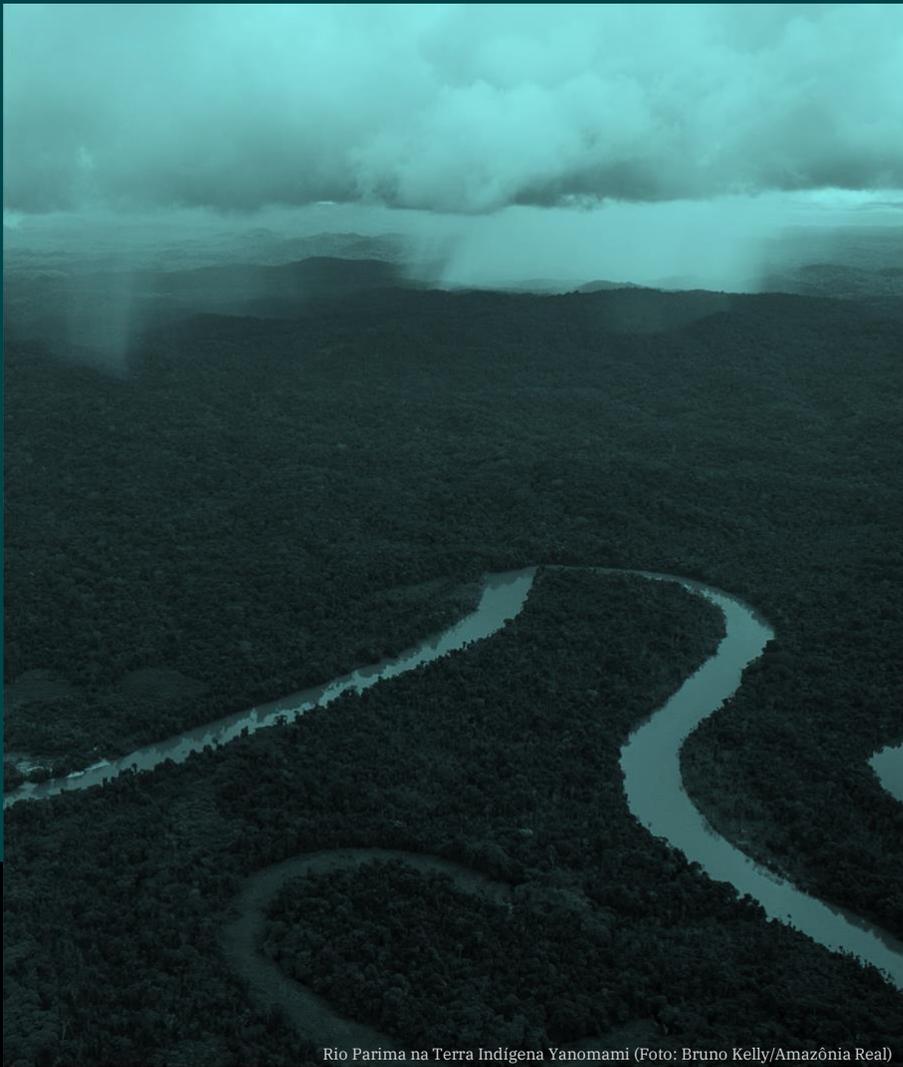


Capítulo 7 Em Síntese

Ciclos Biogeofísicos: Reciclagem de Água,
Regulação Climática



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



THE AMAZON WE WANT
Science Panel for the Amazon

Ciclos Biogeofísicos: Reciclagem de Água, Regulação Climática

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

Mensagens Principais e Recomendações

- 1) A floresta tropical amazônica pode reciclar um grande volume de vapor de água a partir do solo para a atmosfera via evapotranspiração (ET). A taxa de reciclagem média da Bacia Amazônica varia de 24% a 35%, com valor médio de 28%.
- 2) O centro e o noroeste da Amazônia exportam umidade para os Andes através dos rios atmosféricos que fornecem água para os glaciares tropicais, páramos e cidades. A parte sudoeste da Bacia Amazônica é uma importante fonte de umidade durante o ano inteiro para a Bacia do rio da Prata, com a umidade transportada via jato de baixo nível da América do Sul.
- 3) A quantidade e a época da precipitação são reguladas pela quantidade de cobertura de floresta, com a perda ou aumento da floresta levando à redução ou ao aumento da precipitação, respectivamente. Se a floresta tropical fosse substituída por outro uso da terra, a Amazônia experimentaria um clima mais quente e a taxa de ET seria alterada, especialmente durante a estação seca, afetando os volumes de precipitação e reduzindo a duração da estação chuvosa, com implicações na degradação florestal, inflamabilidade da floresta e rendimento das colheitas da região.
- 4) As mudanças mais importantes no sistema hidroclimático ocorrem na transição entre as estações seca e chuvosa, com o prolongamento da estação seca, o que causa importantes consequências em termos ecológicos e hidrológicos. Mais estudos devem focar nessas estações em particular.

- 5) Muito poucos (se algum) dos avanços na degradação das bordas das florestas têm sido incluídos nos Modelos de Sistemas Terrestres (MST). Projetar o futuro das florestas amazônicas exige uma melhor representação dos efeitos das bordas das florestas nos MST.

Resumo Este capítulo avalia as interações biogeofísicas entre a Floresta Amazônica e sua hidrologia e clima. É apresentada uma perspectiva histórica, destacando avanços que melhoram nossa compreensão dos mecanismos através dos quais a floresta tropical interage com a atmosfera.

Introdução A floresta tropical interage com a atmosfera de várias formas, afetando o clima local, continental e global. Um processo importante é a reciclagem da água. Seguindo o processo do ciclo da água, os ventos próximos à superfície dos oceanos levam umidade do Oceano Atlântico tropical para a Amazônia (Figura 7.1). Parte dessa umidade se precipita na forma de chuva e uma parte dessa precipitação pode retornar rapidamente para a atmosfera através da ET. Uma parte desse vapor d'água voltará na forma de chuva sobre a floresta tropical e outra viajará para regiões vizinhas. Essa injeção de vapor d'água não apresenta variabilidade significativa sazonal ou interanual, o que pode ser explicado por várias características e processos associados à floresta tropical.

Papel das florestas tropicais na reciclagem de água A reciclagem de água é o processo pelo qual a ET em um local no continente contribui para a precipitação em outro local no continente¹. O índice

^a Dept. of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa (UFV), Av. Peter Henry Rolfs s/n, Campus Universitário, Viçosa MG 36570-900, Brasil

^b National Institute for Space Research (INPE), Av. dos Astronautas 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos SP 12227-010, Brasil

^c Institute for Environmental Research in Amazonia (IPAM), Asa Norte CLN 211 BL B Sala 201, Asa Norte, Brasília DF 70863-520, Brasil; University of California Irvine, Irvine CA 92697-1075, USA

^d National Center for Monitoring and Alerts of Natural Disasters (CEMADEN), Estrada Dr. Altino Bondensan 500, Eugênio de Melo, São José dos Campos SP 12247-016, Brasil

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

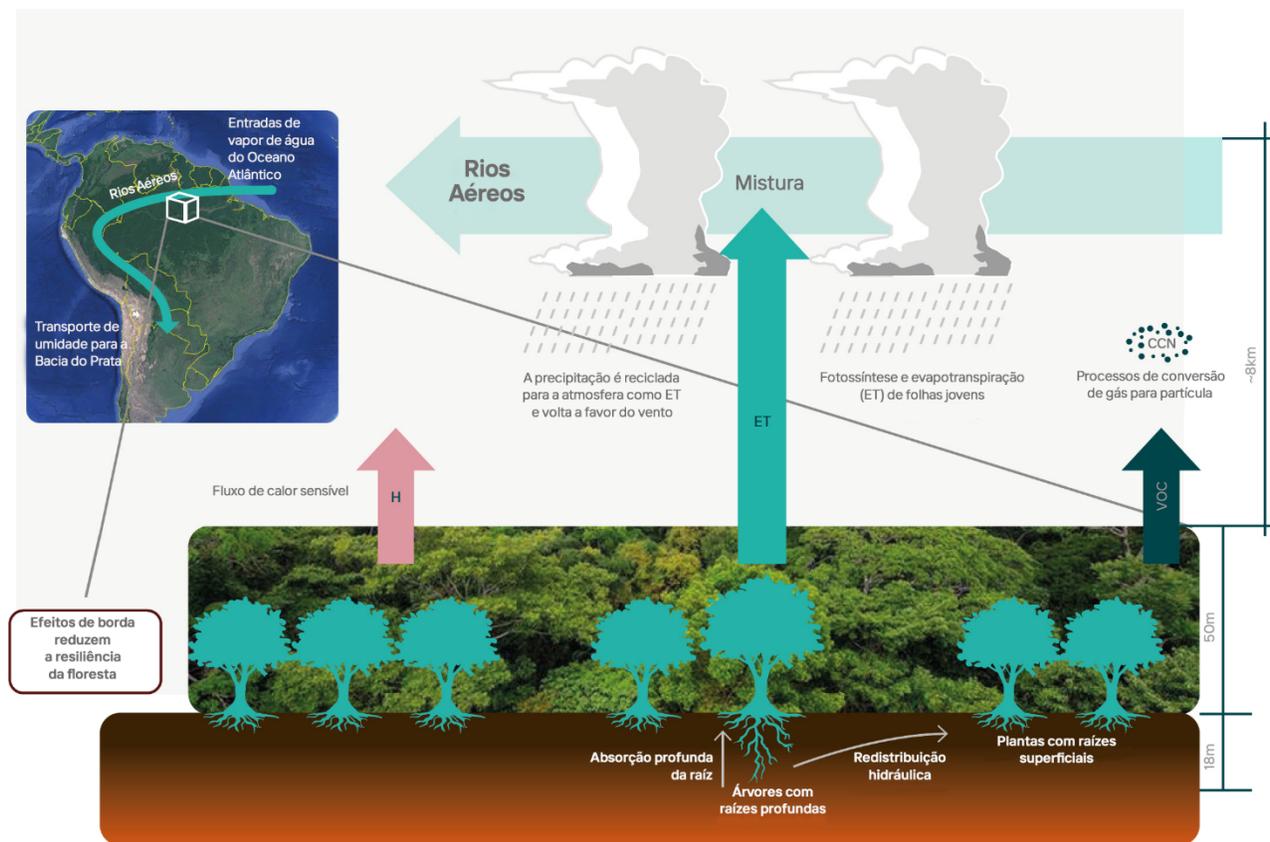


Figura 7.1 Diagrama dos principais processos biogeofísicos das interações biosfera-atmosfera na Amazônia, em diferentes escalas. Sistemas de raízes profundas, redistribuição hidráulica e fotossíntese de folhagem jovem mantêm altas taxas de ET que liberam vapor d'água na atmosfera; esse é então reciclado na forma de precipitação pluviométrica. As florestas emitem compostos orgânicos voláteis (COVs) que se tornam núcleos de condensação de nuvens (NCN) que favorecem a formação de gotículas de chuva. A Amazônia é também uma importante fonte de umidade para várias regiões da América do Sul, especialmente a Bacia do rio da Prata e áreas adjacentes.

de reciclagem (ρ) é o índice de precipitação de origem continental dividido pelo total da precipitação. Esse índice depende de várias condições, incluindo escala, índice da ET local em relação a outras fontes de vapor, e a extensão da região a favor do vento. Uma região grande, como a Amazônia, tende a apresentar um índice de reciclagem alto, mas a reciclagem na região é mais complexa². O índice de reciclagem médio da Bacia Amazônica varia de 24% a 35%, com valor médio de 28%, ou cerca de metade do que era estimado nas décadas de 1970 e 1980. Van der Ent *et al.* (2010)³ e Zemp *et al.* (2014)¹ demonstram que ρ é próximo de zero perto da foz do Amazonas, onde a umidade do oceano penetra na Amazônia, para >50% perto dos

Andes (Figura 7.2). O soergimento mecânico das montanhas e o formato côncavo dos Andes induz uma convergência de nível baixo a várias centenas de quilômetros antes dos Andes, facilitando altas taxas de precipitação e impedindo a umidade de cruzar os Andes e deixar a bacia.

A reciclagem é também mais alta durante a estação seca em comparação com a estação úmida. Durante a estação seca, a entrada de umidade a partir do oceano diminui, e o fluxo estável de água da floresta tropical aumenta a importância dessa fonte local. Na maior parte da Amazônia, a ET não é controlada pela disponibilidade da umidade do solo, mas, ao contrário, pela disponibilidade de energia para

evaporar a água e, conseqüentemente, a baixa variabilidade sazonal. Isso ocorre porque as árvores na Amazônia possuem acesso à água armazenada no fundo na terra e, conseqüentemente, não sofrem de estresse hidráulico. A mais complexa dinâmica de ET sazonal das florestas nas terras altas com umidade limitada no sul da Amazônia indica uma regulação conjunta por fatores ambientais (ex.: radiação líquida, déficit de pressão de vapor) e biológicos (condutância da cobertura florestal) nessas florestas⁴⁻⁶.

A estabilidade da ET local é também associada à variabilidade de ρ nas escalas de tempo interanuais e decadais. Costa e Foley (1999)⁷ observaram um enfraquecimento dos ventos alísios que transportavam o vapor d'água do Atlântico tropical para a Bacia Amazônica durante o período de 1976-

1996, o que causou redução na entrada de vapor d'água na Bacia Amazônica. Nesse caso, onde a principal fonte de vapor d'água para a bacia diminuiu cerca de 720 mm yr^{-1} em 20 anos (de 3.430 mm yr^{-1} em 1976-77 para 2.710 mm yr^{-1} em 1995-96, ou 36 mm yr^{-1}), a Bacia Amazônica manteve precipitação e escoamento constante com o aumento da contribuição relativa do vapor d'água de fonte local (ET regional) de 28% em 1976-77 para 33% em 1995-96.

Captura de umidade do solo profundo pelas árvores
Vários estudos já propuseram diferentes mecanismos para explicar a tolerância da floresta tropical amazônica à seca (sazonal ou extrema). Esses mecanismos incluem captação de água profunda, elevação hidráulica de plantas e regeneração foliar na estação seca. Apesar de raras,

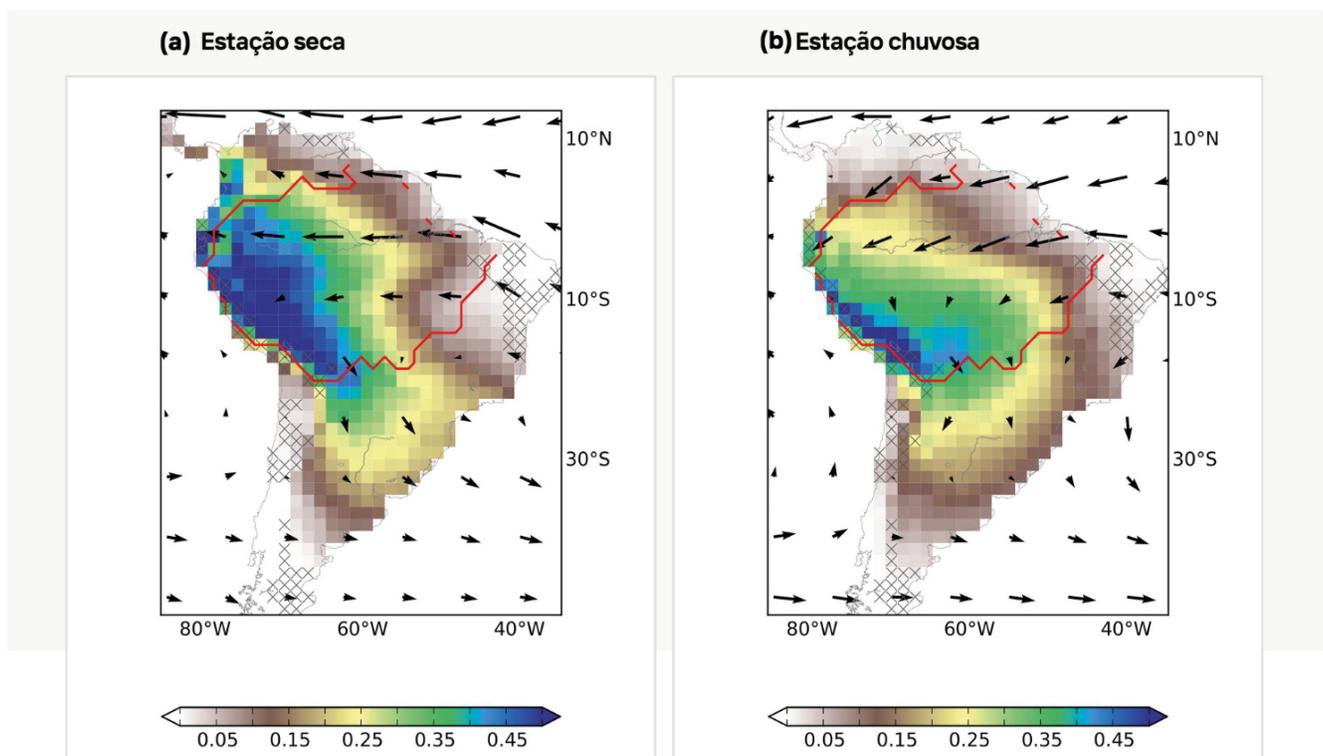


Figura 7.2 Fração da precipitação originada dentro da Bacia Amazônica (contorno em vermelho), usando dados de evapotranspiração MOD16 e dados de precipitação TRMM para o período 2001-2010, e cálculos de reciclagem de umidade direta. (a) Estação seca (Jun-Jul), (b) estação úmida (Dez-Mar). Redesenhado a partir da Figura 8 de Zemp *et al.* (2014)¹.

raízes finas muito profundas (> 6 m) foram encontradas em alguns locais no leste⁸ e região central da Amazônia^{9,10}. Na Amazônia Oriental, onde a precipitação é mais sazonal, Nepstad *et al.* (1994)⁸ observaram raízes que atingiam 18 m. A existência dessas raízes, em associação com a baixa disponibilidade de água para plantas em camadas mais altas (< 1 m) de solo, proporciona um entendimento do papel das raízes profundas como estratégia principal das plantas para lidar com secas sazonais e potencialmente severas^{8,11-13}. Contudo, apesar da ocorrência documentada das raízes profundas, é bem reconhecido que, na Amazônia, as raízes rasas (< 1 m) são muito mais abundantes^{8,9}. Embora as raízes profundas tenham baixa densidade, pesquisas feitas por Hodnett *et al.* (1995)¹² perto de Manaus demonstraram que, em muitos anos, é impossível fechar o saldo da água na estação seca da floresta tropical amazônica sem utilizar a água armazenada em profundidades acima de 2 m. A camada de 250-550 cm contribuiu com ~20% da demanda de água, enquanto que as camadas mais profundas (550-1.150 cm) contribuíram com ~10%.

Outros estudos sugeriram a existência de mecanismos para o transporte de água ascendente a partir das camadas de solo profundo até as de solo raso, através de um sistema de raízes, isto é, ascensão hidráulica pela planta^{14,15}, ou através de um mecanismo de ascendência capilar em solos de textura fina^{16,17}. Alguns estudos sugerem um terceiro mecanismo, a partição de nicho da raiz^{18,19}, pelo qual as plantas captam água do solo de diferentes fontes, como uma função de sua altura, profundidade da raiz e atributos hidráulicos da planta, tais como resistência à embolia dos vasos do xilema²⁰.

Mecanismos como desenvolvimento de raiz profunda, ascensão hidráulica pela planta e regeneração foliar na estação seca sugerem que as florestas amazônicas podem ser resilientes a secas extremas, e que esses traços de evolução poderiam ter sido selecionados em paleoclimas com forte variabilidade interanual. Com esses mecanismos, a floresta tropical pode ter acesso a cerca de 800-

3.000 mm de água armazenada no solo^{8,21}. Esses mecanismos podem não estar disponíveis em todas as florestas tropicais; além disso, não sabemos se a capacidade de crescer raízes profundas é limitada a algumas espécies ou é compartilhada por muitas.

O acesso das raízes à água do solo está ligado à regulação da perda de água pelas folhas. A presença de estômatos nas folhas regula a ET e facilita a ET nas florestas na estação seca²². Christoffersen *et al.* (2014)²³ destacam os papéis importantes e complementares das raízes e das folhas na regulação da ET.

Papel das florestas tropicais amazônicas na produção de seu próprio hidroclima Há uma forte conexão entre as florestas tropicais e os climas quentes e úmidos, formando um sistema de reforço recíproco. Em outras palavras, o clima tropical úmido permite a existência da floresta tropical que, por sua vez, ajuda a produzir o clima chuvoso que necessita. Em uma base média anual na Amazônia, cerca de 72% do vapor d'água que entra na atmosfera é de origem oceânica e 28% é evaporado localmente. Além de seu papel como fonte de vapor d'água, a floresta tropical sempre-verde possui ainda um outro papel no clima local. Estudos^{24,25} e modelos teóricos²⁶ demonstram que o baixo albedo da floresta tropical favorece a convecção sobre a bacia, enquanto que um aumento no albedo da superfície causa uma anomalia de subsidência sobre a região. Adicionalmente, as florestas também emitem compostos orgânicos voláteis (COVs) que se tornam núcleos de condensação de nuvens (NCN) que favorecem a formação de gotículas de chuva (veja o Capítulo 6). Como o vapor d'água e a convecção são os principais contribuintes para a precipitação, as florestas tropicais úmidas de grandes extensões possuem a capacidade de manter seu próprio clima.

Papel da floresta no início da estação chuvosa Uma alta ET durante a estação seca estimula um retorno da estação úmida mais rápido do que seria esperado²⁷. Especificamente, a transpiração da floresta tropical aumenta a convecção superficial que umedece e desestabiliza a atmosfera durante as fases iniciais da transição da estação seca para a úmida,

condicionando a atmosfera da região para um rápido aumento da convecção profunda associada a chuvas. Por sua vez, esse processo causa convergência da umidade e início da estação úmida 2–3 meses antes da chegada da convergência de tipo monção sobre a Amazônia. Evidências recentes utilizando dados de precipitação de sensoriamento remoto e de pluviômetro (TRMM-NASA/JAXA) demonstram empiricamente o papel das florestas tropicais em várias características críticas da estação chuvosa no sul da Amazônia. Leite Filho *et al.* (2020)²⁸ demonstraram que a presença das florestas está associada com um início antecipado e um final mais tardio da estação chuvosa, isto é, uma estação chuvosa mais longa. Além disso, Leite Filho *et al.* (2019)⁴⁴ demonstraram que uma cobertura florestal maior está associada com uma frequência mais baixa de períodos de seca em setembro, outubro, abril e maio, os meses de transição entre as estações seca e chuvosa. Em outras palavras, em florestas bem preservadas, a estação chuvosa começa mais cedo e tem menos probabilidade de ser interrompida por um período longo de seca em suas fases iniciais. Por outro lado, em áreas fortemente desmatadas, a estação chuvosa começa tarde e tem mais probabilidade de ser interrompida por um período longo de seca.

Estudos de observação de Spracklen *et al.* (2012)⁴⁵ confirmam a dependência da precipitação pluviométrica da vegetação. Esses estudos utilizaram dados de sensoriamento remoto por satélite da precipitação tropical e índice de área foliar (IAF), combinados com padrões de transporte atmosférico estimulados, e concluíram que o ar que passou sobre uma extensa vegetação nos dez dias precedentes produziu pelo menos duas vezes mais chuva do que o ar que passou sobre uma área pequena de vegetação. Essa correlação empírica é coerente com a ET mantendo a umidade atmosférica no ar que passa sobre extensa vegetação.

Esses mecanismos implicam em retroalimentação positiva e ativa. A quantidade de cobertura florestal regula a quantidade e a duração de precipitação recebida por essas florestas, com a perda ou

aumento da floresta levando à correspondente redução ou aumento da precipitação e aos subsequentes impactos sobre a cobertura florestal.

Papel das florestas como fonte de vapor d'água para outras regiões A região amazônica é uma importante fonte de umidade para várias regiões da América do Sul, como os Andes, fornecendo umidade e precipitação para glaciares, páramos e grandes cidades³¹, bem como para a Bacia do Rio da Prata^{1,32-35}. Sobre essa bacia, e possivelmente sobre o Pantanal e as regiões andinas, a Amazônia é o segundo maior contribuinte do continente para a precipitação média anual³⁶, com a reciclagem de água local sobre a Bacia do Prata sendo a principal fonte. A respeito da região da Bacia do Prata, alguns autores estão de acordo que as áreas continentais são a principal fonte de vapor d'água³⁷. O transporte do vapor d'água ocorre em espaços relativamente estreitos da atmosfera chamados de “rios aéreos”. Adicionalmente, fontes externas do sul do Pacífico e do Atlântico tropical também contribuem para as precipitações na bacia³⁷. Drumond *et al.* (2008)³⁷ destacaram a influência do Oceano Atlântico tropical, que varia sazonalmente a partir das regiões norte nos meses de verão austral³⁶.

A região sudoeste da Bacia Amazônica é uma importante fonte direta de umidade incidente sobre a Bacia do Prata, a Amazônia andina e as regiões do Pantanal durante todo o ano. A água da Amazônia é exportada a partir da bacia, transportada via Jatos de Baixos Níveis na América do Sul (JBNAS) ao longo dos Andes^{3,32-34,37}. Essa circulação na região na estação quente representa um núcleo de ventos fortes de baixo nível no meio do transporte da umidade pelos ventos alísios vindos do Atlântico tropical. Esse sistema transporta e distribui umidade a partir de toda a Bacia Amazônica para a Bacia do Prata e a região da Amazônia andina, produzindo precipitação pluviométrica, bem como sobre o Pantanal e as terras de agricultura do centro-oeste brasileiro. Estudos prévios examinaram o papel desse jato de baixo nível no transporte da umidade e eventos ocasionais de precipitação extrema^{35,38,39}. Esse sistema também transporta fumaça e aerossóis de queima de

biomassa na Amazônia para regiões adjacentes, exacerbando a poluição atmosférica nas cidades dessas áreas⁴⁰.

Regulação climática proporcionada pelas florestas

Por que as florestas amazônicas são muito mais frias do que os usos da terra que muitas vezes as substituem? Estudos recentes sobre a regulação da temperatura da superfície terrestre indicam que as florestas amazônicas agem como um ar-condicionado gigante^{41,42}. Isso se relaciona principalmente à capacidade das florestas de circular grandes volumes de vapor d'água a partir do solo até a atmosfera via evapotranspiração⁴³. Comparada com a maioria dos cultivos da região, as florestas amazônicas possuem coberturas com folhagem mais ásperas, cobertura florestal mais densa durante a maior parte do ano, raízes mais profundas e em geral uma capacidade maior de absorver a energia solar e devolvê-la à atmosfera, predominantemente como calor latente⁵⁸ (Figura 7.1). Combinada com a alta radiação líquida na superfície e a precipitação inerente à região, essas características proporcionam às florestas uma capacidade desproporcional para refrescar sua folhagem. Por exemplo, a temperatura na superfície terrestre durante o dia nas áreas florestais do sudeste da Amazônia tende a ser 5°C mais baixa do que nas áreas desmatadas durante a estação seca, um resultado da redução da ET, em média, de um terço, à medida que as florestas são substituídas por pastagens e terras para cultivo⁴¹.

A superfície relativamente fria das florestas amazônicas se relaciona com as complexas interações entre processos biológicos, físicos e químicos⁴⁵. A maioria das espécies arbóreas amazônicas evita que as temperaturas das folhas aumentem acima de níveis críticos, a fim de evitar o superaquecimento e as reduções no crescimento e nos depósitos de carbono, o que influencia a sobrevivência das plantas⁴⁶. Alguns estudos sugerem que a temperatura ideal para fotossíntese das folhas é abaixo de 30°C, com a fotossíntese das folhas caindo abruptamente quando as temperaturas se elevam acima de 35°C⁴⁷, embora haja debates sobre se o mecanismo é causado pela

temperatura ou por déficit de pressão de vapor, que também depende da temperatura⁴⁸. Um recente estudo de longa duração observou que os estoques de carbono e os ganhos de carbono da floresta tropical na América do Sul diminuíram significativamente ($P < 0,001$) com a temperatura máxima média diária no mês mais quente⁴⁹. Esse processo ajuda a explicar porque a temperatura média da superfície das florestas amazônicas é normalmente abaixo de 30°C⁴⁴. Enquanto a ET controla grande parte da capacidade de regular as temperaturas da superfície, também entram em cena o ângulo da folhagem, pubescência, tamanho, formato, posição da cobertura, quantidade de folhas por galho e estrutura da cobertura⁴⁵.

A ET e as temperaturas da superfície terrestre parecem ser relativamente constantes na Bacia Amazônica. Ainda assim, existe uma significativa variabilidade temporal e de escala fina nas propriedades da cobertura, da ET e da temperatura da superfície terrestre. O principal processo ambiental que controla a variabilidade espacial é a radiação solar⁵⁰. Embora a potencial radiação de ondas curtas incidentes seja alta em toda a região, algumas partes da Amazônia (ex.: próximas aos Andes) recebem menos radiação do que outras devido a condições com mais nuvens (ex.: sudeste da Amazônia). O segundo fator relaciona-se à disponibilidade da água do solo. Durante uma estação seca intensa (ou em anos extremamente secos como durante o El Niño em 2015-2016), a baixa disponibilidade de água no solo indo para a última parte da estação seca pode limitar a ET e causar um relacionado aumento da temperatura da superfície terrestre⁵¹. No Cerrado, a ET na estação seca pode ficar abaixo da metade da ET na estação úmida⁵², com as temperaturas na superfície aumentando proporcionalmente até reduções na ET durante a última parte da estação seca. De forma similar, quando a umidade do solo cai abaixo de níveis críticos durante os anos de seca, o estresse hídrico das plantas pode provocar reduções na condutância estomática e na ET, resultando em temperaturas mais elevadas na superfície terrestre⁵³. Dessa forma, enquanto o clima sobre grande parte da Amazônia é adequado para as

plantas manterem uma alta ET e temperaturas mais frias, ainda existem padrões mais amplos por toda a região.

Embora com a mesma tendência, as temperaturas do ar e da superfície terrestre divergem frequentemente, com essas variações resultantes a partir de diferenças nos valores de calor específico do ar, solo e da água, e a partir de complexas interações entre propriedades atmosféricas, umidade do solo, radiação líquida e elevação. Em geral, as temperaturas do ar e da superfície terrestre convergem para valores similares durante a noite, mas divergem durante as partes mais quentes do dia, quando as temperaturas da superfície terrestre geralmente ultrapassam as temperaturas do ar em vários graus⁴⁵. Como grandes trechos das florestas amazônicas estão desmatados, esperamos grandes aumentos nas temperaturas da superfície⁴¹, uma vez que o desmatamento resulta na redução da evapotranspiração. Esse aquecimento pode ser maior do que os efeitos do resfriamento que o desmatamento causa devido ao aumento do albedo.

Efeitos da borda na temperatura e umidade Mais de 70% das florestas remanescentes do planeta estão a menos de 1 km de uma borda (borda adjacente a um campo) e menos de 20% está a menos de 100 m de uma borda⁵⁴. Em paisagens tropicais dominadas por humanos, as bordas das florestas e seus efeitos são pervasivos^{55,56}. No sudeste da Amazônia, quase 14% das florestas crescem a menos de 100 m de uma área desmatada⁵⁷.

Bordas da floresta adjacentes a campos desmatados são sujeitos à degradação florestal prolongada. Essas bordas e trechos de floresta são expostos a condições mais quentes, mais secas e com mais vento^{58,59}. Esses efeitos de borda degradam as florestas ao longo do tempo e possuem importantes implicações para a estrutura da floresta, especialmente porque tendem a aumentar desproporcionalmente a mortalidade das árvores dominantes do dossel no curto prazo⁶⁰. As mudanças resultantes no microclima facilitam, então, o estabelecimento de espécies pioneiras de

rápido crescimento, pequeno porte, de madeira leve (baixa densidade de madeira - BDM)⁶¹, causando reduções na região dos estoques de carbono na floresta no longo prazo^{62,63}.

As florestas tropicais são altamente resilientes a perturbações ocasionais, mas os efeitos combinados do desmatamento contínuo e de mudanças climáticas colocam grandes áreas da Floresta Amazônica em risco de maior degradação nas próximas décadas⁶⁴, especialmente ao longo das bordas da floresta que são vizinhas de campos desmatados adjacentes e em trechos isolados da floresta^{65,66}.

É essencial quantificar as causas da degradação da floresta para desenvolver, validar e parametrizar modelos de sistemas terrestres que simulam mecanisticamente mudanças nos estoques e fluxos de carbono entre a biosfera e a atmosfera⁶⁷. Avanços no mapeamento da degradação florestal e suas causas têm permitido substanciais melhorias na capacidade dos modelos de sistemas terrestres (MST) de projetar caminhos potenciais para as florestas amazônicas. Entretanto, poucos (se algum) desses novos avanços abordam a questão da degradação das bordas da floresta. Dessa forma, projetar o futuro das florestas amazônicas exige uma melhor representação dos efeitos das bordas das florestas nos MST.

Conclusões Os processos biogeofísicos internos exercem forte controle sobre o sistema hidrológico e climático da Bacia Amazônica. Isso é possível porque a floresta tropical desenvolve vários mecanismos para acessar a água armazenada em camadas profundas da água e fornecem a energia necessária para provocar e manter a convecção. Esses mecanismos combinados levam a um clima mais chuvoso, na média, e a uma estação chuvosa mais longa. Simultaneamente, esses mecanismos mantêm a temperatura do ar da superfície quente o suficiente para a convecção, mas não ultrapassam os limites das plantas. Juntamente com o controle da umidade e a temperatura do microclima nas bordas da floresta, esses mecanismos são recursos fundamentais do sistema conjunto biosfera-

atmosfera na Amazônia, ajudando a definir o clima da Amazônia e de outras partes da América do Sul. Adicionalmente, esses mecanismos garantem essa capacidade do sistema conjunto de tolerar a estação seca ao longo de sua fronteira sul e fornecer uma fonte estável de vapor d'água para a atmosfera quando o insumo do vapor d'água do Atlântico enfraquece.

Referências

- Zemp, D. C. *e outros* On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 13337–13359 (2014).
- Eltahir, E. A. B. & Bras, R. L. Precipitation recycling. *Rev. Geophys.* 34, 367–378 (1996).
- Van-der Ent, R., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B. & Steele-Dunne, S. C. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resour. Res.* 46, (2010).
- Da-Rocha, H. R. *e outros* Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *J. Geophys. Res.* 114, G00B12 (2009).
- Costa, M. H. *e outros* Atmospheric versus vegetation controls of Amazonian tropical rain forest evapotranspiration: Are the wet and seasonally dry rain forests any different? *J. Geophys. Res.* 115, G04021 (2010).
- Restrepo-Coupe, N. *e outros* Understanding water and energy fluxes in the Amazonia: Lessons from an observation-model intercomparison. *Glob. Chang. Biol.* gcb.15555 (2021) doi:10.1111/gcb.15555.
- Costa, M. H. & Foley, J. A. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon Basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 104, 14189–14198 (1999).
- Nepstad, D. C. *e outros* The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature* 372, 666–669 (1994).
- Chauvel, A. *e outros* O papel das raízes no ciclo hidrológico da floresta amazônica. *VII Congr. Bras. Meteorol.* 298–302 (1992).
- Negrón-Juárez, R. *e outros* Calibration, measurement, and characterization of soil moisture dynamics in a central Amazonian tropical forest. *Vadose Zo. J.* 19, 0–16 (2020).
- Bruno, R. D., da Rocha, H. R., de Freitas, H. C., Goulden, M. L. & Miller, S. D. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrol. Process.* 20, 2477–2489 (2006).
- Hodnett, M. G., da Silva, L. P., da Rocha, H. R. & Cruz Senna, R. Seasonal soil water storage changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *J. Hydrol.* 170, 233–254 (1995).
- Jipp, P. H., Nepstad, D. C., Cassel, D. K. & Reis De Carvalho, C. Deep Soil Moisture Storage and Transpiration in Forests and Pastures of Seasonally-Dry Amazonia. *Clim. Change* 39, 395–412 (1998).
- Dawson, T. E., Mambelli, S., Plamboeck, A. H., Templer, P. H. & Tu, K. P. Stable Isotopes in Plant Ecology. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 33, 507–559 (2002).
- Oliveira, R. S., Dawson, T. E., Burgess, S. S. O. & Nepstad, D. C. Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. *Oecologia* 145, 354–363 (2005).
- Fan, Y. & Miguez-Macho, G. Potential groundwater contribution to Amazon evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 2039–2056 (2010).
- Romero-Saltos, H., Sternberg, L. D. S. L., Moreira, M. Z. & Nepstad, D. C. Rainfall exclusion in an eastern Amazonian forest alters soil water movement and depth of water uptake. *Am. J. Bot.* 92, 443–455 (2005).
- Brum, M. *e outros* Hydrological niche segregation defines forest structure and drought tolerance strategies in a seasonal Amazon forest. *J. Ecol.* 107, 318–333 (2019).
- Ivanov, V. Y. *e outros* Root niche separation can explain avoidance of seasonal drought stress and vulnerability of overstory trees to extended drought in a mature Amazonian forest. *Water Resour. Res.* 48, (2012).
- Rowland, L. *e outros* Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature* 528, 119–122 (2015).
- Singh, C., Wang-Erlandsson, L., Fetzer, I., Rockström, J. & van der Ent, R. Rootzone storage capacity reveals drought coping strategies along rainforest-savanna transitions. *Environ. Res. Lett.* 15, 124021 (2020).
- Hasler, N. & Avissar, R. What controls evapotranspiration in the Amazon basin? *J. Hydrometeorol.* 8, 380–395 (2007).
- Christoffersen, B. O. *e outros* Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado. *Agric. For. Meteorol.* 191, 33–50 (2014).
- Eltahir, E. A. B. Role of vegetation in sustaining large-scale atmospheric circulations in the tropics. *J. Geophys. Res. Atmos.* 101, 4255–4268 (1996).
- Zeng, N. & Neelin, J. D. A Land–Atmosphere Interaction Theory for the Tropical Deforestation Problem. *J. Clim.* 12, 857–872 (1999).
- Dirmeyer, P. A. & Shukla, J. Albedo as a modulator of climate response to tropical deforestation. *J. Geophys. Res.* 99, 20863 (1994).
- Wright, J. S. *e outros* Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114, 8481–8486 (2017).
- Leite-Filho, A. T., Costa, M. H. & Fu, R. The southern Amazon rainy season: The role of deforestation and its interactions with large-scale mechanisms. *Int. J. Climatol.* 40, 2328–2341 (2020).
- 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).
- Spracklen, D. V., Arnold, S. R. & Taylor, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. *Nature* 489, 282–285 (2012).
- 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).
- Marengo, J. A., Soares, W. R., Saulo, C. & Nicolini, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived

- from the NCEP--NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. *J. Clim.* 17, 2261–2280 (2004).
33. Arraut, J. M., Nobre, C., Barbosa, H. M. J., Obregon, G. & Marengo, J. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. *J. Clim.* 25, 543–556 (2012).
 34. Drumond, A. *e outros* The role of the Amazon Basin moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 2577–2598 (2014).
 35. Gimeno, L. *e outros* Recent progress on the sources of continental precipitation as revealed by moisture transport analysis. *Earth-Science Rev.* 201, 103070 (2020).
 36. Martinez, J. A. & Dominguez, F. Sources of Atmospheric Moisture for the La Plata River Basin*. *J. Clim.* 27, 6737–6753 (2014).
 37. Drumond, A., Nieto, R., Gimeno, L. & Ambrizzi, T. A Lagrangian identification of major sources of moisture over Central Brazil and La Plata Basin. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113, (2008).
 38. Gimeno, L. *e outros* Major mechanisms of atmospheric moisture transport and their role in extreme precipitation events. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 41, 117–141 (2016).
 39. Marengo, J. A. Drought, Floods, Climate Change, and Forest Loss in the Amazon Region: A Present and Future Danger? *Front. Young Minds* 7, (2020).
 40. Mendez-Espinosa, J. F., Belalcazar, L. C. & Morales Betancourt, R. Regional air quality impact of northern South America biomass burning emissions. *Atmos. Environ.* 203, 131–140 (2019).
 41. Silvério, D. V *e outros* Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. *Environ. Res. Lett.* 10, 104015 (2015).
 42. Coe, M. T. *e outros* The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. *Trop. Conserv. Sci.* 10, 194008291772067 (2017).
 43. Nobre, C. A. *e outros* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 10759–10768 (2016).
 44. Coe, M. T. *e outros* The Hydrology and Energy Balance of the Amazon Basin. in *Interactions Between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)* 35–53 (Springer, Berlin, Heidelberg, 2016). doi:10.1007/978-3-662-49902-3_3.
 45. Still, C. *e outros* Thermal imaging in plant and ecosystem ecology: applications and challenges. *Ecosphere* 10, (2019).
 46. Brando, P. M. *e outros* Droughts, Wildfires, and Forest Carbon Cycling: A Pantropical Synthesis. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 47, 555–581 (2019).
 47. Doughty, C. E. & Goulden, M. L. Are tropical forests near a high temperature threshold? *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 113, n/a-n/a (2008).
 48. Smith, M. N. *e outros* Empirical evidence for resilience of tropical forest photosynthesis in a warmer world. *Nat. Plants* 6, 1225–1230 (2020).
 49. Sullivan, M. J. P. *e outros* Long-term thermal sensitivity of Earth's tropical forests. *Science* 368, 869–874 (2020).
 50. Fisher, J. B. *e outros* The land-atmosphere water flux in the tropics. *Glob. Chang. Biol.* 15, 2694–2714 (2009).
 51. Gimenez, B. O. *e outros* Species-Specific Shifts in Diurnal Sap Velocity Dynamics and Hysteretic Behavior of Ecophysiological Variables During the 2015–2016 El Niño Event in the Amazon Forest. *Front. Plant Sci.* 10, (2019).
 52. Costa, M. H. & Pires, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *Int. J. Climatol.* 30, 1970–1979 (2010).
 53. Toomey, M., Roberts, D. A., Still, C., Goulden, M. L. & McFadden, J. P. Remotely sensed heat anomalies linked with Amazonian forest biomass declines. *Geophys. Res. Lett.* 38, n/a-n/a (2011).
 54. Haddad, N. M. *e outros* Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Sci. Adv.* 1, e1500052 (2015).
 55. Skole, D. & Tucker, C. Tropical Deforestation and Habitat Fragmentation in the Amazon: Satellite Data from 1978 to 1988. *Science* 260, 1905–1910 (1993).
 56. Pfeifer, M. *e outros* Creation of forest edges has a global impact on forest vertebrates. *Nature* 551, 187–191 (2017).
 57. Brando, P. M. *e outros* Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 6347–6352 (2014).
 58. Didham, R. K. & Lawton, J. H. Edge structure determines the magnitude of changes in microclimate and vegetation structure in tropical forest fragments. *Biotropica* 31, 17–30 (1999).
 59. Schwalm, C. R. *e outros* Global patterns of drought recovery. *Nature* 548, 202–205 (2017).
 60. Laurance, W. F., Delamônica, P., Laurance, S. G., Vasconcelos, H. L. & Lovejoy, T. E. Rainforest fragmentation kills big trees. *Nature* 404, 836–836 (2000).
 61. Laurance, W. F. *e outros* Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: a 22-year investigation. *Conserv. Biol.* 16, 605–618 (2002).
 62. Chaplin-Kramer, R. *e outros* Spatial patterns of agricultural expansion determine impacts on biodiversity and carbon storage. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 112, 7402–7407 (2015).
 63. Silva Junior, C. H. L. *e outros* Persistent collapse of biomass in Amazonian forest edges following deforestation leads to unaccounted carbon losses. *Sci. Adv.* 6, eaaz8360 (2020).
 64. Maxwell, S. L. *e outros* Degradation and forgone removals increase the carbon impact of intact forest loss by 626%. *Sci. Adv.* 5, eaax2546 (2019).
 65. Gascon, C., Williamson, G. B. & Da Fonseca, G. A. B. Receding forest edges and vanishing reserves. *Science* 288, 1356–1358 (2000).
 66. Matricardi, E. A. T. *e outros* Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. *Science* 369, 1378–1382 (2020).
 67. Rödiger, E. *e outros* The importance of forest structure for carbon fluxes of the Amazon rainforest. *Environ. Res. Lett.* 13, 054013 (2018).