

NOTA TÉCNICA

Metodologia de Análise Hidrológica de Tendências em Bacias Amazônicas a partir de Dados ANA e CHIRPS

Autor(a) da análise técnica: Renan Cassimiro Brito

Data de elaboração: 31 de agosto de 2026

Versão: 1.0

1. Objetivo

Esta nota técnica descreve, de forma resumida e não especializada, os métodos estatísticos, as ferramentas computacionais e as fontes de dados utilizadas na análise hidrológica que fundamenta a reportagem indicada acima. O objetivo é permitir que leitores, editores e pareceristas possam avaliar a robustez, os limites e a reprodutibilidade da análise que embasa as afirmações jornalísticas sobre tendências de vazão, chuva e regime hidrológico na bacia estudada.

Nota sobre escopo deste documento: esta é uma nota técnica de *metodologia*, comum às diferentes reportagens produzidas a partir do mesmo pipeline de análise. Os resultados numéricos, tabelas, mapas e a síntese diagnóstica específicos de cada bacia estudada constam nos respectivos *relatórios diagnósticos integrados*, que devem ser lidos em conjunto com esta nota.

2. Escopo e Área de Estudo

A análise cobre estações fluviométricas (vazão e cota) e pluviométricas (precipitação) da rede da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), localizadas na área de estudo definida pelo(a) analista responsável. O período de referência utilizado na seleção de estações é **2000–2026**, com exigência de no mínimo 10 anos de dados por estação.

3. Fontes de Dados

- Séries históricas de vazão, cota e precipitação: rede de estações da ANA, obtidas via portal HidroWeb.
- Modelo digital de elevação (relevo): FathomDEM, modelo global de terreno de 30 m de resolução, usado para delimitar as bacias de contribuição.
- Precipitação espacializada sobre as bacias de contribuição: produto de sensoriamento remoto CHIRPS, processado via Google Earth Engine. *⚠ Disponível no pipeline, mas NÃO utilizado nos resultados publicados — ver ressalva na seção 4.6.*
- Camadas geográficas de apoio (limites de bacia, hidrografia):

4. Metodologia

A análise segue um pipeline com as seguintes etapas: (i) aquisição e seleção de estações; (ii) detecção estatística de tendências e pontos de mudança na vazão; (iii) caracterização de anomalias e da sazonalidade hidrológica; (iv) delimitação de bacias e cálculo da área de contribuição; (v) tendências de precipitação em estações terrestres; e, como capacidades adicionais do pipeline não utilizadas nos resultados publicados por conta da incerteza do dado-base (ver ressalvas destacadas), (vi) precipitação

espacial por satélite e (vii) modelagem de balanço chuva–vazão/elasticidade. Cada etapa é descrita a seguir.

4.1. Aquisição e seleção de estações

O inventário e o download das séries históricas foram automatizados por meio do pacote hydrobr (R), que se conecta à API do HidroWeb/ANA (Calegario and Althoff, 2022). Entre as estações inventariadas, foram mantidas apenas as que atendem a critérios mínimos de qualidade: pelo menos 10 anos de dados, no máximo 2 falhas mensais por ano hidrológico, dados consistidos e não consistidos considerados em conjunto.

4.2. Decomposição da série e detecção de tendência

Cada série mensal foi decomposta em componentes de tendência, sazonalidade e resíduo por meio da técnica STL (Seasonal-Trend decomposition using Loess) (Cleveland et al., 2022). Sobre a componente de tendência, aplicou-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall, que indica a presença, direção e significância estatística ($p < 0,05$) de uma tendência monotônica ao longo do tempo (Kendall, 1948; Mann, 1945). Como as séries hidrológicas apresentam autocorrelação natural (a vazão de um mês depende do mês anterior), aplicou-se também o método de Yue-Pilon, que corrige esse efeito antes de reavaliar a tendência, evitando falsos positivos (Yue et al., 2002). Cada estação foi então classificada em uma de três categorias — tendência negativa significativa, positiva significativa ou não significativa —, base do número de estações em queda citado nas reportagens.

A magnitude da tendência (quanto a vazão, cota ou chuva variou por ano, em $\text{m}^3/\text{s}/\text{ano}$, cm/ano ou mm/ano) foi estimada pelo método do slope de Sen (Sen, 1968), robusto à presença de valores atípicos; essa magnitude é o que embasa os rankings de estações com maior decaimento apresentados nos relatórios diagnósticos. Adicionalmente, o teste de Pettitt foi utilizado para identificar, em cada estação, o ano mais provável de uma mudança abrupta (ruptura) no nível médio da série, distinta de uma tendência gradual — resultado reportado como "ponto de mudança" na matriz consolidada de cada bacia (Pettitt, 1979).

4.3. Anomalias e regime sazonal

Anomalias mensais foram classificadas por z-score em relação à climatologia mensal de cada estação, distinguindo meses moderadamente ($|z| > 1$), severamente ($|z| > 2$) e extremamente ($|z| > 3$) fora do padrão histórico. A partir dessa classificação, os relatórios diagnósticos apresentam a evolução anual do número de meses-estação em anomalia severa/extrema (identificando anos de estresse hidrológico generalizado na bacia), a distribuição do número de meses de anomalia por estação, sua distribuição espacial e o ranking das estações mais afetadas.

Para captar mudanças no ritmo hidrológico — e não apenas na média —, foram calculadas três métricas por ano hidrológico, também reportadas por estação e agregadas por bacia: o centro de massa (dia do ano em que 50% do volume anual já ocorreu, usado para detectar se o pico do rio está chegando mais cedo ou mais tarde), a amplitude relativa (razão entre a variação máxima e mínima anual e a média do ano, indicando se o contraste entre cheia e seca está se intensificando) e a duração máxima de dias consecutivos abaixo do percentil histórico de 10% (seca Q90, indicando se as estiagens estão se alongando). Todas as três métricas foram submetidas a uma regressão linear ao longo dos anos para determinar direção (alongando/encurtando, adiantando/atrasando) e velocidade de mudança (unidade/ano) por estação, com resultados mapeados espacialmente nos relatórios.

4.4. Delimitação de bacias e área de contribuição (relevo)

As bacias de contribuição de cada estação fluviométrica foram delimitadas a partir do modelo de elevação FathomDEM (Uhe et al., 2025), processado com a suíte WhiteboxTools (Lindsay, 2016): correção de depressões espúrias do relevo, cálculo de direção e acumulação de fluxo (método D8), extração da rede de drenagem e ajuste (snap) da posição de cada estação ao pixel de canal mais próximo, dentro de um raio de busca de 15 km. A área de contribuição resultante (em km²) é usada nos relatórios como proxy do porte hidrológico de cada estação — permitindo comparar, por exemplo, se bacias maiores e menores respondem de forma diferente em magnitude de tendência (Slope de Sen) — e para classificar estações em faixas de porte (pequenas, médias e grandes bacias).

4.5. Tendências de precipitação em estações terrestres (ANA)

Independentemente do CHIRPS (ver ressalva a seguir), o pipeline também aplica a mesma cadeia de decomposição STL, Mann-Kendall/Yue-Pilon e slope de Sen às séries de precipitação medidas diretamente pelas estações pluviométricas da rede ANA em solo. É esse resultado que fundamenta as afirmações sobre tendência de queda ou alta da chuva nas reportagens, permitindo um comparativo direto e metodologicamente consistente entre a tendência de vazão (medida no rio) e a tendência de precipitação (medida em solo, na mesma bacia).

4.6. Precipitação espacial por satélite (CHIRPS)

O pipeline também inclui uma etapa de extração de precipitação espacial: rasters mensais CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), obtidos via Google Earth Engine, cruzados com o polígono de cada bacia de contribuição via exactextractr, para estimar a chuva incidente sobre toda a área de drenagem (não apenas no ponto da estação).

⚠ Ressalva metodológica — dado CHIRPS NÃO utilizado nos resultados publicados

Essa etapa (seção 4.6) permanece descrita nesta nota como capacidade técnica disponível no pipeline. **Contudo, os resultados de precipitação estimada por CHIRPS não foram considerados nas conclusões das reportagens**, em razão do grau de incerteza documentado para produtos de precipitação por satélite (incluindo CHIRPS) quando comparados a dados de estações em solo em áreas da América do Sul tropical — divergência que se agrava em regiões amazônicas de baixa densidade de estações de calibração e cobertura de nuvens/floresta persistente (Cattelan et al., 2025). Esta etapa permanece descrita nesta nota por transparência metodológica (o código do pipeline a executa), mas seus produtos não fundamentam nenhuma afirmação quantitativa da matéria. As análises de tendência de precipitação citadas na reportagem baseiam-se exclusivamente nas estações pluviométricas da rede ANA em solo (seção 4.5 desta nota / seção 6 dos relatórios diagnósticos).

4.7. Modelo de balanço chuva–vazão e elasticidade

Para estimar quanto da variação da vazão é explicada apenas pela variação da chuva, o pipeline ajusta uma regressão linear simples (vazão anual em função da chuva anual acumulada na bacia, esta última extraída do CHIRPS) para cada estação com histórico mínimo de 7 anos sobrepostos entre as duas variáveis. A diferença entre a vazão observada e a vazão prevista pelo modelo (o resíduo, expresso em percentual) indicaria, em tese, anos em que o rio carregou mais ou menos água do que a chuva histórica

justificaria. Complementarmente, o pipeline calcula a elasticidade climática da bacia — a sensibilidade percentual da vazão a uma variação de 1% na chuva.

⚠ Ressalva metodológica — modelo de resíduo/elasticidade NÃO utilizado nos resultados publicados

Pelo mesmo motivo da seção 4.6: como esse modelo usa a chuva do CHIRPS como variável explicativa, ele herda a mesma incerteza do dado de satélite na região amazônica (Cattelan et al., 2025). **Os resultados de resíduo hidrológico e de elasticidade climática não foram utilizados nas conclusões desta reportagem.** Essa etapa permanece descrita nesta nota por transparência metodológica (o código do pipeline a executa e a capacidade está disponível para uso futuro caso uma fonte de precipitação mais confiável para a região seja adotada), mas nenhuma afirmação quantitativa da matéria se apoia neste modelo.

5. Quadro-Síntese dos Métodos

Etapa	Método / Ferramenta	Pacote / Fonte	Finalidade
Aquisição	API HidroWeb	hydrobr	Inventário e download de séries ANA
Seleção	Filtro de completude	hydrobr::selectStations	Garantir qualidade mínima da série
Decomposição	STL	stats::stl	Separar tendência, sazonalidade e resíduo
Tendência	Mann-Kendall	Kendall	Detectar tendência monotônica
Tendência corrigida	Yue-Pilon	zyp	Corrigir autocorrelação serial
Magnitude	Slope de Sen	trend::sens.slope	Estimar taxa de variação (unidade/ano)
Quebra estrutural	Pettitt	trend::pettitt.test	Detectar ponto de mudança
Extremos	Escore-z	Climatologia mensal	Classificar anomalias
Regime sazonal	Centro de massa, amplitude, seca Q90	seasonality.R (interno)	Captar mudanças de ritmo hidrológico
Chuva espacial ⚠	Extração zonal	exactextractr + CHIRPS/GEE	Precipitação média por bacia — NÃO usada nos resultados finais (ver ressalva §4.4)
Relevo / bacias	D8, breach/fill, watershed	WhiteboxTools + FathomDEM	Delimitar bacias de contribuição
Atribuição ⚠	Regressão linear + elasticidade	stats::lm (interno)	Isolar resíduo não explicado pela chuva — NÃO usada nos resultados finais (depende de CHIRPS, ver §4.7)
Consolidação	Parquet, sf, ggplot2, Rmd	arrow, sfarrow, tidyverse	Estruturar e visualizar resultados

⚠ As linhas "Chuva espacial" e "Atribuição" estão tecnicamente disponíveis no pipeline, mas seus resultados não foram usados nas conclusões publicadas, por dependerem da precipitação estimada por satélite (CHIRPS) — ver ressalvas nas seções 4.6 e 4.7.

6. Limitações e Ressalvas Metodológicas

- Os testes de tendência (Mann-Kendall/Yue-Pilon) indicam associação estatística com o tempo, não causalidade; a atribuição de uma tendência a um fator específico (clima, uso do solo, obras hidráulicas) exige evidência adicional.
- A qualidade da estimativa depende diretamente da completude das séries da ANA; estações com muitas falhas foram excluídas, o que pode reduzir a cobertura espacial da análise em relação ao total de estações existentes na região.
- O produto CHIRPS é uma estimativa de precipitação por satélite calibrada com estações terrestres, sujeita a incertezas maiores em áreas de topografia complexa ou baixa densidade de estações de calibração — por esse motivo, seus resultados foram excluídos das conclusões publicadas nesta reportagem, assim como o modelo de resíduo/elasticidade que depende dele (ver ressalvas destacadas nas seções 4.6 e 4.7).
- O limiar de significância adotado ($p < 0,05$) e os demais limiares numéricos (Q90, raio de snap de 15 km, mínimo de 7 anos para a regressão) são escolhas metodológicas razoáveis, mas não únicas; análises com limiares distintos podem produzir variações nos resultados.

7. Referências

Calegario, A., Althoff, D., 2022. hydrobr - An R package developed to download, filter and quality check hydrological data of Brazil (Hidroweb - National Water and Sanitation Agency - ANA). <https://doi.org/10.5281/zenodo.6964001>

Cattelan, L.G., Mattos, C.R.C., Hirota, M., 2025. Unraveling divergences: disagreement between precipitation datasets and stations in tropical South America. *Environ. Res. Lett.* 20, 104043. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae02aa>

Cleveland, R.B., Cleveland, W., McRae, J., Terpenning, I., 2022. STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. 1990. DOI Citeulike-Artic.-Id 1435502.

Kendall, M.G., 1948. Rank correlation methods, Rank correlation methods. Griffin, Oxford, England.

Lindsay, J.B., 2016. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis. *Comput. Geosci.* 95, 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.003>

Mann, H.B., 1945. Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica* 13, 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>

Pettitt, A.N., 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *J. R. Stat. Soc. Ser. C Appl. Stat.* 28, 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>

Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* 63, 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>

Uhe, P., Lucas, C., Hawker, L., Brine, M., Wilkinson, H., Cooper, A., Saoulis, A.A., Savage, J., Sampson, C., 2025. FathomDEM: an improved global terrain map using a hybrid vision transformer model. *Environ. Res. Lett.* 20, 034002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ada972>

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G., 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrol. Process.* 16, 1807–1829. <https://doi.org/10.1002/hyp.1095>

