

# Capítulo 22 En Resumen

Variabilidad a largo plazo, valores extremos, y cambios en temperatura e hidrometeorología



Cheia do rio Negro no centro de Manaus 2021 (Foto: Alberto César Araújo/Amazônia Real)



**THE AMAZON WE WANT**  
Science Panel for the Amazon

# Variabilidad a largo plazo, valores extremos, y cambios en temperatura e hidrometeorología en la región Amazónica

Jose Antonio Marengo<sup>a</sup>, Jhan-Carlo Espinoza<sup>b</sup>, Rong Fu<sup>c</sup>, Juan Carlos Jimenez Muñoz<sup>d</sup>, Lincoln Muniz Alves<sup>e</sup>, Humberto Ribeiro da Rocha<sup>f</sup>, Jochen Schöngart<sup>g</sup>

## Mensajes claves y recomendaciones

- 1) Los cambios en el uso de la tierra han amplificado los riesgos de incendios y la vulnerabilidad humana y del sistema terrestre.
- 2) A largo plazo, los extremos de la variabilidad climática podrían tener un gran impacto en los ciclos hidrológicos en la región, en la resiliencia de la biodiversidad y en la estructura forestal, con implicaciones en la región y en el clima global.
- 3) La prolongación de la estación seca, los cambios en la frecuencia e intensidad de episodios extremos de sequía amenazan tanto a la sociedad como a los ecosistemas y su fauna. Registros recientes demuestran que, desde la década de 1970, la estación seca o de menos lluvia se ha extendido más de un mes en la parte sur de la Amazonía.
- 4) Hay una necesidad urgente de rescatar datos y fomentar una mejor integración y una comparabilidad de los estudios entre los países de la Amazonía, incluyendo el libre acceso para la comunidad científica.
- 5) Deberán generarse bancos de datos con series climáticas e hidrológicas de alta resolución espacial y temporal para la Amazonía, mediante la cooperación entre los servicios meteorológicos estatales y nacionales, las agencias climáticas internacionales y las universidades, así como bancos de datos privados.
- 6) La población y los actores políticos deben estar mejor instruidos en materia de clima, hidrología y ciencias atmosféricas, especialmente en lo que respecta a los impactos del uso de la tierra y el cambio climático en la subsistencia de las personas. Los conocimientos locales y culturales son fuentes invaluableles de información sobre el clima.

**Resumen** En este capítulo se describen los cambios observados y proyectados en los patrones climáticos y extremos de temperatura, caudal de los ríos y precipitaciones en la región Amazónica, así como sus impactos en la población y biodiversidad cuando posibles umbrales son traspasados. Se hace hincapié en el efecto de los extremos climáticos sobre la biodiversidad y los procesos ecológicos.

**Temperatura** El calentamiento en la región es un hecho, pero la magnitud en su tendencia varía según conjuntos de datos y períodos de tiempo utilizados. La tendencia de calentamiento es evidente desde el año 1980 y es aún más significativa desde el 2000<sup>1-8</sup>. Registros históricos señalan una tendencia para un clima más cálido en todas las estaciones del año, con una mayor intensidad entre junio y agosto (JJA), y también en el periodo de septiembre a noviembre

<sup>a</sup> Centro Nacional de Monitoreo y Alertas de Desastres Naturales CEMADEN, Estrada Doutor Altino Bondesan, 500 - Distrito de Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP, CEP:12.247-060. jose.marengo@cemaden.gov.br

<sup>b</sup> Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE) - Institut de Recherche pour le Développement (IRD), 70 Rue de la Physique, Bat. OSUG- B. Domaine Universitaire 38400 Saint Martin d'Heres, Francia.

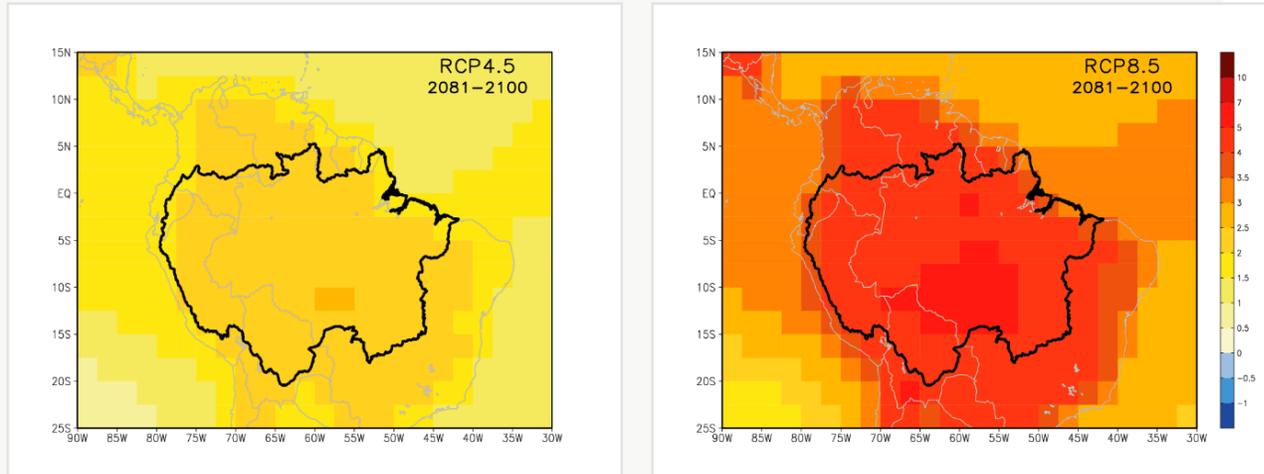
<sup>c</sup> Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of California-Los Angeles, 520 Portola Plaza, Math Sciences Building, 7127, Los Angeles CA 90095, EE. UU.

<sup>d</sup> Global Change Unit (GCU) of the Image Processing Laboratory (IPL), Universitat de València Estudi General (UEVG), C/ Catedrático José Beltrán 2, 46980 Paterna, Valencia, España.

<sup>e</sup> Centro de Ciências del Sistema Terrestre / Instituto Nacional para la Investigación del Espacio, Av. dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja, Brasil.

<sup>f</sup> Departamento de Ciências Atmosféricas/ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/ Universidade de São Paulo, Rua do Matão, 1226, São Paulo SP 05508-090, Brasil

<sup>g</sup> Instituto Nacional para la Investigación de la Amazonia (INPA), Departamento Dinámico de Medioambiente 2936, Av. André Araújo, Manaus, Amazonas 69067-375, Brasil



**Figura 22.1** Cambio porcentual promedio del multimodelo CMIP5 en la temperatura media anual del aire cerca de la superficie, en relación con el período de referencia 1986-2005, promediado sobre el período 2081-2100, bajo los escenarios forzados RCP4.5 y 8.5.

(SON). Se observa un patrón de contraste de este a oeste, con tasas de calentamiento sobre la parte este de la Amazonía de casi el doble de aquel del lado oeste. Esto puede atribuirse a los efectos del cambio de la cobertura del suelo y a la consiguiente alteración del balance energético<sup>9</sup>.

Fuertes eventos de El Niño, –como los ocurridos en los años 1997/98 y 2015/16–, tienen una importante influencia en las temperaturas del aire en la región central de la cuenca del Amazonas<sup>3,10</sup>. Por ejemplo, en septiembre de 2015 el promedio mensual de las temperaturas máximas y mínimas diarias fue 2,2°C a 2,3°C más alto en comparación al promedio mensual de los cinco años previos.

**Hidrología** Las tendencias históricas de las precipitaciones en la Amazonía varían considerablemente entre los diferentes estudios, dependiendo del conjunto de datos, el período y la duración de la serie temporal, la época del año y la región evaluada<sup>2,11-13</sup>. La mayoría de los registros pluviométricos modernos comienzan en la década de 1960, lo que dificulta la cuantificación de las tendencias en la región amazónica antes de eso. Varios estudios han reportado

una intensificación del ciclo hidrológico y una prolongación de la estación seca en el sur de la Amazonía, mientras que en el norte de ésta se experimentó un aumento en la frecuencia de las precipitaciones extremas y de los consiguientes eventos de inundaciones<sup>10,14-19</sup>. Se observan también significativas disminuciones de las precipitaciones en el este de la Amazonía.

El calentamiento sustancial del Atlántico tropical desde la década de 1990 desempeña un papel central en la hidrología de la región, aumentando el vapor de agua atmosférico importado por los vientos alisios hacia el norte de la cuenca amazónica e incrementando las precipitaciones, especialmente durante las estaciones pre lluviosas y húmedas<sup>14,19,20</sup>. El enfriamiento simultáneo del Pacífico ecuatorial durante este período refuerza la circulación Walker y la convección profunda sobre la Amazonía<sup>15,19,21</sup>.

En las regiones bajas de la Amazonía de Colombia, Ecuador y el norte del Perú, las precipitaciones han aumentado desde la década de 1990<sup>8,12,17,22</sup>, donde se ha documentado un crecimiento de alrededor del 17% durante la estación húmeda<sup>18</sup>. El aumento de

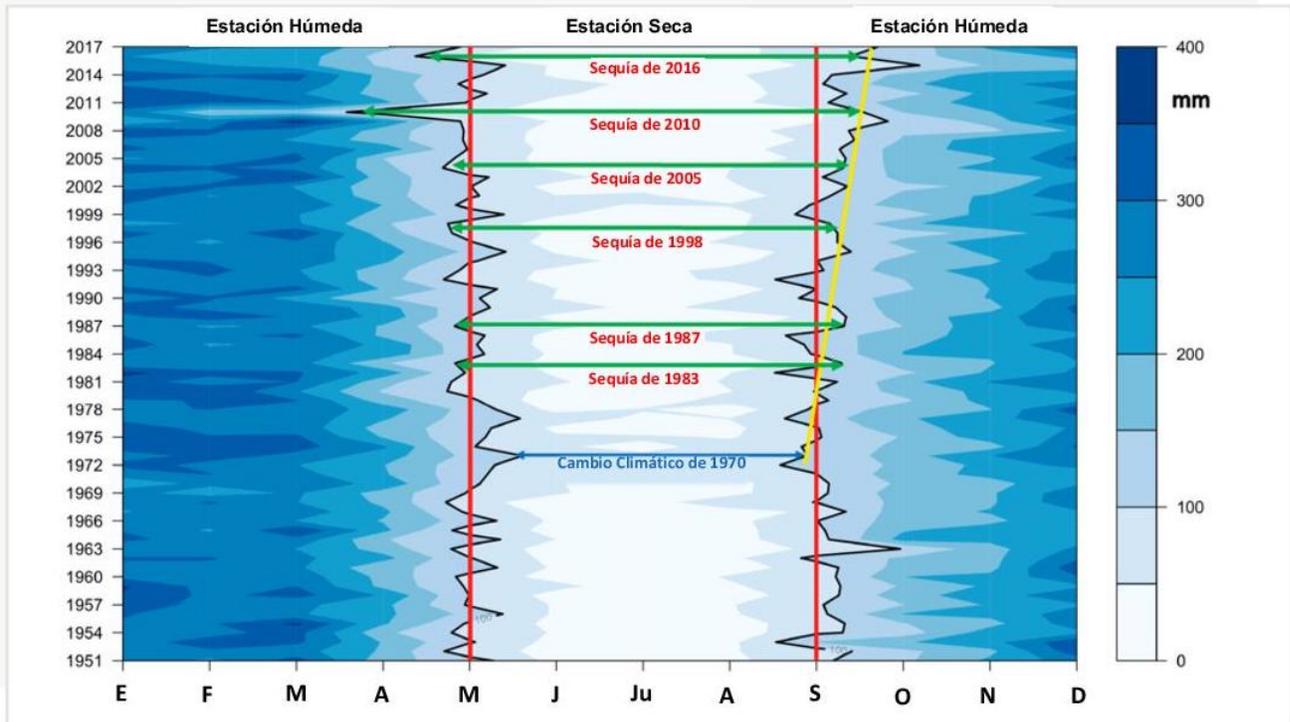
las precipitaciones en el noroeste de la Amazonía Andina contribuye actualmente a la intensificación de las inundaciones extremas de las últimas tres décadas<sup>15</sup>.

La parte sur de las cuencas andino-amazónicas peruanas presentan una disminución en las precipitaciones desde mediados de la década de 1960<sup>7,20,23-27</sup> y, en consecuencia, una disminución de la descarga durante la época de estiaje. En la Amazonía boliviana, la disminución de las precipitaciones se observa principalmente en la parte sur de la cuenca boliviana del Madeira<sup>12,28,29</sup>.

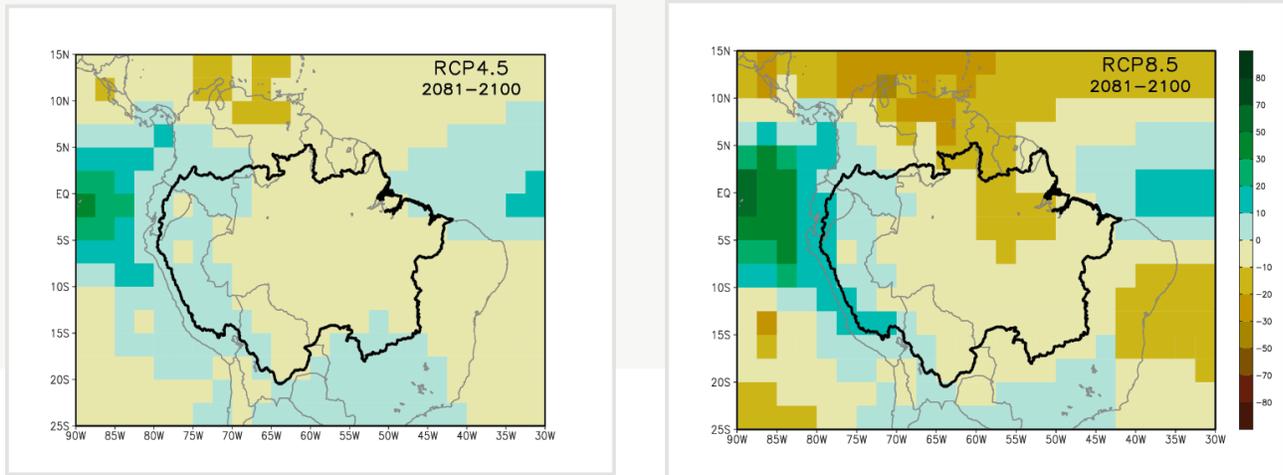
**Influencias humanas** Otros factores que provocan variaciones en el ciclo hidrológico están relacionados con los cambios en el uso de la tierra, como la deforestación a gran escala en las zonas de captación para la agricultura y la ganadería<sup>9,20,30</sup>, y la construcción de centrales hidroeléctricas<sup>31</sup>. Las

represas hidroeléctricas pueden provocar cambios masivos y bruscos en los regímenes de caudales, lo que da lugar a complejas alteraciones espaciotemporales en las llanuras de inundación situadas río abajo de las presas<sup>32</sup>. Las múltiples represas que se construyen o planean construir en las cuencas de los ríos Tapajós, Xingú, Tocantíns-Araguaia, Marañón y otros ríos tendrán efectos acumulativos y en cascada en el ciclo hidrológico río abajo<sup>33</sup>, incluyendo pérdidas masivas de biodiversidad y de servicios ambientales de los que depende la sociedad, y en particular los pueblos indígenas y las comunidades locales. La combinación de altas tasas de deforestación, construcción de represas y una estación seca cada vez más cálida y prolongada<sup>33</sup> tiene el potencial de alterar significativamente el ciclo hidrológico.

Las lluvias de la estación húmeda ayudan al bosque a sobrevivir a las estaciones secas, ya que el agua se



**Figura 22.2** Precipitaciones mensuales en el sur de la Amazonia (mm/mes). Los años de sequía se indican con líneas verdes, el inicio y el final de la temporada de lluvias con rojo, y la tendencia a una temporada seca más larga después de mediados de la década de 1970 con amarillo<sup>2</sup>.



**Figura 22.3** Proyección (a) de los cambios porcentuales en la acumulación de precipitación máxima anual de cinco días y (b) de los cambios en la DSC anual, el número máximo de 4 días secos consecutivos en los que la precipitación es inferior a 1 mm, durante el periodo 2081-2100, en el RCP4.5.

almacena de forma fácilmente disponible en los suelos y raíces. Las estaciones secas en la Amazonía se han vuelto más intensas en los últimos años, lo que ha provocado una mayor pérdida de bosques y un aumento del riesgo de incendios, especialmente en el sur de la Amazonía<sup>2,34,35</sup> (y sus referencias). Entre los factores que impulsan esta tendencia se encuentran los cambios en el gradiente de temperatura de la superficie del mar del Atlántico Norte y Sur, los incrementos estacionales de la radiación solar<sup>2,35-40</sup>, el desplazamiento hacia el polo de los chorros subtropicales del hemisferio sur<sup>39</sup> y la contracción hacia el ecuador de la ZCIT del Atlántico<sup>41</sup>. La temporada de lluvias en el sur de la Amazonía comienza ahora casi un mes más tarde que en la década de 1970<sup>2,39,40</sup>. Esto está influenciado por la circulación atmosférica a gran escala y el cambio de uso de suelo<sup>42</sup>. Wright et al. (2017)<sup>43</sup> examinan las interacciones entre los procesos de la superficie terrestre, la convección atmosférica y la quema de biomasa, que pueden alterar el inicio de la estación húmeda<sup>44</sup>, posiblemente a través de un mecanismo de retroalimentación negativa que aumenta las condiciones de sequía<sup>45,46</sup>. Los trabajos recientes de Agudelo et al. (2018)<sup>47</sup> y Arias et al. (2020)<sup>48</sup> muestran que las estaciones secas más largas en el sur de la Amazonía también están relacionadas con un mayor

contenido de humedad atmosférica sobre el Caribe y el norte de Sudamérica, y con cambios en el traslado de humedad y el reciclaje de la misma en el sur de la Amazonía. Leite-Filho et al. (2019)<sup>42</sup> muestran un retraso en el inicio de la estación húmeda de unos 4 días por década por cada 10% adicional de deforestación.

**Sequías e inundaciones** La fuerte variabilidad interanual de las precipitaciones en la cuenca del Amazonas provoca sequías e inundaciones recurrentes de intensidad variable. La sequía está casi siempre asociada a un aumento de la temperatura del aire en superficie, y la mayoría de las sequías graves en la región amazónica están relacionadas con El Niño, como en 1998, 2010 y 2015-16<sup>49</sup>. Por el contrario, se detectaron "mega inundaciones" en 2009, 2012, 2014<sup>25</sup> (y sus referencias) y 2021. La mayoría de estos eventos están relacionados con El Niño, La Niña o con TNA cálidas. Los eventos climáticos extremos de sequía observados aumentaron el riesgo de incendios con los impactos asociados en el clima, la salud y la biodiversidad. Esto sugiere un aumento general de la variabilidad climática en la región<sup>50</sup> (y sus referencias). Además, a principios del siglo XXI se ha producido un número sin precedentes de episodios de sequía extrema, mientras que la región ha sufrido

una conversión a gran escala de los bosques en pastizales y tierras de cultivo, alterando la interfaz tierra-atmósfera y contribuyendo a los cambios en el ciclo hidrológico regional y local<sup>16,51,52</sup>. La deforestación en la Amazonía reduce la capacidad de regulación de las cuencas fluviales y exacerba tanto la magnitud de las inundaciones como los caudales bajos<sup>53</sup>.

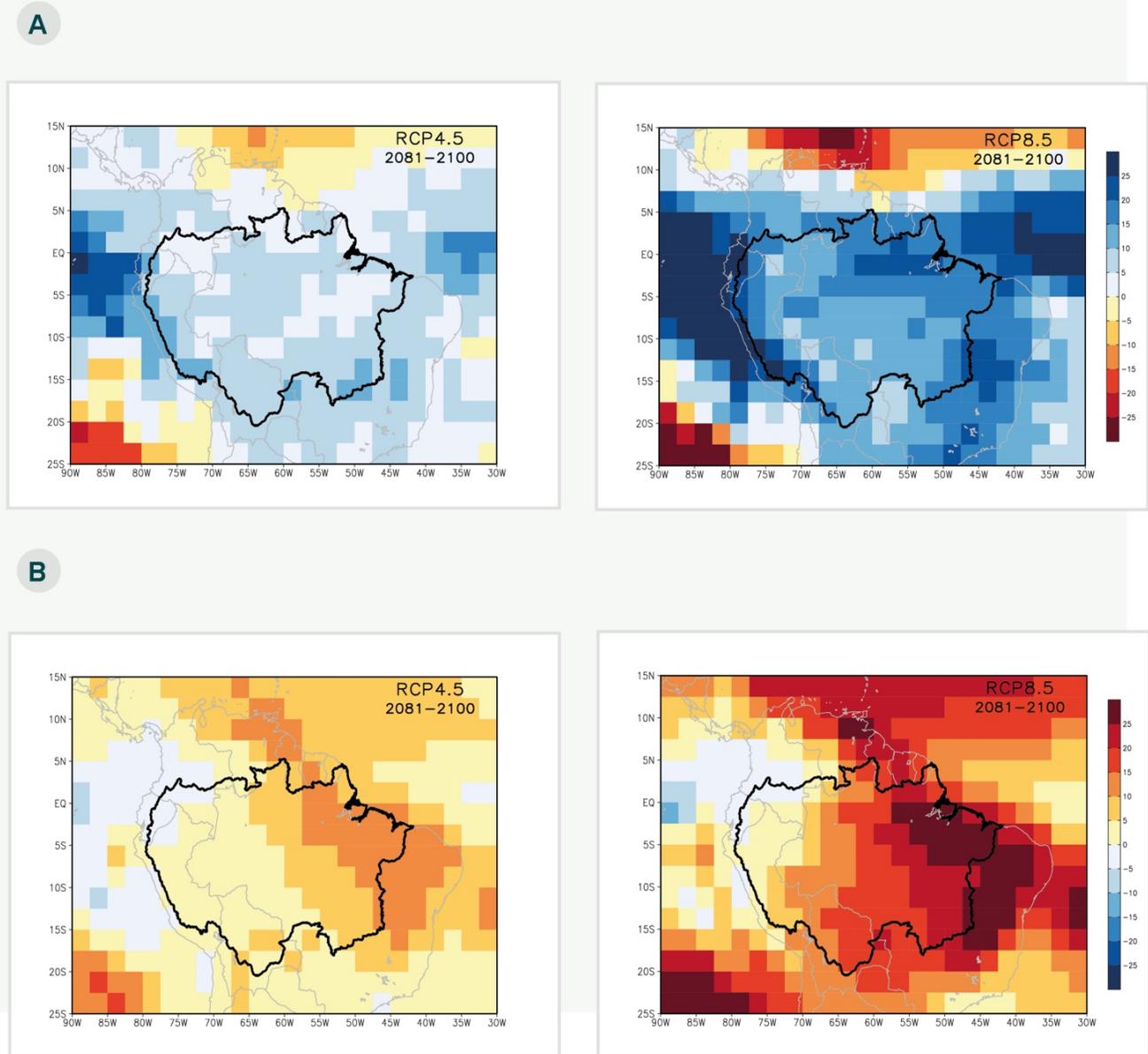
**Humedad atmosférica** El reciclaje de precipitaciones y evapotranspiración (ET) está fuertemente correlacionado en el Amazonas; la ET regional proporcióna alrededor del 28% de las precipitaciones que caen en la cuenca<sup>54</sup>. Las raíces de los bosques bombean la humedad del suelo de la estación húmeda al aire para mantener las precipitaciones durante la estación seca<sup>55-57</sup>. Esta ET constante o incluso superior durante la estación seca en relación con la estación húmeda es fundamental<sup>35,43</sup>, y ayuda a amortiguar las sequías<sup>58</sup>. Los cambios de la ET, especialmente durante la estación seca, tienen un impacto significativo en las precipitaciones y en la llegada de la estación húmeda. La sequedad de la superficie es uno de los principales responsables de los retrasos en el inicio de la estación húmeda en las últimas décadas<sup>39,59</sup>.

Cada año, la selva amazónica recibe una media de 2.000-2.500 mm de lluvia, y gran parte del agua procede del océano Atlántico y de la propia selva<sup>60</sup> a través de la ET y la formación de nubes por la producción de aerosoles orgánicos<sup>61</sup>. Durante la estación húmeda, la humedad es exportada desde la cuenca del Amazonas y transportada a través de "ríos aéreos" a otras regiones<sup>2,62-66</sup>. Estos ríos aéreos contribuyen a las precipitaciones sobre los Andes, el sur de Brasil y la cuenca del río La Plata. Una interrupción en el transporte de humedad induce a la sequía. La reducción del transporte de humedad atmosférica y el respectivo reciclaje de las precipitaciones debido a la deforestación y al cambio de uso de suelo en las regiones críticas desde el punto de vista climático puede inducir un proceso de sequía auto amplificado que desestabilizaría aún más los bosques amazónicos en regiones situadas a sotavento, es decir, el suroeste y el sur de la Amazonía. Esto también reduce la exportación de humedad hacia el sureste

de Brasil, la cuenca del Plata y la cordillera de los Andes<sup>52,58</sup>. Esto podría tener consecuencias más importantes para la agricultura de secano y los ecosistemas naturales de estas zonas de lo que se pensaba. Además, Staal et al. (2018)<sup>58</sup> muestran que alrededor del 25% al 50% de las precipitaciones anuales en los Andes tropicales se originan por la transpiración de los árboles amazónicos. La eliminación de los bosques aumenta la temperatura, reduce la evapotranspiración y ha demostrado que reduce las precipitaciones a favor del viento de la zona deforestada<sup>58,67-69</sup>.

**Causas e influencias locales y remotas** Las proyecciones de los modelos climáticos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) utilizados en el AR5<sup>70,71</sup> del IPCC muestran que, en general, se simula mejor la temperatura que las precipitaciones, aunque se ha comprobado que estos modelos simulan razonablemente bien el pasado climático reciente de la Amazonía. Los modelos proyectan un aumento de la temperatura media anual en todas partes. Utilizando el escenario RCP4.5, el aumento es de unos 2°C más que en la actualidad en toda la región, mientras que en el escenario RCP8.5 los incrementos son de más de 6°C para finales del siglo XXI.

En el conjunto de la cuenca, los cambios previstos en las precipitaciones varían espacialmente y por estaciones. En general, a medida que las precipitaciones aumentan, también lo hacen las inundaciones, y a medida que las precipitaciones disminuyen, aumentan las sequías; esta variabilidad de las precipitaciones tiende a aumentar con el incremento del calentamiento. Existe un alto grado de confianza en que la precipitación media anual disminuirá, y esta tendencia es más pronunciada en el este y el sur de la Amazonía durante el siglo XXI. De acuerdo con las observaciones, también se espera que la duración de la estación seca aumente en el sur de la Amazonía<sup>72</sup>. Spracklen y Garcia-Carreras (2015)<sup>73</sup> evaluaron los impactos de la deforestación en las precipitaciones, mostrando que más del 90% de las simulaciones coinciden en que la deforestación conduce a una reducción de las precipitaciones. También hay un consenso general entre los modelos



**Figura 22.4** (a) cambios porcentuales proyectados en RX5día anual, la acumulación máxima anual de precipitación de cinco días y (b) cambio proyectado en DSC anual, el número máximo de días secos consecutivos cuando la precipitación es inferior a 1 mm, durante el período 2081–2100 en los escenarios RCP4.5 y 8.5 (relativo al período de referencia 1986–2005) de los modelos CMIP5.

respecto a un aumento de las precipitaciones para finales del siglo XXI en el noroeste de la Amazonía (Colombia, Ecuador y norte de Perú)<sup>74,75</sup>. En cambio, en el sur de la Amazonía peruana y boliviana se prevé una estación seca más larga y más seca<sup>39,72</sup>. Minvielle y Garreaud (2011)<sup>76</sup> proyectan una probable reducción de las precipitaciones en los Andes-

Altiplano (-10% a -30%) y sobre la región más elevada del alto Amazonas para finales del siglo XXI. Las observaciones también muestran un retroceso glaciar sin precedentes y acelerado desde finales de los años 1970<sup>77,78</sup>. Muchos glaciares podrían desaparecer, lo que aumentará el riesgo de escasez de agua en los valles alto andinos.

Los impactos más graves del cambio climático suelen estar relacionados con los cambios en los extremos climáticos. Se proyecta que el número máximo de días secos consecutivos (DSC) aumente sustancialmente, lo que indica no sólo días secos más frecuentes, sino también un aumento de las precipitaciones intensas, como muestra el índice de acumulación de precipitaciones máximas de cinco días (RX5day), que contribuye en gran medida a las inundaciones repentinas.

La capacidad de la selva amazónica para prestar servicios ambientales se ve amenazada por la intervención humana a varias escalas, como la deforestación, los incendios, el cambio climático global y regional y los eventos climáticos extremos. Tales servicios incluyen el mantenimiento de la biodiversidad, el ciclo del agua, el enfriamiento por evaporación y las reservas de carbono. Estos servicios tienen un valor mucho mayor para la sociedad humana que la madera, la carne y otros productos que se obtienen al destruir el bosque <sup>t67</sup>. Quizás uno de los servicios más valiosos que proporciona el bosque es el transporte de humedad atmosférica hacia los Andes, el sur del Amazonas, el Pantanal y la cuenca de La Plata. En estas regiones situadas a sotavento, la reducción del transporte de humedad desde el Amazonas puede favorecer la reducción de precipitaciones y el aumento de las temperaturas, incrementando el riesgo de sequías, incendios e inseguridad alimentaria<sup>69</sup>.

**Conclusiones** En varios estudios se ha observado una intensificación del ciclo hidrológico en la región<sup>14,15,17</sup>, lo que es coherente con el aumento de los recientes fenómenos hidroclimáticos extremos<sup>25</sup> (y sus referencias). En las escalas temporales interanuales, el ENSO y el TNA han desempeñado un papel importante en la variabilidad de la temperatura y las precipitaciones. A gran escala, las conexiones con las anomalías de las TSM del Pacífico, del Atlántico Tropical y del Atlántico Subtropical, representadas por la AMO, la ODP y otras, han demostrado tener un impacto en las anomalías de las precipitaciones. Como muestran las proyecciones de los modelos, la deforestación a gran escala y las perspectivas del cambio climático global pueden intensificar el riesgo de una

Amazonía más seca y cálida, colocando en riesgo millones de personas vulnerables que viven en pequeñas comunidades a un stress térmico intenso. Aunque el cambio de uso de la tierra es la amenaza más visible para el ecosistema amazónico, el cambio climático se está convirtiendo en el peligro más grave para el futuro de la región.

## Referencias

1. Almeida, C. T., Oliveira-Júnior, J. F., Delgado, R. C., Cubo, P. & Ramos, M. C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. *Int. J. Climatol.* **37**, 2013–2026 (2017).
2. Marengo, J. A. *et al.* Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. *Front. Earth Sci.* **6**, 228 (2018).
3. Jiménez-Muñoz, J. C. *et al.* Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Sci. Rep.* **6**, 33130 (2016).
4. Khanna, J., Cook, K. H. & Vizzy, E. K. Opposite spatial variability of climate change-induced surface temperature trends due to soil and atmospheric moisture in tropical/subtropical dry and wet land regions. *Int. J. Climatol.* **40**, 5887–5905 (2020).
5. Dunn, R. J. H. *et al.* Development of an Updated Global Land In Situ-Based Data Set of Temperature and Precipitation Extremes: HadEX3. *J. Geophys. Res. Atmos.* **125**, e2019JD032263 (2020).
6. Seiler, C., Hutjes, R. W. A. & Kabat, P. Climate variability and trends in Bolivia. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **52**, 130–146 (2013).
7. Lavado Casimiro, W. S., Labat, D., Ronchail, J., Espinoza, J. C. & Guyot, J. L. Trends in rainfall and temperature in the Peruvian Amazon--Andes basin over the last 40 years (1965–2007). *Hydrol. Process.* **27**, 2944–2957 (2013).
8. Jimenez, J. C. *et al.* The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. *Int. J. Climatol.* [joc.6453](https://doi.org/10.1002/joc.6453) (2019) doi:10.1002/joc.6453.
9. Davidson, E. A. *et al.* The Amazon basin in transition. *Nature* **481**, 321–328 (2012).
10. Schöngart, J. & Junk, W. Clima e hidrologia nas várzeas da Amazônia Central. in *Várzeas Amazônicas: Desafios para um Manejo Sustentável* (eds. Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Wittmann, F. & Schöngart, J.) (Editora INPA, 2020).
11. Malhi, Y. & Wright, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. B Biol. Sci.* **359**, 311–329 (2004).
12. Espinoza Villar, J. C. *et al.* Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). *J. Hydrol.* **375**, 297–311 (2009).
13. Fernandes, K., Giannini, A., Verchot, L., Baethgen, W. & Pinedo-Vasquez, M. Decadal covariability of Atlantic SSTs and western Amazon dry-season hydroclimate in observations and CMIP5 simulations. *Geophys. Res. Lett.* **42**, 6793–6801 (2015).
14. Gloor, M. *et al.* Intensification of the Amazon hydrological cycle over the last two decades. *Geophys. Res. Lett.* **40**, 1729–

- 1733 (2013).
15. Barichivich, J. *et al.* Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Sci. Adv.* (2018) doi:10.1126/sciadv.aat8785.
  16. Garcia, B. N., Libonati, R. & Nunes, A. M. B. Extreme drought events over the Amazon Basin: The perspective from the reconstruction of South American Hydroclimate. *Water (Switzerland)* **10**, (2018).
  17. Wang, X.-Y., Li, X., Zhu, J. & Tanajura, C. A. S. The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. *Environ. Res. Lett.* **13**, 94015 (2018).
  18. Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J. A. & Segura, H. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Clim. Dyn.* **52**, 5413–5430 (2019).
  19. Gloor, M. *et al.* Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. *Global Biogeochem. Cycles* **29**, 1384–1399 (2015).
  20. Heerspink, B. P., Kendall, A. D., Coe, M. T. & Hyndman, D. W. Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **32**, 100755 (2020).
  21. McGregor, S. *et al.* Recent Walker circulation strengthening and Pacific cooling amplified by Atlantic warming. *Nat. Clim. Chang.* **4**, 888–892 (2014).
  22. Paca, V. H. da M., Espinoza-Dávalos, G. E., Moreira, D. M. & Comair, G. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. *Water* **12**, 1244 (2020).
  23. Silva, Y., Takahashi, K. & Chávez, R. Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Adv. Geosci.* **14**, 261–264 (2008).
  24. Heidinger, H., Carvalho, L., Jones, C., Posadas, A. & Quiroz, R. A new assessment in total and extreme rainfall trends over central and southern Peruvian Andes during 1965–2010. *Int. J. Climatol.* **38**, e998–e1015 (2018).
  25. Marengo, J. A. & Espinoza, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* **36**, 1033–1050 (2016).
  26. Ronchail, J. *et al.* The flood recession period in Western Amazonia and its variability during the 1985–2015 period. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **15**, 16–30 (2018).
  27. Posada, D. & Poveda, G. Tendencias de largo plazo en los caudales de la cuenca Amazónica y su relación con el área de la cuenca. *Rev. Colomb. Amaz.* 123–126 (2015).
  28. Molina-Carpio, J. *et al.* Hydroclimatology of the Upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends. *Hydrol. Sci. J.* **62**, 911–927 (2017).
  29. Lopes, A. V., Chiang, J. C. H., Thompson, S. A. & Dracup, J. A. Trend and uncertainty in spatial-temporal patterns of hydrological droughts in the Amazon basin. *Geophys. Res. Lett.* **43**, 3307–3316 (2016).
  30. Costa, M. H., Botta, A. & Cardille, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *J. Hydrol.* **283**, 206–217 (2003).
  31. Anderson, E. P. *et al.* Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams. *Sci. Adv.* **4**, eaao1642 (2018).
  32. de Resende, A. F. *et al.* Massive tree mortality from flood pulse disturbances in Amazonian floodplain forests: The collateral effects of hydropower production. *Sci. Total Environ.* **659**, 587–598 (2019).
  33. Timpe, K. & Kaplan, D. The changing hydrology of a dammed Amazon. *Sci. Adv.* **3**, e1700611 (2017).
  34. Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R. & Rodriguez, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.* **38**, n/a–n/a (2011).
  35. Fu, R. & Li, W. The influence of the land surface on the transition from dry to wet season in Amazonia. *Theor. Appl. Climatol.* **78**, 97–110 (2004).
  36. Butt, N., de Oliveira, P. A. & Costa, M. H. Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *J. Geophys. Res.* **116**, D11120 (2011).
  37. Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillips, O. L., van der Heijden, G. M. F. & Nepstad, D. The 2010 Amazon drought. *Science* **331**, 554 (2011).
  38. Dubreuil, V., Debortoli, N., Funatsu, B., Nédélec, V. & Durieux, L. Impact of land-cover change in the Southern Amazonia climate: a case study for the region of Alta Floresta, Mato Grosso, Brazil. *Environ. Monit. Assess.* **184**, 877–891 (2012).
  39. Fu, R. *et al.* Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **110**, 18110–18115 (2013).
  40. Alves, L. M. Análise estatística da sazonalidade e tendências das estações chuvosas e seca na Amazônia: Clima presente e projeções futuras. (Ph. D. thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016).
  41. Arias, P. A., Martínez, J. A. & Vieira, S. C. Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern South America. *Clim. Dyn.* **45**, 2861–2884 (2015).
  42. 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).
  43. Wright, J. S. *et al.* Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **114**, 8481–8486 (2017).
  44. Zhang, Y. *et al.* Impact of biomass burning aerosol on the monsoon circulation transition over Amazonia. *Geophys. Res. Lett.* **36**, (2009).
  45. 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).
  46. Lejeune, Q., Davin, E. L., Guillod, B. P. & Seneviratne, S. I. Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation. *Clim. Dyn.* **44**, 2769–2786 (2015).
  47. Agudelo, J., Arias, P. A., Vieira, S. C. & Martínez, J. A. Influence of longer dry seasons in the Southern Amazon on patterns of water vapor transport over northern South America and the Caribbean. *Clim. Dyn.* **52**, 2647–2665 (2019).

48. Arias, P. A. *et al.* Changes in Normalized Difference Vegetation Index in the Orinoco and Amazon River Basins: Links to Tropical Atlantic Surface Temperatures. *J. Clim.* **33**, 8537–8559 (2020).
49. Cai, W. *et al.* Climate impacts of the El Niño--Southern Oscillation on South America. *Nat. Rev. Earth & Environ.* **1**, 215–231 (2020).
50. Aragão, L. E. O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nat. Commun.* **9**, 536 (2018).
51. Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. & Rammig, A. Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophys. Res. Lett.* **44**, 6182–6190 (2017).
52. Zemp, D. C. *et al.* Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nat. Commun.* **8**, 1–10 (2017).
53. Salazar, J. F. *et al.* Scaling properties reveal regulation of river flows in the Amazon through a “forest reservoir”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **22**, 1735–1748 (2018).
54. van der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B. & Steele-Dunne, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resour. Res.* **46**, (2010).
55. Da Rocha, H. R. *et al.* Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecol. Appl.* **14**, 22–32 (2004).
56. Juárez, R. I. N., Hodnett, M. G., Fu, R., Goulden, M. L. & von Randow, C. Control of Dry Season Evapotranspiration over the Amazonian Forest as Inferred from Observations at a Southern Amazon Forest Site. *J. Clim.* **20**, 2827–2839 (2007).
57. 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).
58. Staal, A. *et al.* Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nat. Clim. Chang.* **8**, 539–543 (2018).
59. Shi, M. *et al.* The 2005 Amazon drought legacy effect delayed the 2006 wet season onset. *Geophys. Res. Lett.* **46**, 9082–9090 (2019).
60. Salati, E. & Vose, P. B. Amazon Basin: A System in Equilibrium. *Science* **225**, 129–138 (1984).
61. Andreae, M. O. *et al.* Aerosol characteristics and particle production in the upper troposphere over the Amazon Basin. *Atmos. Chem. Phys.* **18**, 921–961 (2018).
62. 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).
63. 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).
64. Gimeno, L. *et al.* Recent progress on the sources of continental precipitation as revealed by moisture transport analysis. *Earth-Science Rev.* **201**, 103070 (2020).
65. Espinoza, J. C. *et al.* Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982--2017 period. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **26**, 100637 (2019).
66. 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).
67. Nobre, C. A. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **113**, 10759–10768 (2016).
68. Nobre, P., Malagutti, M., Urbano, D. F., de Almeida, R. A. F. & Giarolla, E. Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. *J. Clim.* **22**, 5686–5697 (2009).
69. Alves de Oliveira, B. F., Bottino, M. J., Nobre, P. & Nobre, C. A. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. *Commun. Earth Environ.* **2**, 207 (2021).
70. Joetzjer, E., Douville, H., Delire, C. & Ciais, P. Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3. *Clim. Dyn.* **41**, 2921–2936 (2013).
71. Gulizia, C. & Camilloni, I. Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America. *Int. J. Climatol.* **35**, 583–595 (2015).
72. Boisier, J. P., Ciais, P., Ducharne, A. & Guimberteau, M. Projected strengthening of Amazonian dry season by constrained climate model simulations. *Nat. Clim. Chang.* **5**, 656–660 (2015).
73. Spracklen, D. V. & Garcia-Carreras, L. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophys. Res. Lett.* **42**, 9546–9552 (2015).
74. Schoolmeester, T. *et al.* *Outlook on climate change adaptation in the Tropical Andes mountains.* (2016). doi:10.13140/RG.2.1.4311.1287.
75. Zulkafli, Z. *et al.* Projected increases in the annual flood pulse of the Western Amazon. *Environ. Res. Lett.* **11**, 14013 (2016).
76. Minvielle, M. & Garreaud, R. D. Projecting Rainfall Changes over the South American Altiplano. *J. Clim.* **24**, 4577–4583 (2011).
77. Buytaert, W. *et al.* Glacial melt content of water use in the tropical Andes. *Environ. Res. Lett.* **12**, 114014 (2017).
78. Rabatel, A. *et al.* Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosph.* **7**, 81–102 (2013).