaciones en la cuenca del Congo es la humedad que se evapora sobre el este de África, mientras que, a su vez, es una importante fuente de humedad para las precipitaciones en el Sahel¹¹. El estado de la selva tropical de África Occidental es especialmente importante para el caudal del Nilo²⁵. Esto explica por qué incluso en las principales cuencas fluviales, como las del Amazonas, el Congo y el Yangtze, las precipitaciones están más influenciadas por los cambios en el uso de la tierra que se producen fuera de la cuenca que dentro de ella. Incluso en algunas cuencas

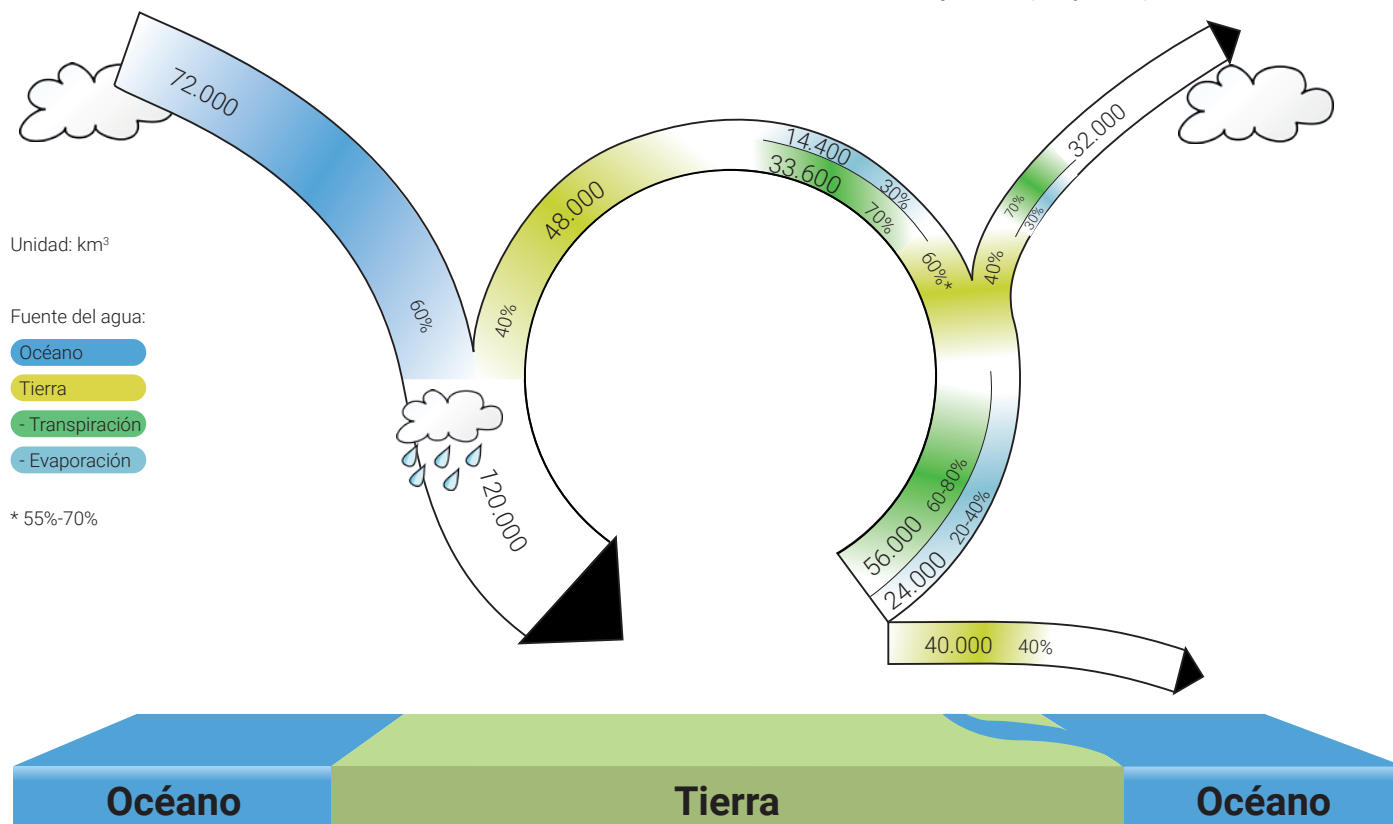


Figura 2: Flujos de agua mundiales. De los 120.000 km³ de lluvia que caen en los continentes, 72.000 km³ provienen del océano y 48.000 km³, de la tierra. De ellos, entre el 60% y el 80% procede de la transpiración de las plantas y entre el 20% y el 40%, de las masas de agua y los suelos. A través de la humedad del aire, 32.000 km³ derivados de la evapotranspiración terrestre vuelven al océano; 40.000 km³ se drenan a través de los ríos hacia los océanos.¹¹

Gráfico: Stefan Schwarzer, ONU Medio Ambiente/Base de Datos sobre Recursos Mundiales (GRID)-Ginebra

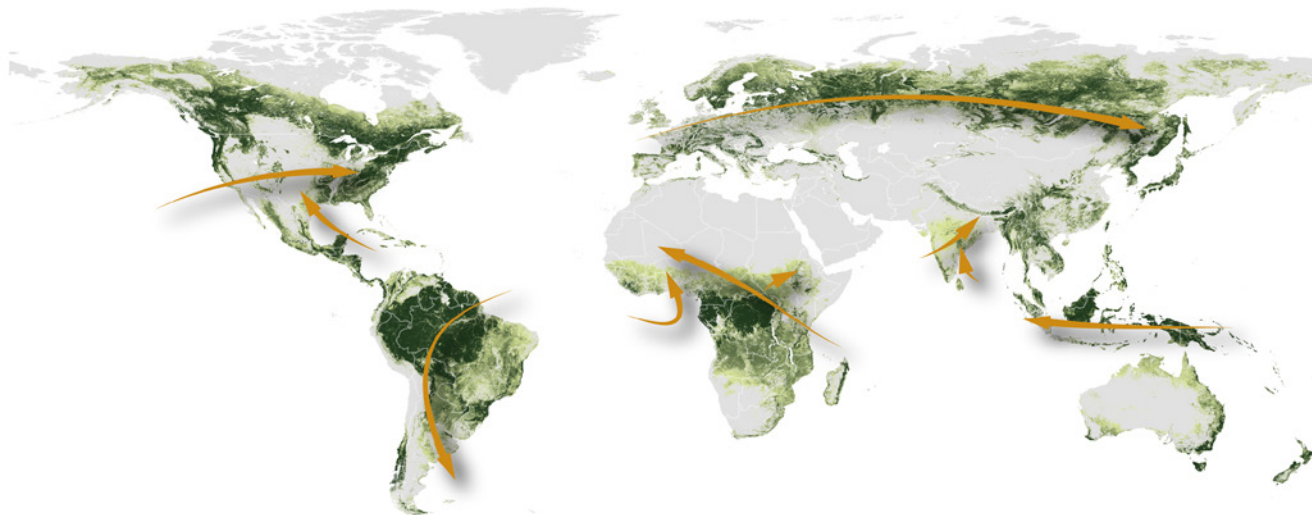
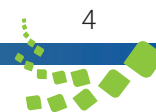


Figura 3: Los ríos transportan el vapor de agua a través de largas distancias cubiertas por los bosques, que desempeñan un papel esencial en la creación de este vapor, actuando como una enorme bomba de agua al absorber y liberar miles de millones de litros de agua en forma de humedad. Gráfico: Modificado a partir de Pearce⁷². Reimpreso con el permiso de la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia (AAAS)

fluviales que no abarcan más de un país, los caudales se vieron considerablemente afectados por el uso de la tierra en otros países²⁶.

Cambio en el uso de la tierra y alteración de los flujos de calor

Los modelos muestran que los cambios locales de bosques o praderas a tierras de cultivo reducen su evapotranspiración terrestre anual entre un 30% y un 40%²⁷. A escala mundial, el cambio de la cubierta terrestre entre el año 1950 y el año 2000 redujo la evapotranspiración terrestre anual entre un 4% y un 5% o entre 3.000 y 3.500 km³, y aumentó la escorrentía de las aguas superficiales en un 6,8%^{27,28}. Los científicos descubrieron, por otro lado, que el aumento de la vegetación tiene un efecto de enfriamiento que proviene de una mayor eficiencia en el movimiento vertical de calor y vapor de agua entre la superficie de la tierra y la atmósfera²⁹.

Cambios en los patrones atmosféricos debidos a la deforestación

Las observaciones satelitales sugieren que los bosques tienen una gran influencia en la formación de nubes, no solo en los trópicos, sino también en las zonas templadas: la desaparición de los bosques puede provocar una

disminución significativa de la nubosidad local y, por tanto, de las precipitaciones³⁰. La modelización ha demostrado que la extensa deforestación mundial que tuvo lugar entre los años 1700 y 1850 provocó una disminución de las precipitaciones monzónicas sobre el subcontinente indio y el sudeste de China y un debilitamiento asociado de la circulación del

monzón de verano en Asia³¹. En los trópicos, la convección de cúmulos profundos se ha visto considerablemente alterada como resultado de los cambios en el paisaje (principalmente de la conversión de bosques en tierras de cultivo). Esto no solo afecta a las precipitaciones locales, sino que también tiene un impacto a larga distancia a través de procesos conocidos como "teleconexiones". Estas teleconexiones pueden tener efectos en latitudes más altas, lo que altera significativamente el clima en esas regiones^{10,25,32,33}. Incluso las perturbaciones relativamente pequeñas de la cubierta terrestre en los trópicos pueden tener consecuencias en latitudes más altas^{34,35}, como, por ejemplo, las conexiones entre el Amazonas y el noroeste de los Estados Unidos de América³⁶. La desaparición de los bosques también puede ocasionar una disminución de las precipitaciones y una prolongación de las estaciones secas a nivel local, como se ha constatado, por ejemplo, en Rondônia (Brasil)³⁷ o en Borneo, donde se ha observado que las cuencas hidrográficas con mayor pérdida de bosques han sufrido una reducción del 15% de las precipitaciones³⁸. En la India, los patrones de disminución de las precipitaciones durante el monzón indio coinciden con el cambio de la cubierta forestal en el país, debido a la reducción de la evapotranspiración y la consiguiente disminución del componente reciclado de las precipitaciones³⁹. Esto demuestra los grandes patrones de flujos de vapor de agua y precipitaciones.

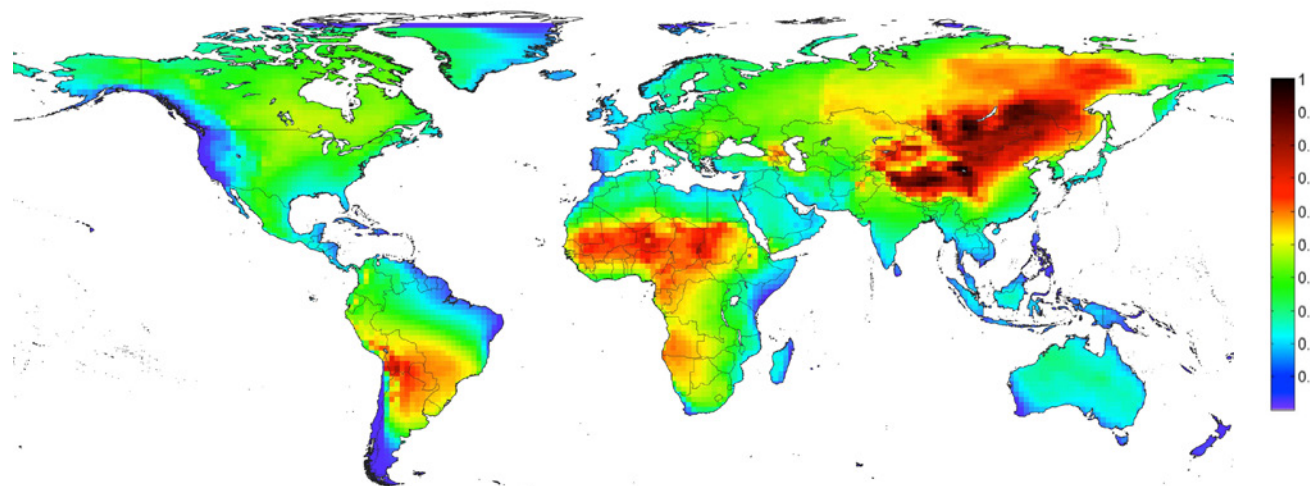


Figura 4: Relación media de reciclaje de las precipitaciones continentales (1999-2008). Cuanto más alto sea el número, más precipitaciones provienen de la evapotranspiración terrestre^{11,21}.

Rerradiación del suelo desnudo

Normalmente, a causa de la evapotranspiración, más del 50% de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se convierte en calor latente, que, a su vez, se transfiere a la atmósfera, alimentando el ciclo de las precipitaciones, y se irradia parcialmente hacia el espacio.

En las superficies desnudas —como, por ejemplo, los campos en barbecho o los prados secos (en la época estival y después de la cosecha del heno)— y en las superficies de hormigón o asfalto, el suelo absorbe más radiación solar incidente, se calienta, crea calor sensible y emite, de forma proporcional a la cuarta potencia de su temperatura

absoluta (Ley de Stefan-Boltzman), energía térmica a la atmósfera (**figura 5, figura 6**).

Las diferencias en la temperatura de la superficie entre estas superficies desnudas y las zonas boscosas pueden ser, según un ejemplo de Europa Central, de hasta 20 °C en las tardes de verano (**figura 7**)⁴⁰. En la isla indonesia de Sumatra, se encontraron diferencias de temperatura entre los bosques y los terrenos despejados de hasta 10 °C, lo que se explica, de nuevo, por un efecto de enfriamiento por evaporación de los bosques, que supera el efecto de calentamiento del albedo generado por las superficies boscosas más oscuras⁴¹.

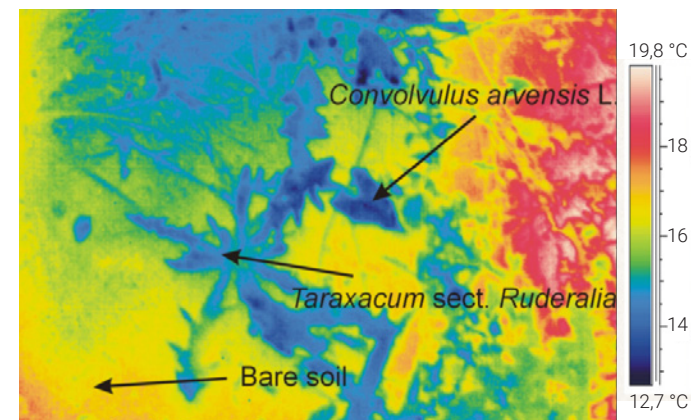
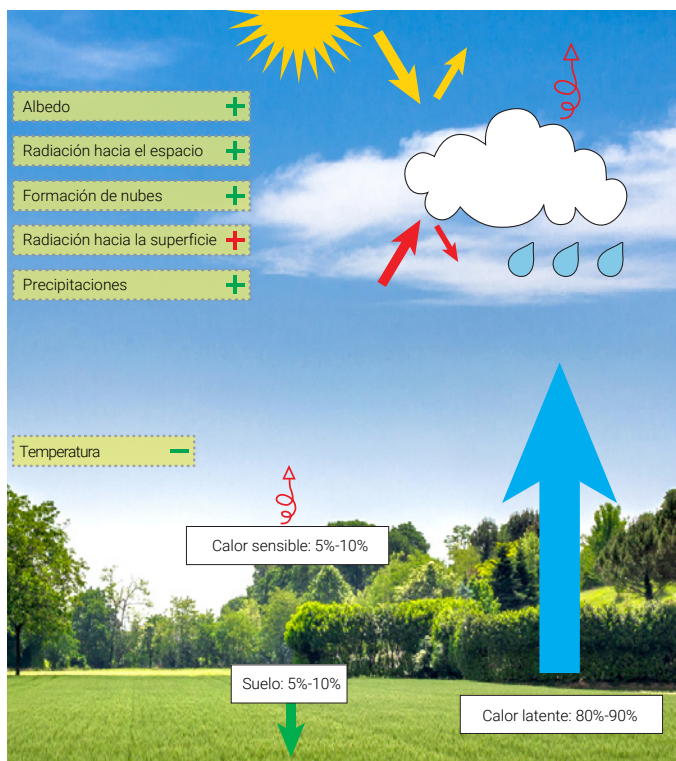


Figura 6: La misma extensión de vegetación escasa fotografiada en el espectro infrarrojo y en el espectro visible. La superficie desnuda del suelo está visiblemente más caliente que la superficie de las hojas enfriadas por la transpiración⁹.

Esto pone de manifiesto el hecho de que los procesos biofísicos locales desencadenados por la pérdida de bosques pueden aumentar efectivamente las temperaturas estivales en todas las regiones del mundo⁴².

La deforestación histórica ha reducido el flujo de calor latente en la tierra y ha aumentado el calor sensible en el suelo⁴³⁻⁴⁷. La deforestación ha causado un calentamiento significativo en el decenio comprendido entre 2003 y 2013, de hasta 0,28 °C en las tendencias de temperatura media en

Figura 5: La evapotranspiración disminuye la temperatura del suelo y aumenta el albedo de las nubes, la radiación al espacio durante el proceso de condensación, la formación de nubes y, por tanto, las precipitaciones. La eliminación de la vegetación aumenta la temperatura a nivel del suelo, emite un aumento exponencial de la energía térmica con el incremento de la temperatura del suelo, crea zonas de alta presión que dificultan el paso de masas de aire de baja presión (y, por tanto, húmedas), disminuye el potencial de formación de nubes y, en consecuencia, reduce las precipitaciones
Gráfico: Stefan Schwarzer, ONU Medio Ambiente/Base de Datos sobre Recursos Mundiales (GRID)-Ginebra

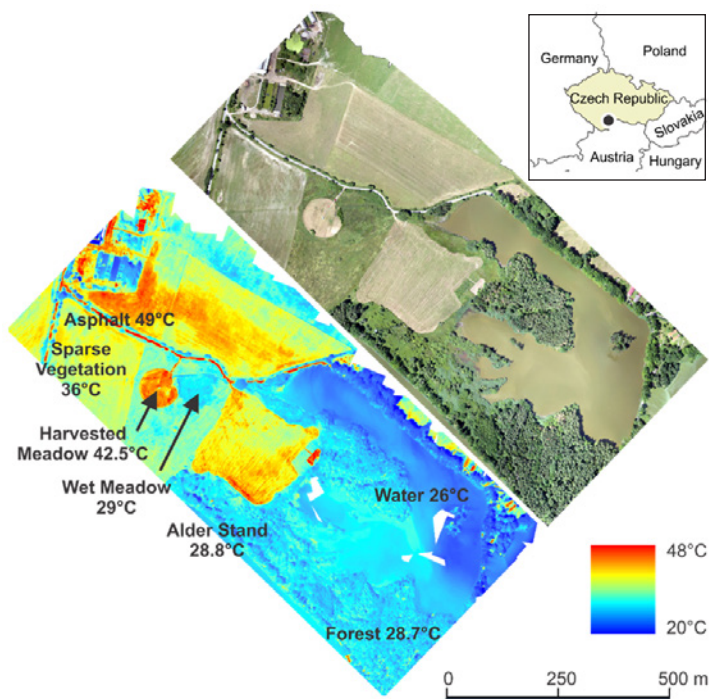
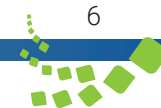


Figura 7: Distribución de la temperatura terrestre en un paisaje mixto^{14,40}.

las regiones tropicales, y un fuerte calentamiento, de hasta 0,32 °C, en las regiones templadas del sur⁴⁸. Al ritmo actual de deforestación, la pérdida de bosques tropicales podría añadir 1,5 °C a las temperaturas globales en 2100, sin tener en cuenta otros aumentos de temperatura producidos por el hombre⁴⁹.

Entre los años 1950 y 2000, la temperatura de la superficie aumentó 0,3 °C en todo el mundo debido a los cambios en la cubierta terrestre²⁷. Las alteraciones en el balance energético de la superficie generadas por el cambio de vegetación entre 2000 y 2015 han provocado un aumento medio de 0,23 °C en la temperatura local de la superficie donde se produjeron esos cambios de vegetación⁵⁰. El calentamiento medio debido a los cambios en la cubierta terrestre es responsable de entre el 18% y el 40% de las tendencias actuales de calentamiento global a causa de la reducción de la evapotranspiración, a pesar del aumento del albedo de la superficie^{42,51,52}.

Aerosoles biogénicos para la formación de nubes

Además de la importancia de los bosques para los flujos de energía y la formación de precipitaciones, los grandes bosques parecen ser reactores biogeoquímicos, en los que la biosfera y la fotoquímica atmosférica producen núcleos para la formación de nubes y precipitaciones, manteniendo así el ciclo hidrológico⁵³. Los árboles producen compuestos orgánicos volátiles y “liberan” microorganismos —bacterias y esporas de hongos, polen y otros restos biológicos— que viven en las hojas y se transportan por el aire durante y después de las lluvias en los ecosistemas forestales⁵⁴⁻⁵⁷. En la atmósfera, forman una parte importante de la condensación de las nubes y de los núcleos de hielo, influyendo a su vez en la formación de nubes y en las precipitaciones^{53,54,57-59}. Los aerosoles biogénicos pueden contribuir además a elevar la temperatura de congelación creando núcleos de hielo. Sin este fenómeno, la congelación no se produciría hasta que las nubes alcanzaran los -15 °C o menos; con la ayuda de estos núcleos de hielo, el proceso puede lograrse a temperaturas cercanas a los 0 °C, lo que permite la formación eficiente de nubes y la generación de lluvia con mayor facilidad y de forma local⁵⁹⁻⁶².



Crédito de la fotografía: Shutterstock.com



Crédito de la fotografía: Shutterstock.com

Los océanos, un amortiguador en dos direcciones

Un tercio de las emisiones antropogénicas de CO₂ y más del 90% del calor antropogénico adicional emitido a la atmósfera han sido absorbidos y amortiguados por los océanos. Al hablar del aumento de la temperatura mundial, debemos ser conscientes de que solo vemos ~10% del efecto total^{63,64}.

La amortiguación del CO₂ a cargo de los océanos se produce también en la dirección opuesta: Cuando recuperamos el CO₂ de la atmósfera para disminuir las concentraciones atmosféricas de CO₂, los océanos vuelven a emitir CO₂ debido a la diferencia de presión de gas recién creada, intentando recuperar un equilibrio de concentración de CO₂ entre la atmósfera y el océano. Por lo tanto, en períodos de tiempo más cortos, difícilmente se producirá una rápida disminución del CO₂ en la atmósfera, incluso si logramos a) detener las emisiones de CO₂ y b) desarrollar soluciones naturales o técnicas de fijación del CO₂.

¿Cuáles son las implicaciones para las políticas?

La vegetación, los suelos fértiles y la retención de agua deben ser reconocidos como los principales reguladores de los ciclos del agua, la energía y el carbono. A continuación se enumeran algunas de las implicaciones en materia de políticas:

- Ser conscientes de los **bucles de retroalimentación positiva**: Como ya se ha explicado, cuando se talan los bosques, la superficie terrestre y el clima se vuelven más secos y cálidos. Esto conduce a condiciones que exacerban el riesgo de incendios forestales y de la vegetación, que emiten más CO₂ y causan más deforestación, creando así un círculo vicioso^{68,69}. El cambio climático, la deforestación, la sequía y los incendios forestales forman un triple bucle de retroalimentación que se refuerza mutuamente (**figura 8**).
- Dadas las teleconexiones de los grandes ecosistemas forestales, debería considerarse que proporcionan **bienes públicos mundiales**. El mecanismo de reducción de las emisiones debidas a la deforestación y la degradación forestal (REDD+) desarrollado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) podría, por ejemplo, ofrecer un modelo para reconocer y financiar los servicios internacionales de agua y energía que proporcionan estos bosques.
- Las regiones forestales especialmente importantes y **sensibles** deberían protegerse y gestionarse en consecuencia.
- Es de suma importancia **detener la deforestación** y aumentar las medidas de **reforestación** en todo el mundo.



Crédito de la fotografía: Shutterstock.com

iii La agrosilvicultura es la integración de árboles o arbustos en campos agrícolas y pastos.

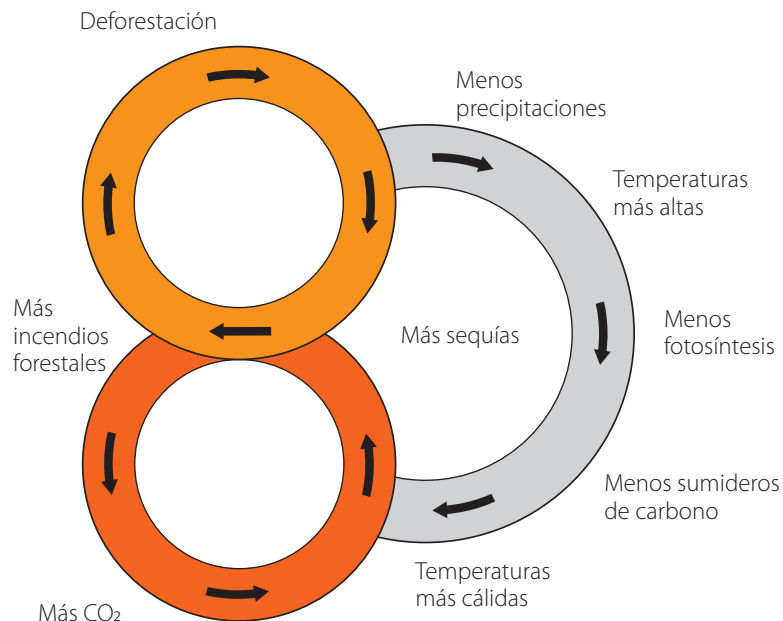


Figura 8: Debido a la naturaleza interrelacionada de los incendios forestales, la deforestación, la sequía y el cambio climático, para describir la complejidad del conjunto interconectado no alcanza con aislar uno de los procesos⁶⁵⁻⁶⁷.

- Las prácticas agrícolas deben centrarse en la **construcción del suelo**, la **cobertura del suelo** con plantas durante todo el año y el uso de métodos de **agrosilvicultura**ⁱⁱⁱ.

Conclusión

Es importante comprender que los ciclos del carbono, el agua y la energía están íntimamente unidos en la tierra. Restablecer los ciclos de humedad atmosférica y terrestre en la vegetación, los suelos y la atmósfera es de suma importancia para enfriar el planeta y asegurar los patrones de precipitación en todo el mundo. La desecación del paisaje terrestre es el precio del fracaso.

Es imprescindible detener la deforestación, aumentar la reforestación y aplicar prácticas agroforestales si queremos evitar con éxito una catástrofe climática. Se requiere un enfoque de pensamiento sistémico para comprender y utilizar los patrones subyacentes a la formación de la lluvia. Devolver la lluvia a zonas como el Sahel requerirá algo más que plantar

árboles en la región; exigirá (re)construir los bosques desde la costa para atraer el aire húmedo del océano hacia la tierra⁷⁰.

Al mismo tiempo, el aumento de la fertilidad del suelo, la retención de agua y la protección del suelo mediante las prácticas del movimiento orgánico regenerativo (ver los Informes Foresight del PNUMA 010 y 013), como la cobertura vegetal durante todo el año mediante cultivos de cobertura y el subsebrado o la aplicación de la agrosilvicultura, representan otro enfoque importante para alimentar los ciclos del agua y la energía. Encontrar formas de construir materia orgánica adicional en el suelo es una de las claves del éxito para grandes áreas del mundo actualmente cultivadas.

En términos generales, necesitamos un cambio de paradigma, en el que se valoren los efectos hidrológicos y de enfriamiento del clima de la vegetación en general y de los bosques en particular, junto con su potencial de secuestro de carbono. Los efectos de la cubierta vegetal —y especialmente de los árboles— sobre el clima a escala local, regional y continental ofrecen beneficios que exigen un mayor reconocimiento^{14,32,71}.

Agradecimientos

Autores

Stefan Schwarzer, ONU Medio Ambiente/Base de Datos sobre Recursos Mundiales (GRID)-Ginebra y Universidad de Ginebra

Revisores externos

David Ellison, Universidad de Berna
Prof. Douglas Sheil, Universidad de Wageningen
Lera Miles, Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (CMVC-PNUMA)
Eleanor Milne, Universidad del Estado de Colorado

Revisores del PNUMA

Angeline Djampou, Barnabas Dickson, Gabriel Labbate, Jane Muriithi, Kaisa Uusimaa, Magda Biesiada, Pascal Peduzzi, Rachel Kosse, Samuel Opiyo, Tim Christophersen, Virginia Gitari, Ying Wang

Equipo de los Informes Foresight del PNUMA

Alexandre Caldas, Sandor Frigyi, Audrey Ringler, Esther Katu, Erick Litswa, Pascil Muchesia

Inspirado en una charla de Walter Jehne

Descarga de responsabilidad

Las designaciones utilizadas y las presentaciones no implican la expresión de ningún tipo de opinión por parte del PNUMA ni de los organismos colaboradores con relación a la condición jurídica de ningún país, territorio, ciudad o área, o de sus autoridades, ni con respecto a la delimitación de sus fronteras o límites.

© Mapas, fotografías e ilustraciones según se especifica.

Contacto

unep-foresight@un.org



Para consultar la edición actual y las ediciones anteriores en línea y descargar los Informes Foresight del PNUMA, acceda a:

<https://wesr.unep.org/foresight>

Bibliografía

- Pokorny, J. *et al.* "Solar energy dissipation and temperature control by water and plants". *International Journal of Water* 5, 311 (2010).
- Jasechko, S. *et al.* "Terrestrial water fluxes dominated by transpiration". *Nature* 496, 347–350 (2013).
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. T. & Kiehl, J. "Earth's Global Energy Budget". *Bulletin of the American Meteorological Society* 90, 311–324 (2009).
- Wang, K. & Dickinson, R. E. "A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability: GLOBAL TERRESTRIAL EVAPOTRANSPIRATION". *Reviews of Geophysics* 50, (2012).
- Ellison, D., Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. & van Noordwijk, M. "Upwind forests: managing moisture recycling for nature-based resilience". *Unasylva* 70, 13 (2019).
- Schneider, U. *et al.* "Evaluating the Hydrological Cycle over Land Using the Newly-Corrected Precipitation Climatology from the Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)". *Atmosphere* 8, 52 (2017).
- Schlesinger, W. H. & Jasechko, S. "Transpiration in the global water cycle". *Agricultural and Forest Meteorology* 189–190, 115–117 (2014).
- Wei, Z. *et al.* "Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration: Revisiting Global ET Partitioning". *Geophysical Research Letters* 44, 2792–2801 (2017).
- Kravčík, M., Pokorný, J., Kohutiar, J., Kováč, M. & Tóth, E. *Water for the Recovery of the Climate - A New Water Paradigm*, 94 (2007).
- Mahmood, R. *et al.* "Land cover changes and their biogeophysical effects on climate: LAND COVER CHANGES AND THEIR BIOGEOPHYSICAL EFFECTS ON CLIMATE". *International Journal of Climatology* 34, 929–953 (2014).
- van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaefli, B. & Steele-Dunne, S. C. "Origin and fate of atmospheric moisture over continents". *Water Resources Research* 46, (2010).
- Crowther, T. W. *et al.* "Mapping tree density at a global scale". *Nature* 525, 201–205 (2015).
- FAO. *El estado de los bosques del mundo 2012*. (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2012).
- Ellison, D. *et al.* "Trees, forests and water: Cool insights for a hot world". *Global Environmental Change* 43, 51–61 (2017).
- Pokorny, J. "What can a tree do?" (2012).
- Weng, W., Luedeke, M. K. B., Zemp, D. C., Lakes, T. & Kropp, J. P. "Aerial and surface rivers: downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia". *Hydro. Earth Syst. Sci.* 22, 911–927 (2018).
- Nobre, A. D. "The Future Climate of Amazonia". 42 (2014).
- Eltahir, E. A. B. & Bras, R. L. "Precipitation recycling in the Amazon basin". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120, 861–880 (1994).
- Keys, P. W., Wang-Erlandsson, L. & Gordon, L. J. "Revealing Invisible Water: Moisture Recycling as an Ecosystem Service". *PLOS ONE* 11, e0151993 (2016).
- Staal, A. *et al.* "Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon". *Nature Climate Change* 8, 539–543 (2018).
- van der Ent, R. J. *A new view on the hydrological cycle over continents*. (2014).
- Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R. J., Gordon, L. J. & Savenije, H. H. "G. Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle – Part 1: Temporal characteristics over land". *Earth System Dynamics* 5, 441–469 (2014).
- van der Ent, R. J. & Savenije, H. H. G. "Length and time scales of atmospheric moisture recycling". *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 1853–1863 (2011).
- van der Ent, R. J. & Tuinenburg, O. A. "The residence time of water in the atmosphere revisited". *Hydro. Earth Syst. Sci.* 21, 779–790 (2017).
- Gebrehiwot, S. G. *et al.* "The Nile Basin waters and the West African rainforest: Rethinking the boundaries". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6, e1317 (2019).
- Wang-Erlandsson, L. *et al.* "Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections". *Hydrology and Earth System Sciences* 22, 4311–4328 (2018).
- Sterling, S. M., Ducharme, A. & Polcher, J. "The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle". *Nature Climate Change* 3, 385–390 (2013).
- Gordon, L. J. *et al.* "Human modification of global water vapor flows from the land surface". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 7612–7617 (2005).
- Chen, C. *et al.* "Biophysical impacts of Earth greening largely controlled by aerodynamic resistance". *Sci. Adv.* 6, eab11981 (2020).
- Teuling, A. J. *et al.* "Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests". *Nature Communications* 8, (2017).
- Takata, K., Saito, K. & Yasunari, T. "Changes in the Asian monsoon climate during 1700–1850 induced by preindustrial cultivation". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, 9586–9589 (2009).
- Pielke, R. A. "Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall". *Reviews of Geophysics* 39, 151–177 (2001).
- Sheil, D. & Murydarso, D. How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis". *BioScience* 59, 341–347 (2009).
- Chase, T. N., Pielke Sr., R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. "Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter". *Climate Dynamics* 16, 93–105 (2000).
- Chase, T. N., Pielke, R. A., Kittel, T. G. F., Nemani, R. R. & Running, S. W. "Sensitivity of a general circulation model to global changes in leaf area index". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101, 7393–7408 (1996).
- Medvigy, D., Walko, R. L., Otte, M. J. & Avissar, R. "Simulated Changes in Northwest U.S. Climate in Response to Amazon Deforestation". *Journal of Climate* 26, 9115–9136 (2013).
- Coe, M. T. *et al.* "The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future". *Tropical Conservation Science* 10, 194008291772067 (2017).
- McAlpine, C. A. *et al.* "Forest loss and Borneo's climate". *Environmental Research Letters* 13, 044009 (2018).
- Paul, S. *et al.* "Weakening of Indian Summer Monsoon Rainfall due to Changes in Land Use Land Cover". *Scientific Reports* 6, (2016).
- Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J. & Rejšková – Procházková, A. "Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate". *Ecological Engineering* 54, 145–154 (2013).
- Sabajo, C. R. *et al.* "Expansion of oil palm and other cash crops causes an increase of the land surface temperature in the Jambi province in Indonesia". *Biogeosciences* 14, 4619–4635 (2017).
- Alkama, R. & Cescaati, A. "Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover". *Science* 351, 600–604 (2016).
- Bounoua, L., Defries, R., Collatz, G. J., Sellers, P. & Khan, H. "Effects of Land Cover Conversion on Surface Climate". 36 (2002).
- Brovkin, V. *et al.* "Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity". *Climate Dynamics* 26, 587–600 (2006).
- Pitman, A. J. *et al.* "Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study". *Geophysical Research Letters* 36, (2009).
- Pongratz, J., Reick, C. H., Raddatz, T. & Claussen, M. "Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change: CLIMATE EFFECTS OF HISTORICAL LAND COVER CHANGE". *Geophysical Research Letters* 37, (2010).
- Zhao, M., Pitman, A. J. & Chase, T. "The impact of land cover change on the atmospheric circulation". *Climate Dynamics* 17, 467–477 (2001).
- Li, Y. *et al.* "Potential and Actual impacts of deforestation and afforestation on land surface temperature: IMPACTS OF FOREST CHANGE ON TEMPERATURE". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121, 14,372-14,386 (2016).
- Mahowald, N. M., Ward, D. S., Doney, S. C., Hess, P. G. & Randerson, J. T. "Are the impacts of land use on warming underestimated in climate policy?". *Environmental Research Letters* 12, 094016 (2017).
- Duveller, G., Hooker, J. & Cescaati, A. "The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance". *Nature Communications* 9, (2018).
- Ban-Weiss, G. A., Bala, G., Cao, L., Pongratz, J. & Caldeira, K. "Climate forcing and response to idealized changes in surface latent and sensible heat". *Environmental Research Letters* 6, (2011).
- Wolosin, M. & Harris, N. "Tropical Forests and Climate Change: The Latest Science". *World Resources Institute* 14 (2018).
- Poschl, U. *et al.* "Rainforest Aerosols as Biogenic Nuclei of Clouds and Precipitation in the Amazon". *Science* 329, 1513–1516 (2010).
- Bigg, E. K., Soubeyrand, S. & Morris, C. E. "Persistent after-effects of heavy rain on concentrations of ice nuclei and rainfall suggest a biological cause". *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 2313–2326 (2015).
- Bowers, R. M. *et al.* "Characterization of Airborne Microbial Communities at a High-Elevation Site and Their Potential To Act as Atmospheric Ice Nuclei". *Applied and Environmental Microbiology* 75, 5121–5130 (2009).
- Conen, F., Eckhardt, S., Gundersen, H., Stohl, A. & Yttri, K. E. "Rainfall drives atmospheric ice-nucleating particles in the coastal climate of southern Norway". *Atmospheric Chemistry and Physics* 17, 11065–11073 (2017).
- Joung, Y. S., Ge, Z. & Buie, C. R. "Bioaerosol generation by raindrops on soil". *Nature Communications* 8, (2017).
- Després, Viviane R. *et al.* "Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review". *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* 64, 15598 (2012).
- Morris, C. E. *et al.* "Bioprecipitation: a feedback cycle linking Earth history, ecosystem dynamics and land use through biological ice nucleators in the atmosphere". *Global Change Biology* 20, 341–351 (2014).
- Christner, B. C., Morris, C. E., Foreman, C. M., Cai, R. & Sands, D. C. "Ubiquity of Biological Ice Nucleators in Snowfall". *Science* 319, 1214–1214 (2008).
- Lazaridis, M. "Bacteria as Cloud Condensation Nuclei (CCN) in the Atmosphere". *Atmosphere* 10, 786 (2019).
- Morris, C. E., Soubeyrand, S., Bigg, E. K., Creamean, J. M. & Sands, D. C. "Mapping Rainfall Feedback to Reveal the Potential Sensitivity of Precipitation to Biological Aerosols". *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, 1109–1118 (2017).
- Cheng, L. *et al.* "Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019". *Advances in Atmospheric Sciences* 37, 137–142 (2020).
- Portner, H. O. *et al.* "Resumen para responsables de políticas", en: *Informe especial sobre los océanos y la criosfera en un clima cambiante del IPCC*, (2019).
- Hasler, N., Werth, D. & Avissar, R. "Effects of Tropical Deforestation on Global Hydroclimate: A Multimodel Ensemble Analysis". *Journal of Climate* 22, 1124–1141 (2009).
- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Giglio, L., Gobron, N. & Dolman, A. J. "Climate controls on the variability of fires in the tropics and subtropics: CLIMATE CONTROLS ON FIRES". *Global Biogeochem. Cycles* 22, n/a-n/a (2008).
- Zhao, M. & Running, S. W. "Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009". *Science* 329, 940–943 (2010).
- Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: *Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Cambridge University Press, 2012). doi:10.1017/CBO9781139177245.
- Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal. *Global Fire Challenges in a Warming World*. (2018).
- Ellison, D. & Speranza, C. I. "From blue to green water and back again: Promoting tree, shrub and forest-based landscape resilience in the Sahel". *Science of The Total Environment* 739, 140002 (2020).
- Lemondant, L., Gentine, P., Swann, A. S., Cook, B. I. & Scheff, J. "Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrologic cycle in response to increasing CO₂". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115, 4093–4098 (2018).
- Pearce, F. "Forests supply the world with rain. A controversial Russian theory claims they also make wind". *Science | AAAS* <https://www.sciencemag.org/news/2020/06/controversial-russian-theory-claims-forests-dont-just-make-rain-they-make-wind> (2020).

