

Capítulo 22 Em Síntese

Variabilidade de longo prazo, extremos e mudanças na temperatura e hidrometeorologia na região amazônica



Queimadas em Rio Branco, no Acre, 2020 (Foto: Sérgio Vale/Amazônia Real)



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Variabilidade de longo prazo, extremos e mudanças na temperatura e hidrometeorologia na região amazônica

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

Mensagens Principais e Recomendações

- 1) As mudanças no uso da terra aumentaram o risco de incêndios e a vulnerabilidade dos sistemas humanos e naturais.
- 2) Em longo prazo, a variabilidade climática pode ter fortes impactos no ciclo hídrico na região, na resiliência da biodiversidade e na estrutura da floresta, com implicações para o clima regional e global.
- 3) O prolongamento da estação seca e as mudanças na frequência e na intensidade de episódios de seca extrema ameaçam a sociedade, os ecossistemas e a vida selvagem. Dados atuais demonstram que a estação seca aumentou em cerca de um mês no sul da Amazônia desde a década de 1970.
- 4) Há uma urgente necessidade de resgatar dados e fomentar uma melhor integração e comparabilidade de dados entre os países amazônicos, com acesso livre para a comunidade científica.
- 5) Conjuntos de dados climáticos e hidrológicos em grade de alta resolução para a Amazônia devem ser gerados através da cooperação entre os serviços meteorológicos estaduais e nacionais, agências climáticas internacionais e universidades, bem como conjuntos de dados privados.
- 6) Populações locais e legisladores precisam ser mais bem informados sobre clima, hidrologia e ciência atmosférica, especialmente os impactos do uso da terra e das mudanças climáticas sobre

os meios de subsistência. O conhecimento e a cultura locais são fontes preciosas de indicadores ambientais, os chamados *proxies* climáticos.

Resumo Este capítulo descreve as mudanças observadas e projetadas na temperatura, vazão dos rios e padrões de precipitação e condições extremas na região amazônica, bem como seus impactos e possíveis limiares. A ênfase está sobre o efeito dos extremos climáticos sobre a biodiversidade e os processos ecológicos.

Temperatura O aquecimento sobre a região é um fato, mas a magnitude da tendência de aquecimento varia entre conjuntos de dados e períodos de tempo. A tendência de aquecimento é evidente a partir da década de 1980 e é ainda mais significativa desde a década de 2000¹⁻⁸. Os registros históricos mostram uma tendência crescente para todas as estações, com uma taxa maior de aquecimento para as estações de junho a agosto (JJA) e de setembro a novembro (SON). Observa-se um padrão Oeste-Leste contrastante, com taxas de aquecimento no leste da Amazônia sendo quase o dobro daquelas do oeste da Amazônia. Isso pode ser atribuído a efeitos da mudança na cobertura do solo e a subsequente alteração do equilíbrio energético⁹.

Fortes eventos do El Niño, como em 1997/98 e 2015/16, têm uma influência significativa nas tem-

^a National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters 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

^b 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'Herès, France.

^c Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of California-Los Angeles, 520 Portola Plaza, Math Sciences Building, 7127, Los Angeles CA 90095, USA

^d Global Change Unit (GCU) of the Image Processing Laboratory (IPL), Universitat de València Estudi General (UVEG), C/ Catedrático José Beltrán 2, 46980 Paterna, Valencia, Spain.

^e Earth System Science Center/National Institute for Space Research, Av. dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja, Brazil.

^f 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

^g National Institute for Amazon Research (INPA), Department of Environmental Dynamics, 2936, Av. André Araújo, Manaus, Amazonas 69067-375, Brazil

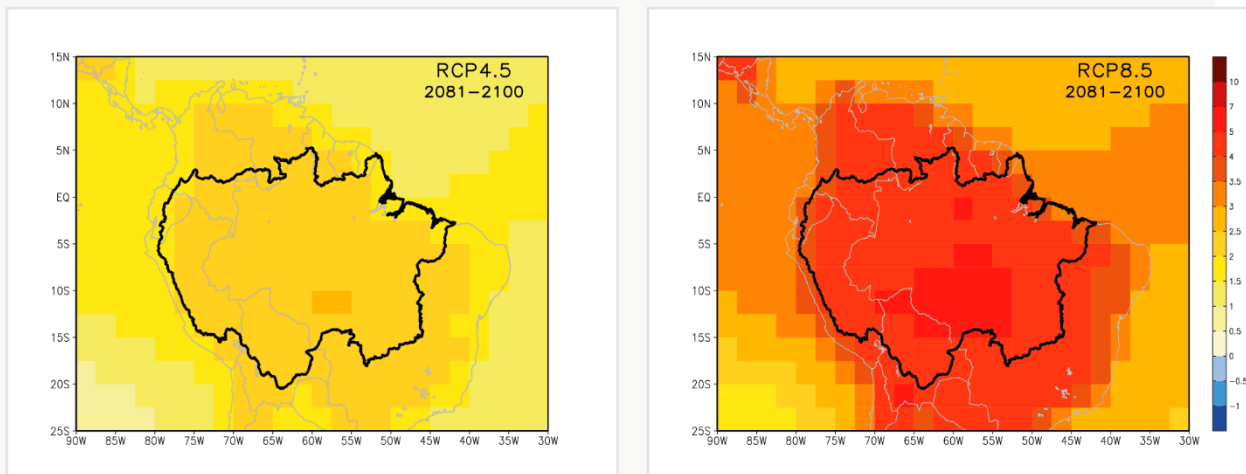


Figura 22.1 Variação percentual média do multimodelo CMIP5 na temperatura média anual do ar próximo à superfície, relativo ao período de referência 1986-2005, com média calculada para o período 2081-2100, sob as projeções RCP 4.5 e 8.5.

peraturas do ar na região central da bacia amazônica^{3,10}. Por exemplo, em setembro de 2015 a média diária de temperaturas máximas e mínimas no mês foi 2,2-2,3 °C mais alta em comparação às mesmas médias do mês nos cinco anos anteriores.

Fortes eventos do El Niño, como em 1997/98 e 2015/16, têm uma influência significativa nas temperaturas do ar na região central da bacia amazônica^{3,10}. Por exemplo, em setembro de 2015 a média diária de temperaturas máximas e mínimas no mês foi 2,2-2,3 °C mais alta em comparação às mesmas médias do mês nos cinco anos anteriores.

Hidrologia Tendências históricas na precipitação econômica variam consideravelmente entre estudos, dependendo do conjunto de dados, do período e duração das séries temporais, da estação e da região avaliada^{2,11-13}. A maioria dos registros pluviométricos modernos começam na década de 1960, prejudicando a quantificação das tendências na região amazônica. Vários estudos relataram uma intensificação do ciclo hidrológico e um prolongamento da estação seca no sul da Amazônia, enquanto que o norte da Amazônia passou por um aumento da frequência de chuvas extremas e subsequentes inundações^{10,14-19}. Reduções significativas

das chuvas também são observadas no leste da Amazônia.

O aquecimento substancial do Atlântico tropical desde a década de 1990 tem um papel central na hidrologia da região, aumentando o vapor d'água atmosférico trazido pelos ventos alísios para o norte da bacia amazônica e aumentando a precipitação, especialmente durante as estações seca para úmida e úmida^{14,19,20}. O resfriamento simultâneo do Pacífico equatorial durante esse período fortalece a circulação de Walker e a convecção profunda sobre a Amazônia^{15,19,21}.

Nas planícies amazônicas da Colômbia, Equador e norte do Peru, a precipitação têm aumentado desde a década de 1990^{8,12,17,22} quando foi documentado um crescimento de cerca de 17% durante a estação úmida¹⁸. O aumento das chuvas no noroeste andino-amazônico atualmente contribui para a intensificação das inundações extremas durante as últimas três décadas¹⁵.

A parte sul das bacias andino-amazônicas do Peru apresentam diminuição das chuvas desde meados da década de 1960^{7,20,23-27} e, conseqüentemente, diminuição da vazão durante a estação de águas

baixas. Na Amazônia boliviana, a diminuição das chuvas é observada principalmente na parte sul da bacia boliviana do Madeira^{12,28,29}.

Influências humanas Outros fatores que levam a mudanças no ciclo hidrológico estão relacionados às mudanças no uso da terra, como o desmatamento em grande escala em áreas de captação para agricultura e pecuária^{9,20,30}, e a construção de usinas hidrelétricas³¹. Mudanças enormes e súbitas no regime de fluxos são esperadas de represas hidrelétricas, resultando em complexos distúrbios espaço-temporais para o fluxo que desce das represas para as planícies³². As múltiplas represas sendo construídas ou planejadas para as bacias fluviais do Tapajós, Xingu, Tocantins-Araguaia, Marañón e outras terão efeitos cumulativos e em cascata sobre o ciclo hidrológico descendente³³, incluindo imensas perdas de biodiversidade e dos serviços ambientais dos quais depende a sociedade, em especial os povos

Indígenas e as comunidades locais. A combinação de altas taxas de desmatamento, construção de represas e uma estação seca cada vez mais quente e longa³³ têm o potencial de perturbar significativamente o ciclo hidrológico.

As chuvas da estação úmida ajudam a floresta a sobreviver às estações secas, uma vez que a água fica armazenada e imediatamente disponível nos solos e raízes. As estações secas na Amazônia têm se tornado mais intensas nos últimos anos, levando a uma maior perda de florestas e aumento do risco de incêndios, principalmente no sul da amazonia^{2,34,35} (e suas referências). Os motivadores dessa tendência incluem mudanças no gradiente da temperatura da superfície dos mares do Atlântico Norte e Sul, aumentos sazonais da radiação solar^{2,35-40}, uma expansão em direção ao polo dos jatos subtropicais³⁹ do hemisfério Sul e uma contração em direção ao Equador da Zona de Convergência Intertropical do Atlântico⁴¹. A

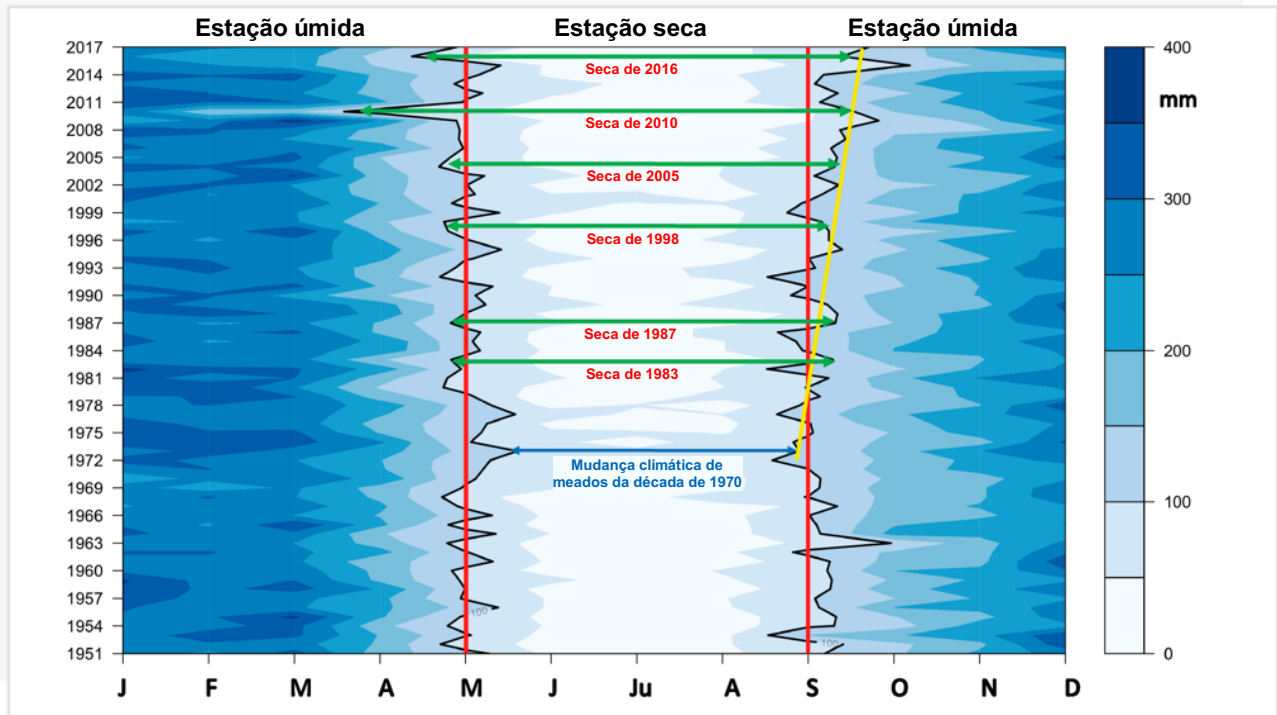


Figura 22.2 Pluviosidade mensal para o sul da Amazônia (mm/mês). Os anos de seca são indicados pelas linhas verdes, o início e o fim da estação de chuvas em vermelho, a tendência de uma estação seca mais longa depois de meados da década de 1970 em amarelo.

estação chuvosa no sul da Amazônia agora começa quase um mês mais tarde do que na década de 1970^{2,39,40}. Isso é influenciado pela circulação atmosférica em grande escala e pelas mudanças no uso da terra⁴². Wright et al. (2017)⁴³ examinam as interações entre os processos na superfície da terra, a convecção atmosférica e a queima de biomassa, que podem alterar o momento de início da estação úmida⁴⁴, possivelmente através de um mecanismo negativo de retroalimentação que aumenta as condições para a seca^{45,46}. Trabalhos recentes de Agudelo et al. (2018)⁴⁷ e Arias et al. (2020)⁴⁸ demonstram que as estações secas mais longas no sul amazônico também estão relacionadas ao aumento do conteúdo de umidade atmosférica sobre o Caribe e o norte da América do Sul, e mudanças no transporte e reciclagem de umidade no sul da Amazônia. Leite-Filho et al. (2019)⁴² mostram um atraso no início da estação úmida de cerca de 4 dias por década, para cada 10% adicionais de desmatamento.

Secas e enchentes A intensa variabilidade das chuvas na bacia amazônica leva a secas e enchentes recorrentes, de intensidade variável. A seca está quase sempre associada a um aumento na temperatura do ar da superfície, e a maioria das secas intensas na região amazônica são relacionadas ao El Niño, como em 1998, 2010 e 2015-16⁴⁹. Em contraste, as

“megaenchentes” foram detectadas em 2009, 2012, 2014²⁵ (e suas referências) e 2021. A maioria desses eventos está relacionada ao El Niño, à La Niña ou ao Atlântico Norte Tropical aquecido. Observou-se que eventos climáticos extremos aumentaram os riscos de incêndios com impactos associados sobre o clima, a saúde e a biodiversidade. Isso sugere um aumento geral na variabilidade climática da região⁵⁰ (e suas referências). Além disso, no início do século 21, houve um número sem precedentes de eventos de seca extrema, sendo que a região passou por uma conversão em grande escala de florestas em pastos e agricultura, alterando a interface solo-atmosfera e contribuindo para as mudanças no ciclo hidrológico regional e local^{16,51,52}. O desmatamento na Amazonia reduz a capacidade de regulação das bacias fluviais e exacerba a magnitude das enchentes e das baixas⁵³.

Umidade atmosférica A reciclagem da precipitação e da evapotranspiração (ET) estão fortemente correlacionadas na Amazônia; a ET regional é responsável por cerca de 28% da precipitação sobre a bacia⁵⁴. As raízes da floresta bombeiam a umidade do solo da estação úmida para o ar, para manter a pluviosidade durante a estação seca⁵⁵⁻⁵⁷. Essa ET constante ou ainda mais alta durante a estação seca em relação à estação úmida é vital^{35,43}, e ajuda a amenizar

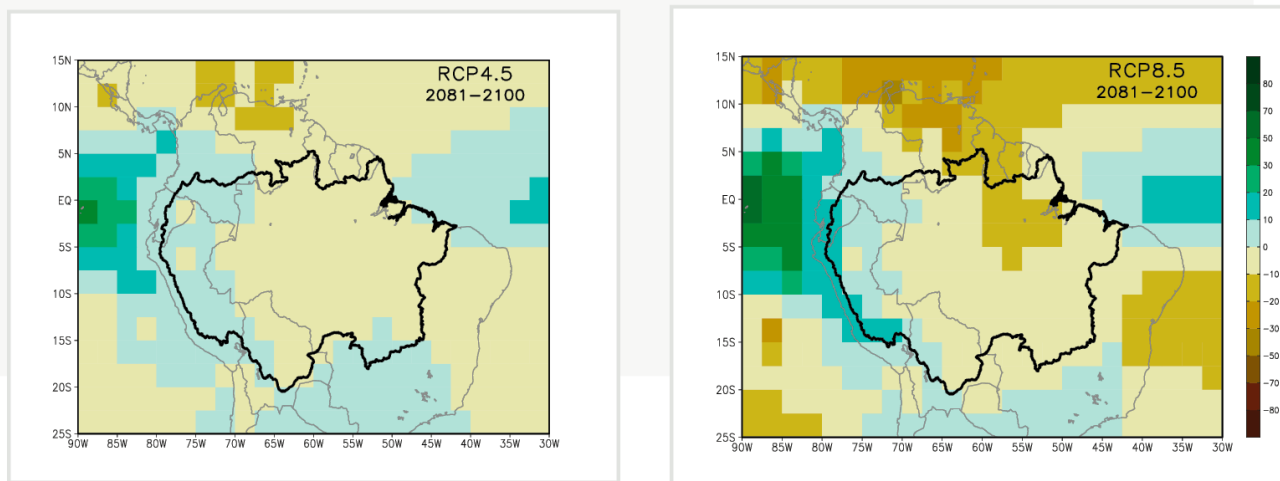


Figura 22.3 Projeções de (a) mudanças percentuais no acúmulo de precipitação máxima em cinco dias e (b) mudança no DSC anual, o número máximo de 4 dias secos consecutivos quando a precipitação for inferior a 1 mm, durante o período de 2081–2100, no RCP4.5.

as secas⁵⁸. Mudanças na ET, especialmente durante a estação seca, têm impacto significativo nas chuvas e no início da estação chuvosa. A aridez da superfície é um dos principais contribuidores para atrasos no início da estação úmida nas últimas décadas^{39,59}.

Em média, a floresta amazônica recebe 2.000-2.500 mm de chuva a cada ano, com grande parte da água vindo do Oceano Atlântico e da própria floresta⁶⁰, através da ET e da formação de nuvens a partir da produção de aerossóis orgânicos⁶¹. Durante a estação úmida, a umidade é exportada da bacia amazônica e transportada por meio de “Rios Aéreos” para outras regiões^{2,62-66}. Esses rios aéreos contribuem para a precipitação sobre os Andes, o sul do Brasil e a bacia do Rio da Prata. Uma perturbação no transporte de umidade induz a seca. Reduzir o transporte de umidade atmosférica e a respectiva reciclagem da precipitação através do desmatamento e da mudança no uso da terra em regiões críticas para o clima, pode levar a um processo de secagem auto-amplificado que desestabilizaria ainda mais as florestas amazônicas nas regiões de vento a favor, ou seja, as regiões sudoeste e sul da Amazônia.

Isso também reduz a exportação de umidade para o sudeste do Brasil, a bacia do Prata e a cordilheira dos Andes^{52,58}. Isso pode ter consequências mais significativas para a agricultura dependente da chuva e para ecossistemas naturais nessas áreas do que se pensava anteriormente. Além disso, Staal et al. (2018)⁵⁸ mostram que cerca de 25-50% da precipitação anual nos Andes tropicais se origina da transpiração das árvores amazônicas. A remoção de florestas aumenta a temperatura, reduz a evapotranspiração e já foi demonstrado que reduz a precipitação de vento a favor em áreas desmatadas^{58,67-69}.

Causas e influências locais e remotas Projeções de modelos climáticos do CMIP5 (*Coupled Model Inter-comparison Project*) usadas no IPCC AR5^{70,71} mostram que a temperatura geralmente é melhor simulada que a precipitação, embora considere-se que esses modelos simulem o passado climático recente da Amazônia razoavelmente bem. Os modelos projetam a temperatura média anual aumentando em

todos os lugares. Usando o cenário RCP 4.5, o aumento é cerca de 2°C mais alto que o atual em toda a região, ao passo que os aumentos no cenário RCP 8.5 são de mais de 6°C ao fim do século 21.

Ao longo da bacia como um todo, as projeções de mudanças na pluviosidade variam de acordo com o espaço e por estação. Em geral, à medida que as chuvas aumentam, as enchentes aumentam também, e à medida que as chuvas diminuem, as secas aumentam; essa variabilidade na precipitação tende a aumentar com o aumento do aquecimento. Existe grande confiança de que a precipitação média anual diminuirá, e essa tendência é mais nítida no leste e no sul da Amazônia no decorrer do século 21. De acordo com observações, a duração da estação seca também deve se expandir pelo sul da Amazônia⁷². Spracklen e Garcia-Carreras (2015)⁷³ avaliaram os impactos do desmatamento sobre as chuvas, mostrando que mais de 90% das simulações concordam que o desmatamento leva à redução das chuvas. Também há consenso geral entre os modelos sobre um aumento na precipitação para o fim do século 21 sobre o noroeste da Amazônia (Colômbia, Equador e norte do Peru)^{74,75}. Por outro lado, no sul da Amazônia peruana e boliviana, é projetada uma estação mais longa e mais seca^{39,72}. Minvielle e Garreaud (2011)⁷⁶ projetam uma provável redução de pluviosidade no altiplano andino (-10% a -30%) e sobre a região mais alta da alta Amazônia ao fim do século 21. As observações também mostram um recuo glacial sem precedentes e em aceleração desde o fim da década de 1970^{77,78}. Muitas geleiras podem desaparecer, o que aumentará o risco de escassez de água nos vales andinos superiores.

Os impactos mais sérios das mudanças climáticas estão frequentemente relacionados a mudanças nos extremos climáticos. Projeta-se que o número máximo de dias secos consecutivos (DSC) aumentará substancialmente, indicando não apenas dias secos mais frequentes, mas também um aumento na precipitação intensa, como demonstrado pelo índice de acúmulo de precipitação máxima em cinco dias (RX5day), uma forte contribuição para enchentes-relâmpago.

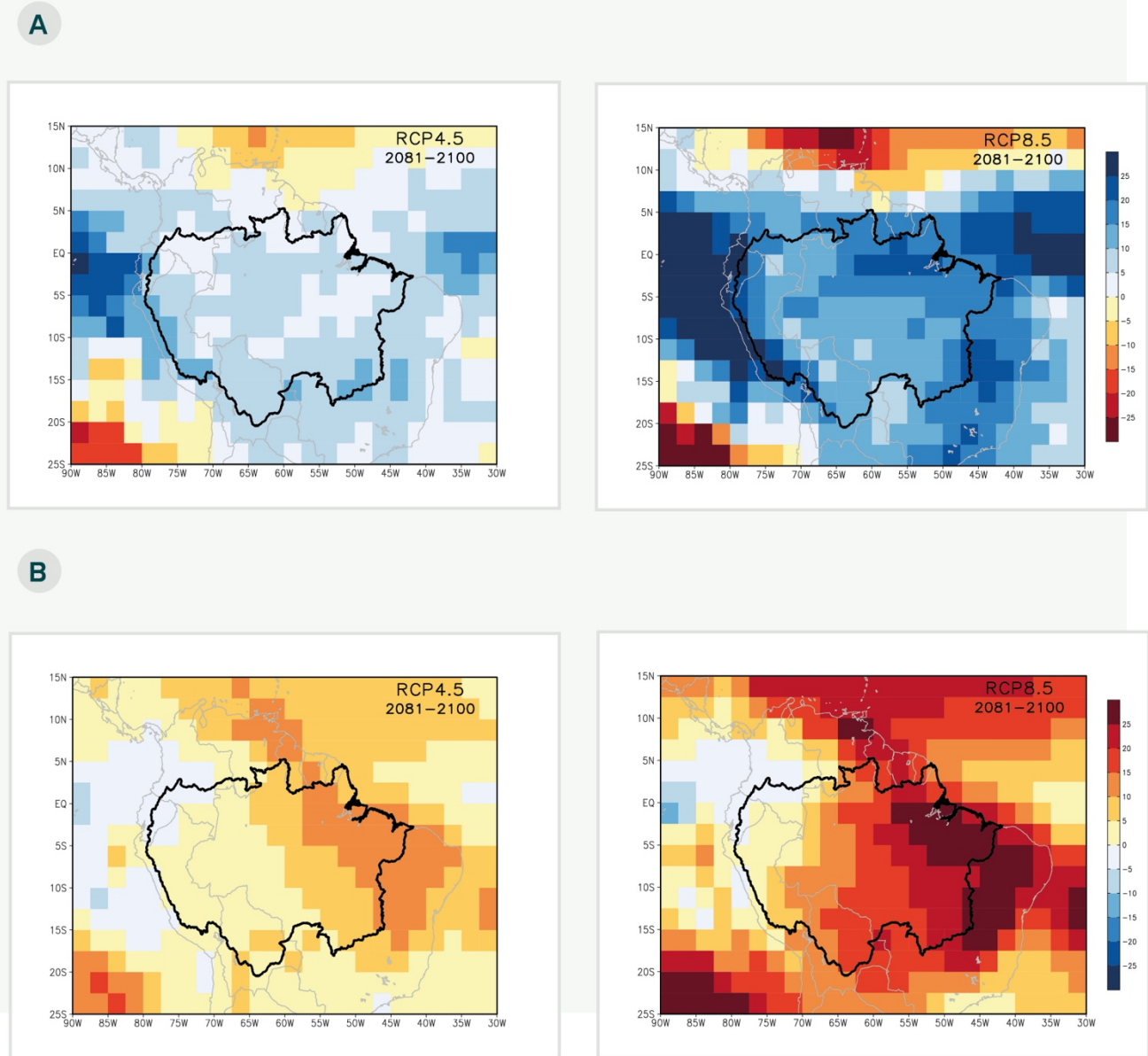


Figura 22.4 (a) Mudanças percentuais projetadas no RX5day anual, a acumulação máxima anual de precipitação de cinco dias e (b) mudança projetada no DSC anual, o número máximo de dias secos consecutivos quando a precipitação é inferior a 1 mm, durante o período 2081–2100 nos cenários RCP4.5 e 8.5 (em relação ao período de referência 1986–2005) dos modelos CMIP5.

A capacidade da floresta amazônica de fornecer serviços ecossistêmicos está ameaçada por forças antropogênicas em várias escalas, como desmatamento, incêndios, mudanças climáticas globais e regionais e eventos extremos. Tais serviços incluem a manutenção da biodiversidade, os ciclos hídricos, o

resfriamento por evaporação e os estoques de carbono. Esses serviços têm um valor muito maior para a sociedade humana do que a madeira, a carne bovina e outros produtos obtidos com a destruição da floresta⁶⁷. Talvez um dos serviços mais valiosos fornecidos pela floresta seja o transporte atmosférico

de umidade para os Andes, o sul da Amazonia, o Pantanal e a bacia do Prata. Nessas regiões de vento a favor, as reduções no transporte de umidade da Amazônia podem favorecer a redução das chuvas e temperaturas mais quentes, aumentando o risco de secas, incêndios e insegurança alimentar⁶⁹.

Conclusões Uma intensificação do ciclo hidrológico na região tem sido observada em vários estudos^{14,15,17}, e isso é consistente com os aumentos nos recentes eventos hidroclimáticos extremos²⁵ (e suas referências). Em escalas interanuais de tempo, ENSO (El Niño Oscilação Sul) e TNA (Atlântico Norte Tropical) têm desempenhado um papel importante na variabilidade de temperatura e precipitação. Em grande escala, as conexões com anomalias nas SST (temperatura das superfícies) do Pacífico, Atlântico Tropical e Subtropical, conforme representadas pela AMO (Oscilação Multidecadal do Atlântico), PDO (Oscilação Decadal do Pacífico) e outros, mostraram impactos nas anomalias de pluviosidade. Como demonstrado por projeções de modelos, o desmatamento em grande escala e os prospectos de mudanças climáticas globais podem intensificar o risco de uma Amazônia mais seca e quente, colocando em risco milhões de pessoas vulneráveis que moram em pequenas comunidades em um intenso estresse térmico. Embora as mudanças no uso da terra sejam a ameaça mais visível ao ecossistema amazônico, as mudanças climáticas estão surgindo como o perigo mais insidioso para o futuro da região.

Referências

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).