ANÁLISE DE TENDÊNCIAS EM DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR E REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO NA BACIA AMAZÔNICA PARA OS MESES DE SETEMBRO EM ANOS DE SECAS SEVERAS ENTRE 2003 E 2024

Arthur Kauê Buarque da Silva [1]; Fábio Farias Pereira [2] ; Thomas Pugh [3] ; Lauan Felipe da Rocha Oliveira [4]; João Guilherme Batista da Silva [5]; Alysson Deodato Ferreira [6]; Johnny Cavalcante da Silva [7]; Lucas Ricardo Ferreira dos Santos [8] & Luiz Henrique da Silva [9]

RESUMO – O déficit de pressão de vapor atmosférico (VPD) é um controle de primeira ordem sobre a transpiração, a condutância estomática e o risco de mortalidade em florestas tropicais, e tem aumentado em escala global. Este trabalho quantifica, em escala da bacia amazônica, a tendência do VPD de setembro e a resposta espacial da reflectância da vegetação, através do Índice de Vegetação Realçada (EVI), entre 2003 e 2024, utilizando exclusivamente dados das seguintes missões espaciais: ERA5-Land, MOD13A2, MOD44B. Foram computadas tendências de Theil-Sen com teste de Mann-Kendall, regressões pixel a pixel de anomalias EVI-VPD para diagnosticar regimes de acoplamento, e compostos de anomalias para os anos de seca severa de 2005, 2010, 2015 e 2023. O VPD médio bacia apresenta tendência de +0,47 kPa por década, com setembro de 2024 constituindo o valor mais elevado de toda a série. O mapa de acoplamento ∂EVI/∂VPD revela um padrão espacial coerente, em que regiões de transição com a savana mostram acoplamento negativo, enquanto a Amazônia ocidental densa apresenta acoplamento positivo, consistente com o controle por limitação luminosa.

Abstract – Atmospheric vapor pressure deficit (VPD) is a first-order control on transpiration, stomatal conductance, and tree mortality risk in tropical forests, and has been increasing globally. This study quantifies, across the Amazon Basin, the September VPD trend and the spatial response of vegetation reflectance through the Enhanced Vegetation Index (EVI) between 2003 and 2024, using exclusively data from the ERA5-Land, MOD13A2, and MOD44B satellite missions. The analysis employed Theil–Sen trend estimation combined with the Mann–Kendall significance test,

[1]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, arthur.buarque@ceca.ufal.br
[2]) Afiliação: Laboratótio de Pesquisas em Recursos Naturais (LPqRN), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil, fabio.pereira@ceca.ufal.br
[3]) Afiliação: Department of Physical Geography and Ecosystem Science, Lund University, Lund, Suécia; Department of Earth and Environmental Sciences (MGeo), Lund University, Lund, Suécia, thomas.pugh@nateko.lu.se
[4]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, lauan.oliveira@ceca.ufal.br
[5]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, joao.guilherme@ceca.ufal.br
[6]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, alysson.ferreira@ceca.ufal.br
[7]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, johnny.silva@ceca.ufal.br
[8]) Afiliação: Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Campus A. C. Simões, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, Maceió – AL, Brasil, (82) 3261-1676, lcsoztx@gmail.com
[9]) Afiliação: Laboratório de Pesquisas em Recursos Naturais (LPqRN), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Brasil

pixel-by-pixel regressions between EVI and VPD anomalies to diagnose coupling regimes, and anomaly composites for the severe drought years of 2005, 2010, 2015, and 2023. Results indicate that mean basin-wide VPD increased at a rate of +0.47 kPa per decade, with September 2024 presenting the highest value recorded in the entire time series. The ∂EVI/∂VPD coupling map reveals a coherent spatial pattern in which savanna transition zones exhibit negative coupling, whereas the densely forested western Amazon shows positive coupling, consistent with vegetation dynamics primarily controlled by light limitation rather than atmospheric water demand. These findings highlight the heterogeneous response of Amazonian ecosystems to increasing atmospheric dryness and provide important insights into the climatic drivers influencing vegetation functioning across the basin.

Palavras-Chave – Déficit de pressão de vapor, reflectância de vegetação, Amazônia.

INTRODUÇÃO

O déficit de pressão de vapor atmosférico (VPD) é a diferença entre a pressão de vapor de saturação e a pressão de vapor real do ar e, em florestas tropicais, exerce controle de primeira ordem sobre a condutância estomática, a transpiração e o risco hidráulico das árvores. Aumentos de VPD têm sido documentados em escala global (Yuan et al., 2019) e, na Amazônia, associados ao prolongamento da estação seca e à intensificação de eventos de seca (Barkhordarian et al., 2019). Por se tratar do principal sinal atmosférico de estresse hídrico em florestas úmidas, o entendimento do acoplamento entre tendências de VPD e a resposta da vegetação é central para diagnosticar a vulnerabilidade do bioma amazônico em um clima futuro mais quente e seco.

A reflectância da vegetação observada por satélite, em particular o Índice de Vegetação Realçada (EVI) do sensor MODIS, é uma fonte de dados desde 2000 que tem sido utilizada para caracterizar respostas florestais a episódios de seca (Anderson et al., 2010; Saleska et al., 2007). Trabalhos prévios, contudo, divergem quanto ao sinal e à magnitude da resposta do EVI a anomalias atmosféricas, em parte por causa de artefatos de geometria de visada - que são distorções ou erros em imagens captadas por satélites devido ao amplo ângulo de visão, à topografia do terreno ou ao movimento do sensor, causando deslocamentos, compressões ou sombras que exigem correção geométrica - e saturação do índice em dosséis densos (Samanta et al., 2010). A maior parte das análises trata o conjunto da bacia ou compara médias de torres, restando lacuna no mapeamento espacialmente explícito do acoplamento ∂EVI/∂VPD que possa orientar a validação de modelos baseados em processos.

Este trabalho tem por objetivos: (i) caracterizar a tendência espacial do VPD para os meses de setembro na bacia amazônica em anos de secas severas entre 2003 e 2024; (ii) quantificar a tendência associada do EVI no mesmo período; (iii) estimar, pixel a pixel, a sensibilidade ∂EVI/∂VPD a partir de anomalias mensais, identificando regimes de acoplamento; e (iv) avaliar, por compostos de anomalias, a coerência do mapa de acoplamento com os anos de seca severa de 2005, 2010, 2015 e

2023. A análise restringe-se à floresta estável e utiliza exclusivamente dados de acesso livre. Os resultados são apresentados como alvos observacionais para etapas posteriores de validação espacialmente explícita de modelos de vegetação baseados em processos, em particular o Ecosystem Demography 2.2 (Medvigy et al., 2009).

DADOS E MÉTODOS

Toda a cadeia de processamento está estruturada em torno de três produtos: (a) ERA5-Land horária para a derivação do VPD; (b) MOD13A2 v061 para o EVI; e (c) MOD44B v006 para a definição da máscara de floresta estável. A bacia amazônica foi delimitada por um polígono que cujo as coordenadas são: –79°W, –50°W, –18°S, 5°N. A análise concentra-se no mês de setembro porque é o núcleo da estação seca em grande parte da bacia.

Para isolar o sinal florestal de processos de uso do solo, aplicou-se máscara de floresta estável a partir do produto MOD44B Vegetation Continuous Fields, onde foram retidos apenas os pixels cuja cobertura de árvores foi ≥ 70% em todos os anos do período 2003-2024. Esta definição é conservadora e descarta áreas de desmatamento, regeneração e transição.

O VPD foi calculado a partir das variáveis temperatura do ar a 2 m (T) e temperatura do ponto de orvalho (Td) do ERA5-Land horário, filtradas para a hora 17 UTC (aproximadamente 12-14 h locais na bacia), representativa do meio do dia. As pressões de vapor de saturação (e_s) e real (e_a), em kPa, foram obtidas pela equação de Tetens (Allen et al., 1998):

$$e(T) = 0{,}6108 \exp \frac{17{,}27T}{T+237{,}3} \quad (1)$$

com T em °C. O VPD instantâneo de cada hora foi calculado como $e_s(T) - e_s(Td)$ e agregado para média mensal de setembro de cada ano.

A reflectância foi quantificada pelo EVI proveniente do produto MOD13A2 v061 (resolução de 1 km, composição de 16 dias). Os valores foram convertidos pela escala oficial (i.e. 0,0001) e agregados para média de setembro. O EVI foi reamostrado para a grade do VPD por média espacial nas operações de regressão.

Para cada pixel, calculou-se a tendência temporal pelo método não-paramétrico de Theil-Sen e a significância pelo teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), aplicados separadamente ao VPD e ao EVI. Para estimar o acoplamento, computaram-se as anomalias mensais (valor de cada ano menos a climatologia 2003-2024) e ajustou-se uma regressão linear por mínimos quadrados ordinários pixel a pixel da forma $EVI' = a + b \cdot VPD'$, sendo b o coeficiente $\partial EVI/\partial VPD$. Adicionalmente, foram extraídas as anomalias compostas de setembro para os anos de seca severa de

2005, 2010, 2015 e 2023, utilizadas como avaliação independente da coerência do mapa de acoplamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 apresenta a tendência espacial do VPD de setembro entre 2003 e 2024. O sinal é positivo em 99,9% da área florestal estável analisada (n = 19.738 pixels), com mediana de +0,040 kPa por ano e percentil 95 de +0,076 kPa por ano. Os incrementos mais elevados concentram-se em uma faixa contínua entre o leste do Pará, norte de Mato Grosso e Rondônia, sobreposta à região conhecida como arco de desmatamento. O padrão é consistente com a hipótese de que a redução de cobertura florestal a jusante e o aquecimento regional reforçam o secamento atmosférico durante a estação seca (Barkhordarian et al., 2019).

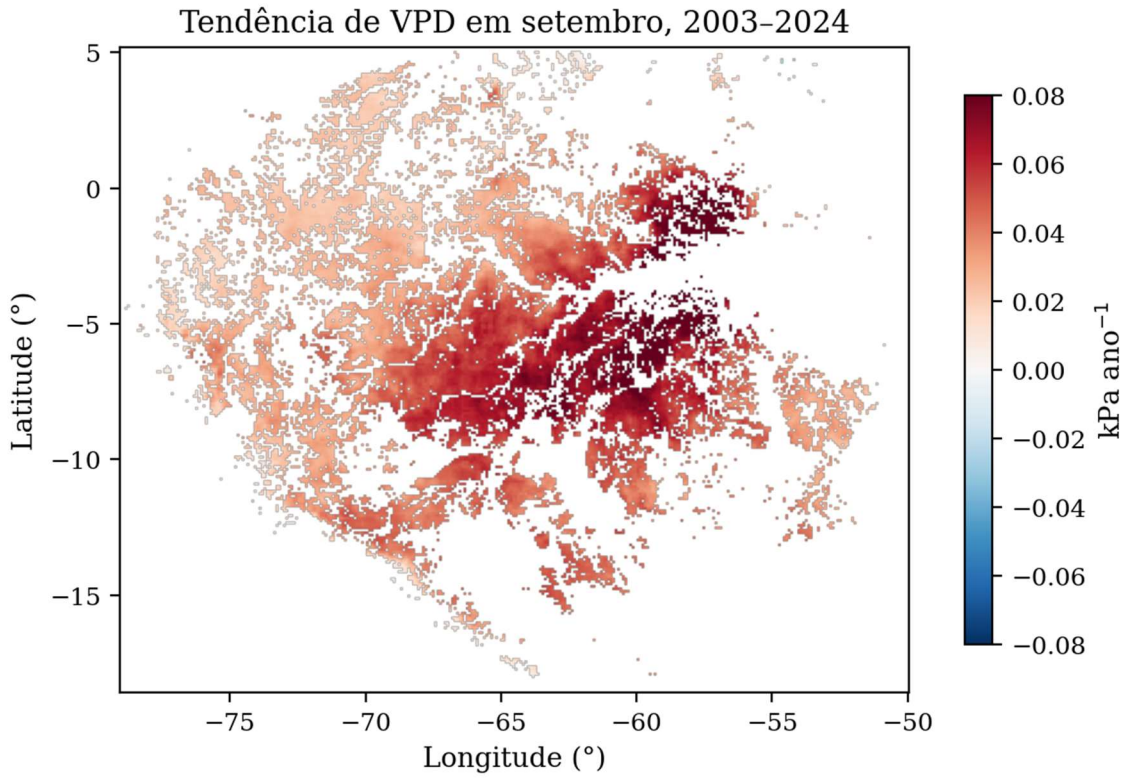


Figura 1 – Tendência espacial do VPD de setembro (kPa por ano) na bacia amazônica, 2003–2024, restrita à floresta estável.

A figura 2 mostra a evolução das médias bacia. A tendência linear da série anual é de +0,47 kPa por década ($R^2 = 0,49$, $p < 0,001$), corroborada pelo teste de Mann-Kendall ($\tau = 0,54$, $p < 0,001$). O setembro de 2024 registra média bacia de 3,15 kPa, o valor mais elevado de toda a série e cerca de

0,8 kPa acima da climatologia 2003-2024. O segundo valor mais elevado ocorre em 2023 (2,74 kPa), confirmando a natureza extrema do biênio recente.

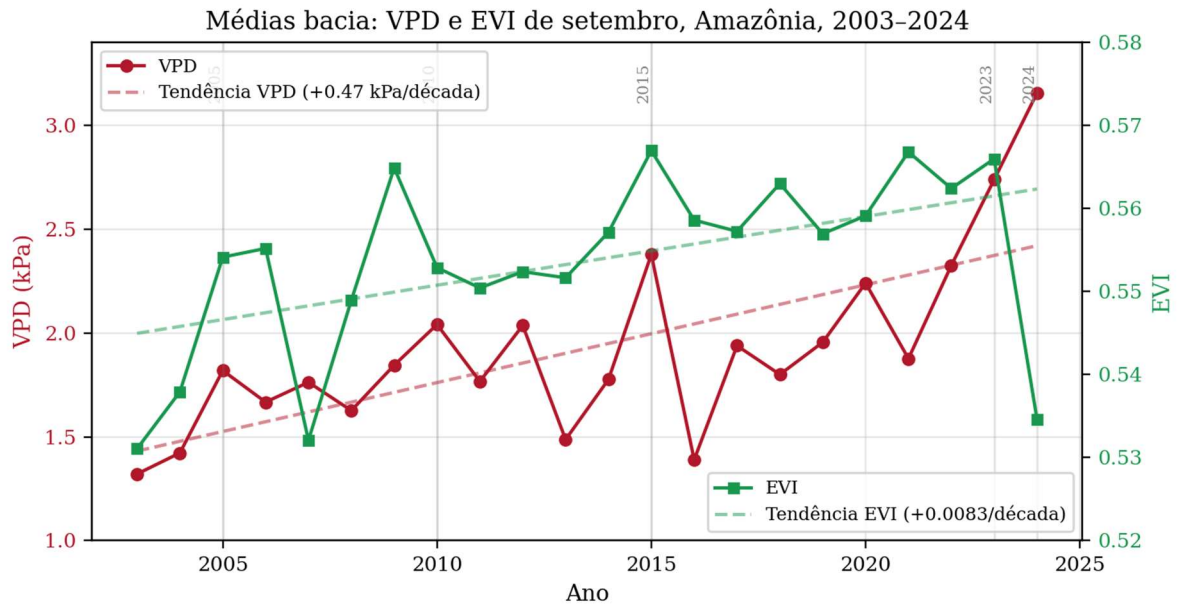


Figura 2 – Médias bacia do VPD (vermelho) e EVI (verde) de setembro entre 2003 e 2024, com retas de tendência linear e marcação dos anos de seca severa.

A figura 3 mostra a tendência do EVI. O sinal médio é levemente positivo, com 71% dos pixels apresentam tendência positiva, contra 29% com tendência negativa, e a média bacia evolui a +0,008 EVI por década (R^2 = 0,24, p = 0,02). Embora a tendência média seja oposta à do VPD, o padrão espacial não é homogêneo, uma vez que as porções centro-leste e o arco sul mostram regiões extensas de tendência negativa, enquanto a Amazônia ocidental e o norte mostram *greening*. Este resultado é coerente com a literatura recente, que identifica um gradiente regional em que o *greening* responde a fatores não capturados nesta análise simplificada, em particular, fertilização por CO_2, recuperação pós-distúrbios e variação na composição funcional (Wigneron et al., 2020).

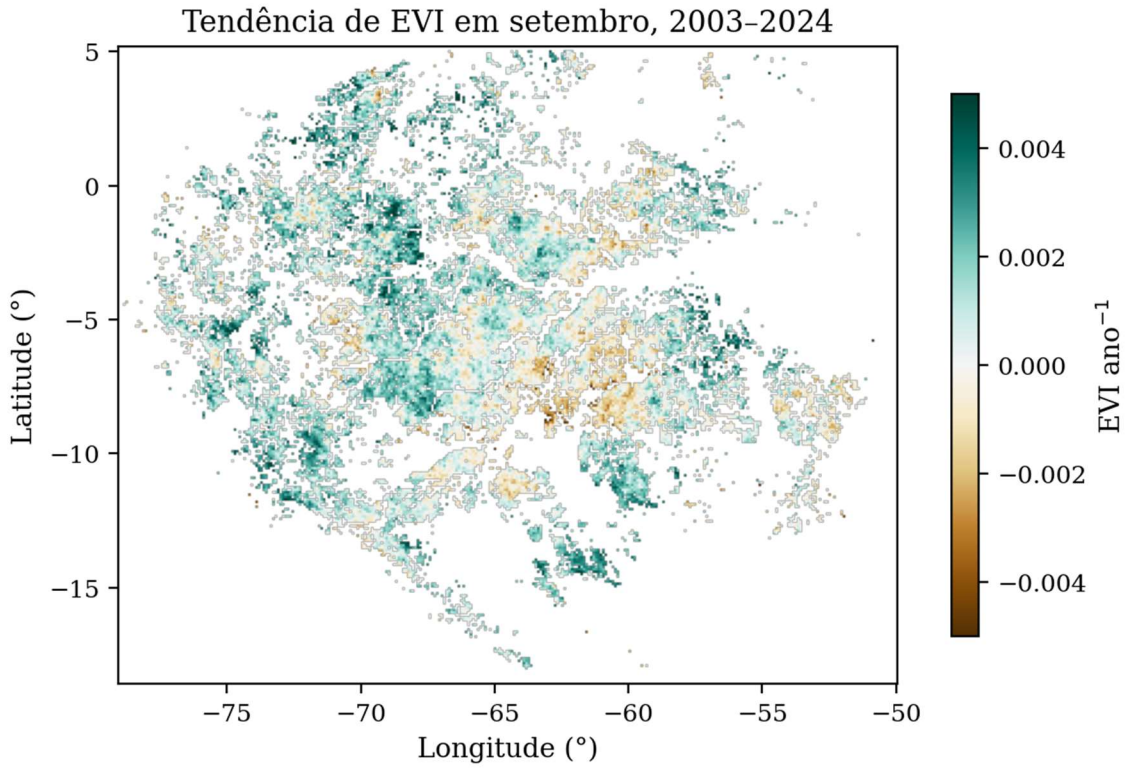


Figura 3 –Tendência espacial do EVI de setembro (EVI por ano) na bacia amazônica, 2003-2024.

A figura 4, mapa de acoplamento ∂EVI/∂VPD, é o resultado central deste trabalho. O mapa revela três regimes espaciais distintos. Primeiro, a Amazônia ocidental densa (Colômbia, Peru e oeste do Amazonas) apresenta acoplamento positivo (∂EVI/∂VPD > 0), interpretado como o já documentado fenômeno de *greening* sob seca em florestas predominantemente limitadas pela radiação, isto é, em anos de menor cobertura de nuvens, frequentemente correlacionados com VPD elevado, a fração da radiação fotossinteticamente ativa que atinge o dossel aumenta, refletindo-se em incremento aparente do EVI (Saleska et al., 2007). Parte deste sinal, contudo, é também atribuída a artefatos de geometria de visada e saturação do EVI em dosséis muito densos (Samanta et al., 2010), de modo que esta região sugere cautela interpretativa. Segundo, a faixa central da bacia apresenta acoplamento próximo de zero, indicativo de regime intermediário em que controles atmosféricos e edáficos se compensam. Terceiro, o sul da bacia e a transição com o Cerrado mostram acoplamento negativo, consistente com regime limitado pela oferta hídrica em que aumentos de VPD induzem fechamento estomático e redução da atividade fotossintética. Em termos quantitativos, 44% dos pixels apresentam coeficiente negativo, com mediana *basin-wide* de +0,003 kPa^{-1} e percentil 5 de –0,030 kPa^{-1}.

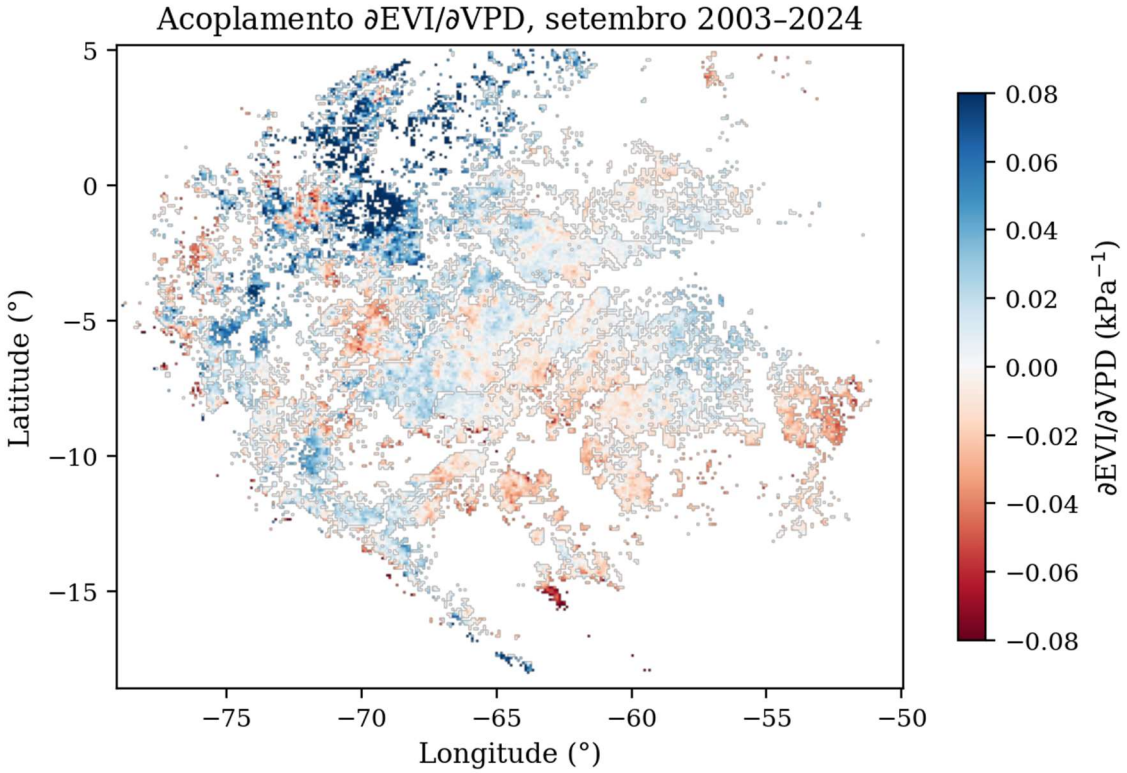


Figura 4 – Mapa do coeficiente ∂EVI/∂VPD (kPa⁻¹) estimado pixel a pixel por regressão linear de anomalias mensais de setembro, 2003–2024. Valores positivos indicam aumento aparente de EVI sob anomalias positivas de VPD; valores negativos indicam redução.

Os compostos de anomalias em anos de seca severa (figura 5) corroboram parte deste diagnóstico. As anomalias positivas de VPD em 2015 (+0,45 kPa em média) e 2023 (+0,81 kPa em média) são as mais intensas do período e concentram-se no leste e centro da bacia. As anomalias correspondentes de EVI são, em média *basin-wide*, ligeiramente positivas (+0,013 em 2015 e +0,012 em 2023), reproduzindo o fenômeno aparente de *drought green-up* já discutido na literatura (Saleska et al., 2007; Samanta et al., 2010). Importante destacar que a fração de pixels com anomalia negativa de EVI cresce nos anos secos (38% em 2023 vs. ≈30% em anos típicos), e o sinal negativo concentra-se justamente no sul da bacia, onde o acoplamento médio é negativo. Este alinhamento espacial reforça a interpretação do mapa de acoplamento como diagnóstico de regimes hídrico-luminosos, ainda que limitado pela saturação do EVI em vegetação densa.

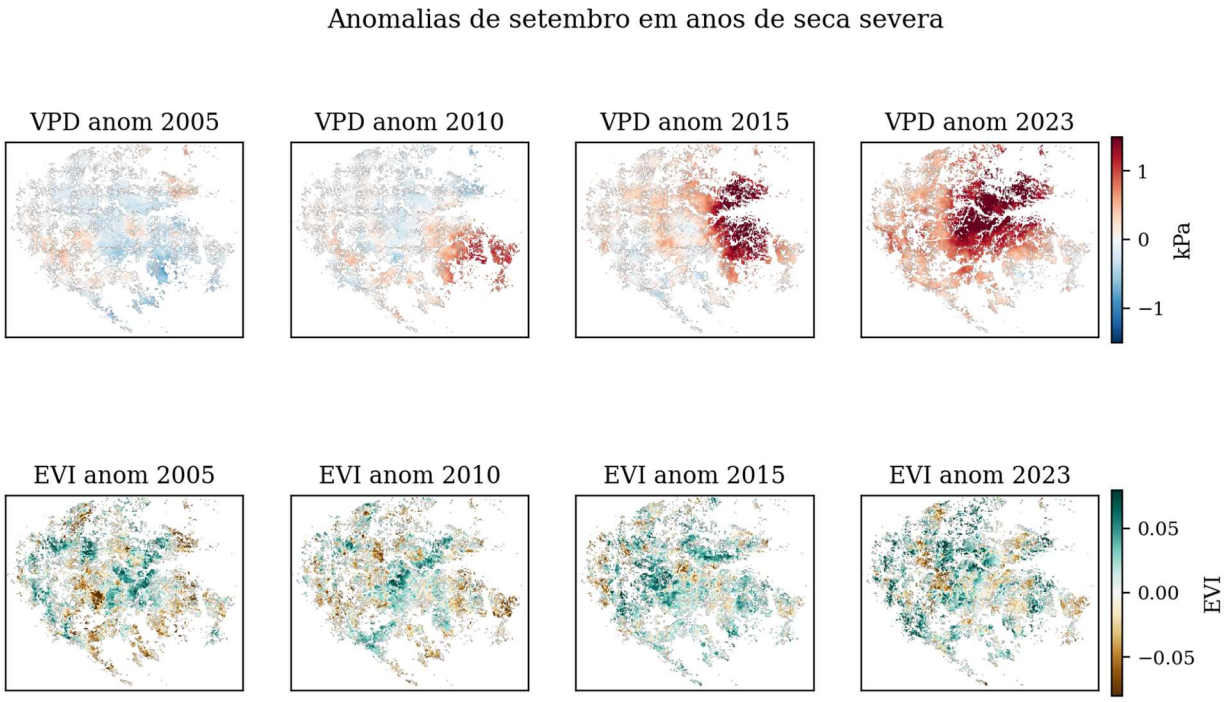


Figura 5 – Anomalias de VPD (linha superior, kPa) e EVI (linha inferior) em setembro dos anos de seca severa de 2005, 2010, 2015 e 2023, calculadas em relação à climatologia 2003-2024.

Como conjunto, os resultados delineiam três contribuições. Primeiro, confirmam a magnitude e a abrangência da tendência de VPD em setembro na bacia amazônica e mostram que o biênio 2023-2024 amplia substancialmente os extremos previamente reportados na literatura. Segundo, demonstram que a resposta do EVI a VPD é espacialmente heterogênea, com regimes opostos coexistentes na mesma bacia, e que esta heterogeneidade é compatível com a dicotomia conceitual entre regimes limitados por luz e regimes limitados por água. Terceiro, e em conexão direta com a agenda metodológica de validação de modelos baseados em processos, o mapa de acoplamento fornece alvo observacional espacialmente explícito que pode ser confrontado com simulações do modelo Ecosystem Demography 2.2 (ED-2.2; Medvigy et al., 2009; Longo et al., 2019), notadamente em relação aos esquemas de condutância estomática e hidráulica vegetal.

O escopo da análise é reduzido e diversas limitações devem ser reconhecidas. A saturação do EVI em dosséis muito densos (LAI > 5) pode amortecer o sinal de acoplamento exatamente onde o efeito biológico do VPD seria mais relevante. O uso de um único horário (17 UTC) para representar o VPD diurno introduz aproximação que deverá ser refinada por média diurna. A análise *pixel-wise* de ∂EVI/∂VPD não controla, na presente forma, o confundimento com umidade do solo, trata-se de controle clássico identificado por Novick et al. (2016). Estas limitações motivam a expansão prevista da análise para incluir fluorescência induzida pelo sol (TROPOMI), evapotranspiração derivada por

GLEAM e umidade do solo SMAP, e a confrontação dos mapas resultantes com simulações de modelos de ecossistemas.

CONCLUSÕES

Entre 2003 e 2024, a média bacia do VPD de setembro na Amazônia aumentou a +0,47 kPa por década ($p < 0,001$), com setembro de 2024 estabelecendo novo extremo (3,15 kPa). A resposta da reflectância da vegetação ao VPD, quantificada por regressão pixel a pixel das anomalias EVI-VPD, é espacialmente heterogênea, com acoplamento positivo na Amazônia ocidental densa, neutro no centro da bacia e negativo na transição sul com o Cerrado. O padrão é internamente coerente com compostos de anomalias dos anos de seca severa de 2005, 2010, 2015 e 2023. Os resultados estabelecem alvo observacional para validação espacialmente explícita de modelos baseados em processos como o ED-2.2 e motivam a expansão da análise para ET e umidade do solo em estudos subsequentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Climate Data Store (Copernicus/ECMWF), à NASA LP DAAC e ao Google Earth Engine pela disponibilização gratuita dos dados e da plataforma computacional utilizados neste trabalho.

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL), através do projeto "Assessing the feasibility of integrating Atlantic Forest dynamics into the Tree2Globe global forest reanalysis system". Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento concedido via Chamada Universal 2025 para o projeto "Até que ponto herbívoros invertebrados influenciam a absorção de água e nitrogênio pelas plantas em florestas tropicais?", e pelo suporte no âmbito do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) "Bioinovações para Agricultura Sustentável".

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Roma, 300 p.

ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LADLE, R.; ARAI, E.; BARBIER, N.; PHILLIPS, O. (2010). "*Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies*". New Phytologist 187(3), pp. 733–750.

BARKHORDARIAN, A.; SALEEM, A.; LARSON, K. M.; FU, R.; KUMAR, A. (2019). "*A recent systematic increase in vapor pressure deficit over tropical South America*". Scientific Reports 9, 15331.

KENDALL, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. 4. ed., Charles Griffin, Londres, 202 p.

LONGO, M.; KNOX, R. G.; MEDVIGY, D. M.; LEVINE, N. M.; DIETZE, M. C.; KIM, Y.; SWANN, A. L. S.; ZHANG, K.; ROLLINSON, C. R.; BRAS, R. L.; WOFSY, S. C.; MOORCROFT, P. R. (2019). "*The biophysics, ecology, and biogeochemistry of functionally diverse, vertically and horizontally heterogeneous ecosystems: the Ecosystem Demography model, version 2.2*". Geoscientific Model Development 12, pp. 4309–4346.

MANN, H. B. (1945). "*Nonparametric tests against trend*". Econometrica 13(3), pp. 245–259.

MEDVIGY, D. M.; WOFSY, S. C.; MUNGER, J. W.; HOLLINGER, D. Y.; MOORCROFT, P. R. (2009). "*Mechanistic scaling of ecosystem function and dynamics in space and time: Ecosystem Demography model version 2*". Journal of Geophysical Research – Biogeosciences 114, G01002.

NOVICK, K. A.; FICKLIN, D. L.; STOY, P. C.; WILLIAMS, C. A.; BOHRER, G.; OISHI, A. C.; PAPUGA, S. A.; BLANKEN, P. D.; NOORMETS, A.; SULMAN, B. N.; SCOTT, R. L.; WANG, L.; PHILLIPS, R. P. (2016). "*The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes*". Nature Climate Change 6, pp. 1023–1027.

SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; DA ROCHA, H. R. (2007). "*Amazon forests green-up during 2005 drought*". Science 318(5850), p. 612.

SAMANTA, A.; GANGULY, S.; HASHIMOTO, H.; DEVADIGA, S.; VERMOTE, E.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. (2010). "*Amazon forests did not green-up during the 2005 drought*". Geophysical Research Letters 37, L05401.

WIGNERON, J.-P.; FAN, L.; CIAIS, P.; BASTOS, A.; BRANDT, M.; CHAVE, J.; SAATCHI, S.; BACCINI, A.; FENSHOLT, R. (2020). "*Tropical forests did not recover from the strong 2015–2016 El Niño event*". Science Advances 6, eaay4603.

YUAN, W.; ZHENG, Y.; PIAO, S.; CIAIS, P.; LOMBARDOZZI, D.; WANG, Y.; RYU, Y.; CHEN, G.; DONG, W.; HU, Z.; JAIN, A. K.; JIANG, C.; KATO, E.; LI, S.; LIENERT, S.; LIU, S.; NABEL, J. E. M. S.; QIN, Z.; QUINE, T.; SITCH, S.; SMITH, W. K.; WANG, F.; WU, C.; XIAO, Z.; YANG, S. (2019). "*Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth*". Science Advances 5, eaax1396.