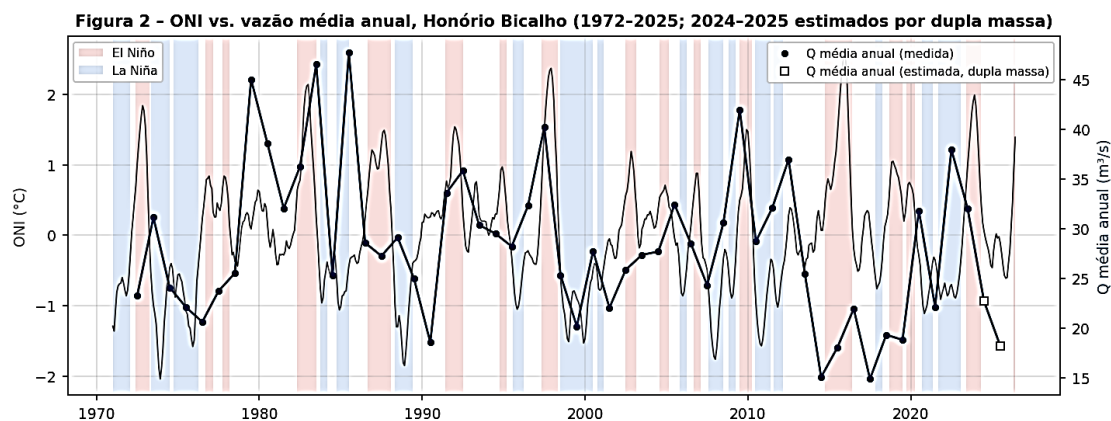


Influência do El Niño – Oscilação Sul (Índice ONI) nas Vazões do Rio das Velhas na Estação Honório Bicalho (1971–2026) e a Previsão de Queda das Vazões e Implicações para a Segurança Hídrica da Região Metropolitana de Belo Horizonte



Índice ONI (NOAA/CPC) e vazões médias anuais do Rio das Velhas em Honório Bicalho (1972–2025), com episódios El Niño (vermelho) e La Niña (azul); 2024–2025 estimados por dupla massa
Fontes: NOAA/CPC (ONI) e ANA (vazões); elaboração FPSF

0	PRIMEIRA EMISSÃO	30/08/2026	ECC	-	-
Rev.	Descrição	Data	Elaborado	Verificado 1	Verificado 2
PROJETO/ÁREA		TEMA/SÍTIO	CLASSIFICAÇÃO		REV.
EVENTOS EXTREMOS		BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS	EE-RV-NT-16		0
GRUPO		SETOR	DENOMINAÇÃO		FOLHA
COMITÊ TÉCNICO		ENGENHARIA	Influência do ENSO (ONI) nas Vazões do Rio das Velhas Medidas em Honório Bicalho		1/45
		Fórum Permanente São Francisco – FPSF Belo Horizonte			



O Fórum Permanente São Francisco (FPSF)

é uma entidade da sociedade civil, um grupo de cidadãos e cidadãs que foi formado três dias depois do rompimento da barragem do Córrego do Feijão, da empresa Vale, em Brumadinho - MG, em janeiro de 2019. Foi criado com o objetivo inicial de dedicar-se à segurança e à qualidade de vida da população que vive em áreas de mineração no Estado de Minas Gerais. Posteriormente expandiu sua área de atuação para englobar as questões mais abrangentes ligadas à sustentabilidade e ao meio ambiente. A partir de janeiro de 2023 o FPSF se tornou um Instituto.

Missão

Defesa, preservação e conservação do meio ambiente e do patrimônio histórico-cultural, bem como a promoção do desenvolvimento sustentável.

Desenvolvimento e divulgação de tecnologias alternativas voltadas para a sustentabilidade e para a regeneração. Realização de estudos e pesquisas, produção e divulgação de informações e de conhecimentos técnicos e científicos tendo como base o conceito de ecologia integral. Incentivo ao uso racional dos recursos naturais, com ênfase na segurança hídrica.

Valores

O Fórum Permanente São Francisco (FPSF), no desenvolvimento de suas atividades, tem como fundamento os princípios da legalidade, impessoalidade, moralidade, publicidade, economicidade e eficiência, sem qualquer discriminação de raça, cor, gênero, orientação sexual e religião e sem conotações político-partidárias.

Todos os direitos reservados. É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesse documento, desde que citada a fonte.





Sumário

1	Resumo Executivo	5
2	Conclusões	5
3	Objetivo	6
4	Introdução.....	6
5	Dados Utilizados e Métodos.....	7
5.1	Séries de vazões	7
5.2	Índice ONI e classificação dos episódios.....	7
5.3	Convenções de agregação e métodos estatísticos.....	8
6	Atualização da Série pelo Método da Dupla Massa	8
7	O ENSO e seus Episódios Históricos	8
8	Resultados: ONI e Vazões	9
8.1	Séries comparativas	9
8.2	A hipótese do ano pós-El Niño.....	12
8.3	Correlações com defasagem, composições e tendências	13
9	Influência da La Niña e o Risco de Cheias.....	14
10	O El Niño de 2026/27: um Evento Possivelmente Recordista	16
11	Cenários de Queda de Vazões para 2028.....	17
11.1	Construção e validação do modelo	17
11.2	Cenários para valores de ONI dentro do domínio histórico	18
11.3	Cenários extremos: ONI de pico superior a 3 °C.....	19
11.4	Painel de gatilhos para monitoramento	20
11.5	O fator La Niña e o cenário de resgate	20
11.6	Vazões de referência e ressalvas.....	21
12	Implicações para a Segurança Hídrica da RMBH	21
13	Recomendações	22
14	Limitações do Estudo	23
15	Referências.....	23
16	ANEXO 1.....	25
16.1	Introdução e Objetivo.....	25
16.2	O Método da Dupla Massa.....	25
16.3	Caracterização das Estações.....	26
16.4	Contexto: a Desativação de Honório Bicalho e a Estação de Rio Acima	27
16.5	Aplicação do Método Dupla Massa	28
16.6	Análise de consistência e identificação das inconsistências	29
16.7	Justificativa da inclinação adotada	31



16.8	Preenchimento realizado	31
16.9	Referências	32
17	ANEXO 2	33
18	ANEXO 3	39

1 Resumo Executivo

Esta Nota Técnica investiga, de forma sistemática, a influência do fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENSO), medido pelo índice ONI (Oceanic Niño Index, da NOAA), sobre as vazões do Rio das Velhas medidas na estação fluviométrica de Honório Bicalho (código ANA 41199998), imediatamente a montante da captação da ETA Bela Fama (COPASA), responsável pelo abastecimento de cerca de 71% da população de Belo Horizonte e de 51% da população da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Constitui continuação dos estudos do Projeto “De Olho no Velhas”, e utiliza a série de vazões medidas de 27/04/1971 a 30/11/2023, atualizada até 30/08/2026 pelo Método da Dupla Massa a partir da estação de Rio Acima (ver Capítulo 6 e ANEXO 1), e a tabela oficial completa do ONI (DJF/1950 a MJJ/2026).

O principal resultado confirma, com a série atualizada, um padrão identificado em análise preliminar (ver ANEXO 3): **após o verão maduro dos episódios de El Niño fortes e muito fortes (pico ONI $\geq 1,5$ °C), o ano civil seguinte apresenta queda acentuada da vazão média anual em 6 dos 7 casos disponíveis (quedas de 15% a 46%; teste de Wilcoxon pareado unilateral, $p = 0,016$), com uma única exceção — o episódio de 2009/10 —, explicável pela instalação imediata da La Niña forte de 2010/11.** O episódio forte de 2023/24, testável apenas após a atualização da série, confirmou o padrão: queda de 19,8% em 2025, que se tornou o quarto menor valor anual dos 54 anos da série.

Em contraste, as correlações lineares contínuas entre o ONI e as vazões mensais são praticamente nulas em todas as defasagens de 0 a 12 meses: a influência do ENSO na bacia não é proporcional e contínua, mas episódica e condicionada à intensidade dos eventos. Quanto às cheias, confirmou-se que **o risco de grandes vazões (superiores a 250 m³/s) é substancialmente amplificado durante a La Niña, concentrando-se historicamente na faixa de ONI de aproximadamente -1,0 a +1,5.** Não há registro de grande cheia sob El Niño ou La Niña mais intensos que esses limites.

A contribuição central desta Nota Técnica é a construção de um modelo de previsão da intensidade da queda das vazões do Rio das Velhas, em Honório Bicalho, em função do ONI de pico e do nível da vazão anterior, validado por reamostragem *leave-one-out*. À luz da previsão multi-modelo de julho de 2026, que aponta o El Niño de 2026/27 como provável recordista histórico (pico mediano de 3,6 °C em Niño 3.4), **o modelo projeta, para o ano hidrológicamente crítico de 2028, vazão média anual entre cerca de 12 e 20 m³/s nos cenários centrais — no nível dos piores anos já registrados —, podendo descer a 7–12 m³/s nos cenários extremos, com o período seco de 2028 aproximando-se ou ultrapassando a mínima histórica da série.** As implicações para a segurança hídrica da RMBH e as recomendações correspondentes são detalhadas nos Capítulos 12 e 13.

2 Conclusões

- **A hipótese da queda pós-El Niño foi confirmada e reforçada pela série atualizada:** os El Niños fortes e muito fortes (pico ONI $\geq 1,5$ °C) são seguidos de queda acentuada da vazão média anual no ano seguinte ao verão maduro em 6 de 7 casos — 1972/73, 1982/83, 1991/92, 1997/98, 2015/16 e 2023/24 —, com exceção única do episódio 2009/10,

neutralizado pela La Niña forte subsequente. O teste de Wilcoxon pareado unilateral resulta em $p = 0,016$;

- **O padrão repete-se nas demais variáveis:** vazões máximas e mínimas anuais e vazões dos períodos secos e úmidos apresentam quedas no ano/período seguinte na maioria dos episódios de intensidade moderada ou superior;
- **A relação ONI × vazão não é linear nem contínua:** as correlações mensais com defasagens de 0 a 12 meses são estatisticamente nulas. O uso do ONI para planejamento deve ser feito por classes de intensidade de episódios, e não por regressões lineares simples;
- **O risco de enchentes catastróficas é amplificado durante a La Niña:** os dias com vazão diária acima de $250 \text{ m}^3/\text{s}$ são cerca de 3 vezes mais frequentes sob La Niña do que sob El Niño (qui-quadrado, $p = 0,018$), e as grandes cheias concentram-se na faixa de ONI de $-1,0$ a $+1,5$, sem registro fora dela;
- **É possível estimar a intensidade da queda a partir do ONI de pico:** um modelo simples (ONI de pico + nível da base), validado por *leave-one-out*, prevê a queda dos eventos fortes com erro médio de 10 pontos percentuais; a extrapolação para o El Niño excepcional de 2026/27 indica risco de vazões em 2028 no nível dos piores anos históricos, ou abaixo deles; a redução das vazões poderá ocorrer também já no ano de 2027;
- **Há tendência de fundo de redução das vazões,** com queda de 12% na média anual entre 1972–1996 ($30,4 \text{ m}^3/\text{s}$) e 1997–2022 ($26,8 \text{ m}^3/\text{s}$), que se sobrepõe ao efeito ENSO e é agravada por pressões antrópicas na bacia (mineração, rebaixamento de aquíferos, urbanização);
- **Recomenda-se ação imediata:** diante do super El Niño de 2026/27, os planos de contingência do abastecimento da RMBH devem incorporar, antes do período seco de 2027, cenário de vazões acentuadamente reduzidas em 2028 (com possível início de redução já em 2027), e preparar-se também para o risco elevado de cheias na provável La Niña subsequente, conforme o Capítulo 13.

3 Objetivo

O objetivo desta Nota Técnica é verificar, quantificar e caracterizar a influência do ENSO — por meio do índice ONI — sobre as vazões do Rio das Velhas medidas na estação Honório Bicalho, considerando valores mensais, anuais e dos períodos secos e úmidos; testar a hipótese de queda acentuada das vazões no ano seguinte ao pico dos El Niños mais intensos; caracterizar a relação entre a La Niña e as grandes cheias; e, sobretudo, desenvolver e aplicar um modelo de previsão da intensidade da queda das vazões em função do ONI, de modo a estimar o comportamento provável do manancial após o El Niño excepcional previsto para 2026/27. Busca-se, com isso, subsidiar o planejamento estratégico da segurança hídrica da RMBH e de outras regiões de Minas Gerais com comportamento hidrológico similar.

4 Introdução

Esta Nota Técnica deve ser considerada continuação dos estudos do Projeto “De Olho no Velhas”, finalizado em 30/08/2025, suportado pela Plataforma Semente do Ministério Público de Minas Gerais (MPMG) e realizado pelo Instituto Fórum Permanente São Francisco. Os dados

de vazões da estação Honório Bicalho utilizados nos estudos aqui apresentados foram os obtidos durante o desenvolvimento daquele projeto.

O Rio das Velhas é o principal manancial de abastecimento da RMBH. A ETA Bela Fama, da COPASA, capta água diretamente no rio — captação a fio d'água, sem reservatório de regularização — e responde por cerca de 71% do abastecimento da capital e 51% do da RMBH. Não havendo reservatório, a segurança do abastecimento depende diretamente das vazões afluentes a cada momento, o que torna o sistema particularmente sensível às variações naturais e antrópicas das vazões.

A estação fluviométrica de Honório Bicalho situava-se imediatamente a montante da captação, drenando cerca de 1.550 km² do Alto Rio das Velhas, região com precipitação média anual da ordem de 1.568 mm. Sua série de vazões médias diárias — 27/04/1971 a 30/11/2023, sem falhas — é a mais importante da região para avaliação da segurança hídrica. A estação foi desativada pela ANA em dezembro de 2023; a série foi estendida até agosto de 2026 pelo Método da Dupla Massa (Capítulo 6 e ANEXO 1).

A potencialidade do rio para atender à demanda crescente deve-se tanto à pluviosidade quanto aos aquíferos de altitude, que sustentam as vazões nos períodos de recessão. Contudo, mineração e urbanização vêm alterando o solo e a permeabilidade da bacia, e os níveis freáticos têm sido crescentemente rebaixados. Somam-se as mudanças do clima, que reduziram os volumes precipitados nas últimas décadas ao mesmo tempo em que produziram eventos extremos — como a enchente de janeiro de 2022, com vazão média diária de 715 m³/s em Honório Bicalho, a maior de toda a série. Compreender como o ENSO modula as vazões do manancial é, nesse contexto, peça essencial do planejamento hídrico metropolitano.

5 Dados Utilizados e Métodos

5.1 Séries de vazões

Foi utilizada a série de vazões médias diárias de Honório Bicalho (código ANA 41199998), de 27/04/1971 a 30/11/2023, verificada como completa (19.211 dias, sem falhas, duplicatas ou valores inválidos), estendida até 30/08/2026 pelo Método da Dupla Massa a partir da estação de Rio Acima (código ANA 41195050), telemétrica, 10,4 km a montante. Os valores estimados (01/12/2023 a 30/08/2026) são identificados como tais em todas as figuras e tabelas.

5.2 Índice ONI e classificação dos episódios

O ONI é a média móvel de três meses das anomalias de temperatura da superfície do mar na região Niño 3.4, calculada sobre períodos-base de 30 anos atualizados a cada cinco anos (base ERSSTv5). É o índice consagrado na literatura de teleconexões. A tabela oficial foi obtida do Climate Prediction Center (CPC/NOAA), de DJF/1950 a MJJ/2026 (acesso em 29/08/2026). Registre-se que, em fevereiro de 2026, a NOAA passou a adotar o RONI (*Relative Oceanic Niño Index*) para o monitoramento oficial; nesta Nota mantém-se o ONI clássico como índice principal, citando-se o RONI quando pertinente (Capítulos 10 e 11).

A classificação seguiu o critério do CPC (5+ trimestres consecutivos com $ONI \geq +0,5$ ou $\leq -0,5$), com intensidade definida pelo pico: fraco (0,5–0,9), moderado (1,0–1,4), forte (1,5–1,9) e muito forte ($\geq 2,0$). Foram identificados 42 episódios entre 1950 e 2026.

5.3 Convenções de agregação e métodos estatísticos

As vazões diárias foram agregadas em valores mensais; anuais (médias, máximas e mínimas) dos anos civis completos, 1972 a 2025 (2026 parcial, excluído); períodos secos (01/mai a 30/set), 1971 a 2025 (2026 incompleto, excluído); e períodos úmidos (01/out a 30/abr do ano seguinte), tratados como anos hidrológicos 1971/1972 a 2025/2026, cada um associado ao ONI do trimestre DJF do verão correspondente.

Os métodos incluíram: correlações de Pearson e Spearman entre o ONI defasado (0–12 meses) e as vazões mensais (anomalias padronizadas); análise de composição com testes de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney; estratificação por intensidade; teste pareado de Wilcoxon para a hipótese do ano pós-El Niño; tendências por Mann-Kendall com declividade de Sen (calculadas na série medida e, como sensibilidade, na série estendida); análise de excedência do limiar de 250 m³/s para as cheias; e, para a previsão da queda, modelos de regressão e Random Forest validados por reamostragem *leave-one-out*. As tabelas completas de resultados constam do ANEXO 2.

6 Atualização da Série pelo Método da Dupla Massa

Como a estação de Honório Bicalho foi desativada em dezembro de 2023, a série foi complementada até 30/08/2026 a partir da estação de Rio Acima, situada 10,4 km a montante, mediante o Método da Dupla Massa — técnica clássica de verificação de consistência e preenchimento de séries hidrológicas, que se baseia na relação linear entre os valores acumulados de duas estações. A descrição completa e detalhada do método, a caracterização das estações, o histórico da desativação e todo o procedimento constam do ANEXO 1 desta Nota.

No período comum às duas séries (23/02/2017 a 30/11/2023, 2.472 dias), a correlação entre as vazões diárias é elevada ($r = 0,95$). A curva de dupla massa (Figura DM, reproduzida no ANEXO 1) revela, contudo, três trechos inconsistentes que coincidem com o histórico documentado de colapsos da seção de Honório Bicalho: uma leitura anormalmente baixa em 2020 (após a cheia de janeiro), um trecho reconstituído durante o colapso de 2021/2022 e um degrau de leitura alta no verão 2022/2023 que antecedeu a desativação. Ajustando-se a relação exclusivamente aos trechos consistentes (1.804 dias, 73% do período comum), obtém-se uma reta praticamente perfeita ($r^2 = 0,999875$) de inclinação $m = 1,1347$, adotada no preenchimento: $Q_{HB} = 1,1347 \times Q_{Rio\ Acima}$.

Os 1.004 valores diários estimados (01/12/2023 a 30/08/2026) são estimativas adequadas para caracterizar a ordem de grandeza e o comportamento das vazões — finalidade desta Nota —, e não substituem medições diretas. Por isso, nas análises que se seguem eles são sempre identificados como estimados, e as análises de tendência de longo prazo têm seu resultado principal calculado sobre a série medida (1972–2022), apresentando-se a série estendida apenas como sensibilidade. Detalhes, ressalvas e gráficos completos: ANEXO 1.

7 O ENSO e seus Episódios Históricos

O ENSO é o principal modo de variabilidade climática interanual do planeta. Sua fase quente (El Niño) e fria (La Niña) modulam as chuvas em grande parte do Brasil, classicamente com sinais

opostos entre o Sul (mais chuvoso sob El Niño) e o Norte/Nordeste (mais seco), situando-se Minas Gerais central em zona de transição, de sinal mais fraco e menos linear. A Figura 1 apresenta a série completa do ONI, com os episódios sombreados; a Tabela 1 relaciona os El Niños fortes e muito fortes desde 1950.

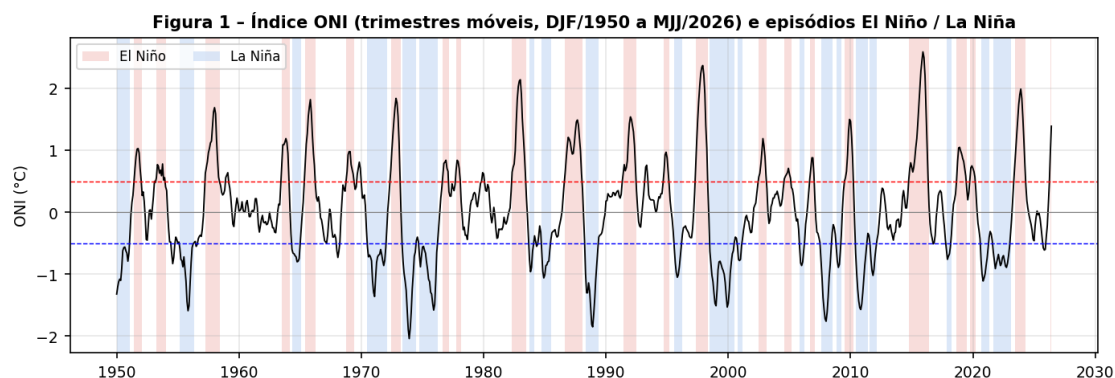


Figura 1 – Índice ONI (trimestres móveis, DJF/1950 a MJJ/2026), com episódios El Niño (vermelho) e La Niña (azul). Fonte: NOAA/CPC; elaboração FPSF.

Episódio	Início	Fim	Pico ONI (°C)	Trimestre do pico	Intensidade
1957/58	MAM 1957	AMJ 1958	1,69	DJF 1958	Forte
1965/66	MJJ 1965	FMA 1966	1,82	OND 1965	Forte
1972/73	MJJ 1972	FMA 1973	1,84	OND 1972	Forte
1982/83	AMJ 1982	MJJ 1983	2,14	DJF 1983	Muito forte
1991/92	MJJ 1991	MJJ 1992	1,54	DJF 1992	Forte
1997/98	AMJ 1997	MAM 1998	2,37	NDJ 1997	Muito forte
2009/10	JJA 2009	FMA 2010	1,50	NDJ 2009	Forte
2014/15	SON 2014	AMJ 2016	2,59	NDJ 2015	Muito forte
2023/24	MJJ 2023	MAM 2024	1,99	NDJ 2023	Forte

Tabela 1 – Episódios de El Niño fortes e muito fortes (1950–2026), segundo o ONI.

Fonte: NOAA/CPC; elaboração FPSF.

8 Resultados: ONI e Vazões

8.1 Séries comparativas

As Figuras 2 a 6 comparam a evolução do ONI com as vazões médias, máximas e mínimas anuais, dos períodos secos e úmidos, e com as anomalias mensais. Os valores de 2024–2026, estimados por dupla massa, são plotados com marcadores vazados para distingui-los dos medidos. A inspeção visual antecipa os resultados quantitativos: os grandes El Niños (1982/83, 1997/98, 2015/16 e agora 2023/24) são seguidos de depressões marcantes das vazões, sem que haja proporcionalidade contínua entre índice e vazão nos demais períodos.

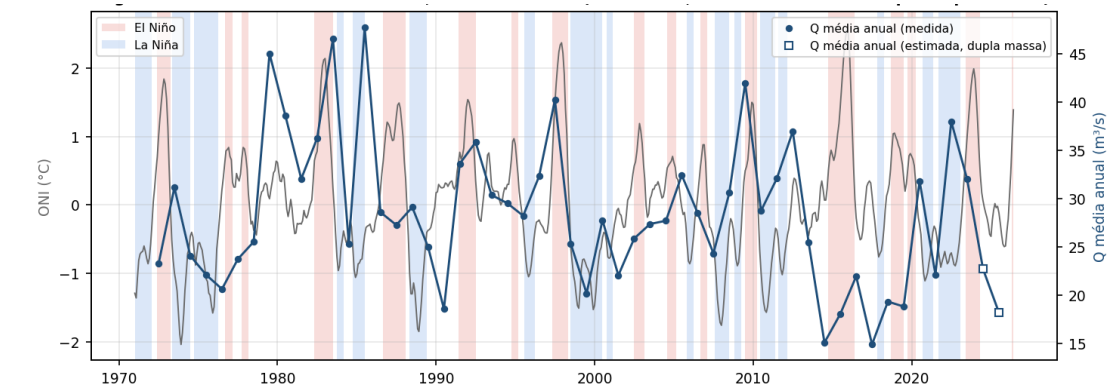


Figura 2 – ONI x vazão média anual, Honório Bicalho (1972–2025; 2024–2025 estimados pelo método Dupla Massa).

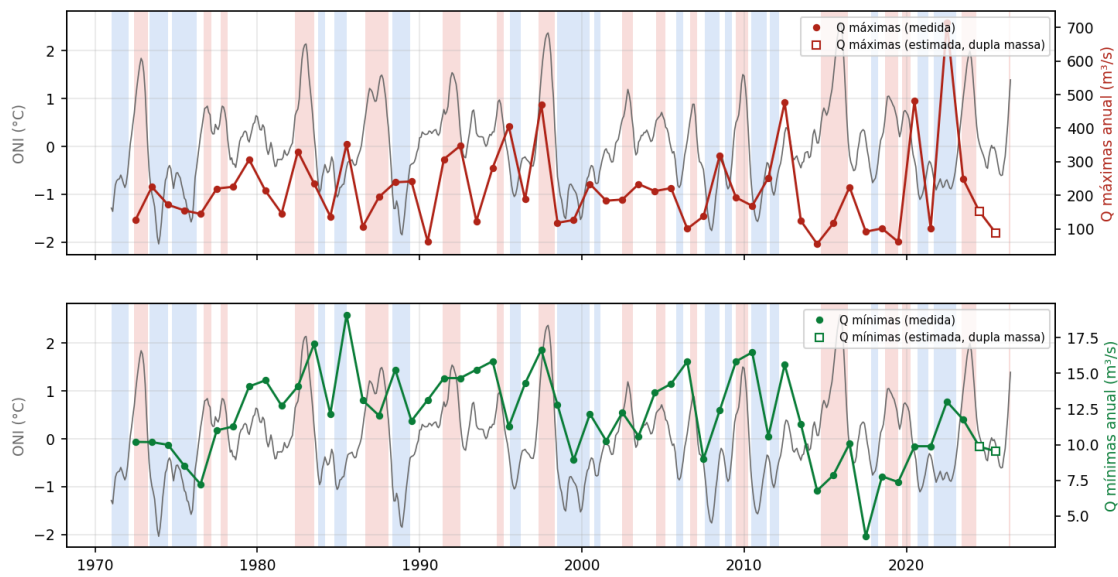


Figura 3 – ONI x vazões máximas e mínimas anuais (1972–2025).

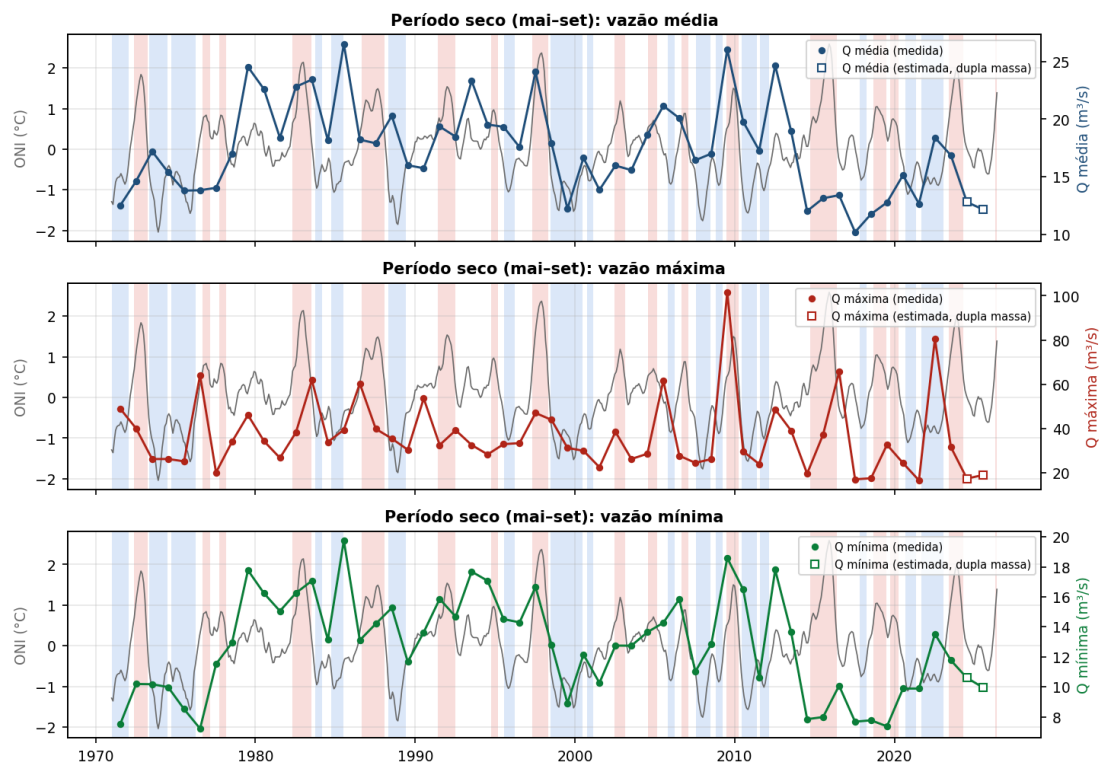


Figura 4 – ONI $\times$ vazões dos períodos secos, mai-set, 1971–2025 (2024–2025 estimados; 2026 incompleto, excluído).

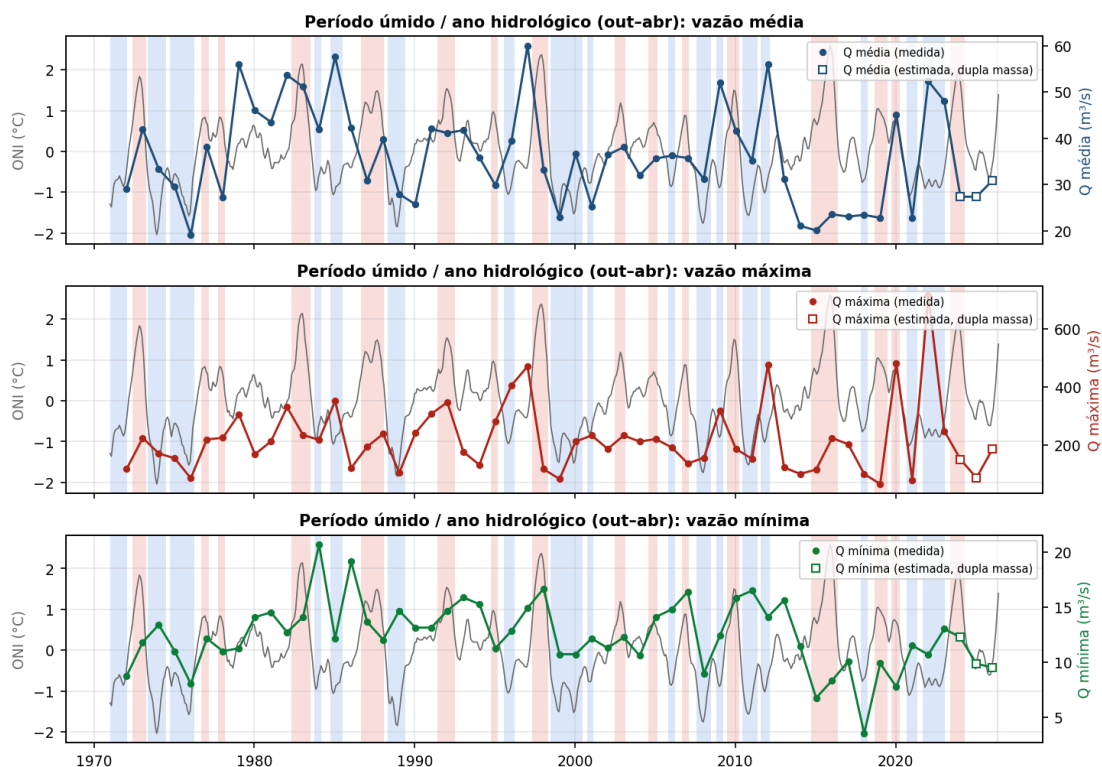


Figura 5 – ONI $\times$ vazões dos períodos úmidos, out-abr, 1971/72–2025/26 (a partir de 2023/2024 estimados).

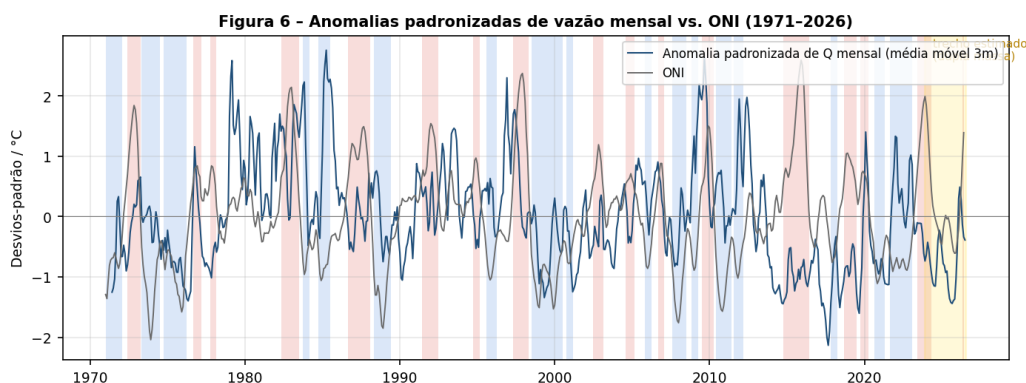


Figura 6 – Anomalias padronizadas da vazão mensal × ONI (1971–2026).

8.2 A hipótese do ano pós-El Niño

Testou-se a hipótese de que ao pico dos El Niños mais intensos segue-se queda acentuada das vazões no ano seguinte, adotando como referência o ano do verão DJF maduro (Y) e comparando a vazão média anual desse ano com a do ano seguinte (Y+1). A Tabela 2 e a Figura 7 apresentam os 16 episódios com dados disponíveis, incluindo o episódio 2023/24, testável apenas após a atualização da série.

Nos episódios fortes e muito fortes (pico ONI $\geq 1,5$ °C; 7 casos), a vazão média anual caiu no ano seguinte em 6: -23% (1973→1974), -46% (1983→1984), -15% (1992→1993), -20% (1998→1999), -32% (2016→2017) e -20% (2024→2025). A única exceção é 2009/10 (2010→2011, +12%), neutralizada pela La Niña forte de 2010/11. O teste de Wilcoxon pareado unilateral resulta em $p = 0,016$. Nos episódios moderados ou fracos o padrão se dilui, evidenciando o condicionamento do fenômeno à intensidade.

Cabe destacar a gravidade do caso mais recente: a vazão média de 2025 (18,2 m³/s, estimada) situa-se como o quarto menor valor dos 54 anos da série, atrás apenas de 2017, 2014 e 2015 — todos do auge da crise hídrica de 2014–2017. O manancial chega ao limiar do El Niño de 2026/27 já em estado deprimido.

Episódio (pico)	Intensidade	Pico ONI (°C)	Ano Y	Q méd. Y (m³/s)	Q méd. Y+1 (m³/s)	Δ (%)	Dados
OND 1972	Forte	1,84	1973	31,2	24,1	-22,7	medidos
NDJ 1976	Fraco	0,84	1977	23,7	25,5	7,6	medidos
OND 1977	Fraco	0,84	1978	25,5	45,1	76,5	medidos
DJF 1983	Muito forte	2,14	1983	46,6	25,3	-45,7	medidos
ASO 1987	Moderado	1,49	1988	29,1	25,0	-14,2	medidos
DJF 1992	Forte	1,54	1992	35,9	30,4	-15,3	medidos
NDJ 1994	Fraco	0,97	1995	28,2	32,3	14,5	medidos
NDJ 1997	Muito forte	2,37	1998	25,3	20,2	-20,4	medidos
OND 2002	Moderado	1,19	2003	27,4	27,7	1,2	medidos
NDJ 2004	Fraco	0,71	2005	32,4	28,5	-12,1	medidos
OND 2006	Fraco	0,88	2007	24,3	30,6	25,8	medidos

Episódio (pico)	Intensidade	Pico ONI (°C)	Ano Y	Q méd. Y (m³/s)	Q méd. Y+1 (m³/s)	Δ (%)	Dados
NDJ 2009	Forte	1,50	2010	28,7	32,1	11,7	medidos
NDJ 2015	Muito forte	2,59	2016	21,9	14,9	-32,2	medidos
NDJ 2018	Moderado	1,05	2019	18,8	31,8	69,3	medidos
NDJ 2019	Fraco	0,75	2020	31,8	22,1	-30,6	medidos
NDJ 2023	Forte	1,99	2024	22,7	18,2	-19,8	estimados*

Tabela 2 – Vazão média anual no ano do verão DJF maduro (Y) de cada El Niño e no ano seguinte (Y+1). (*) valores com dados estimados por dupla massa. Elaboração FPSF.

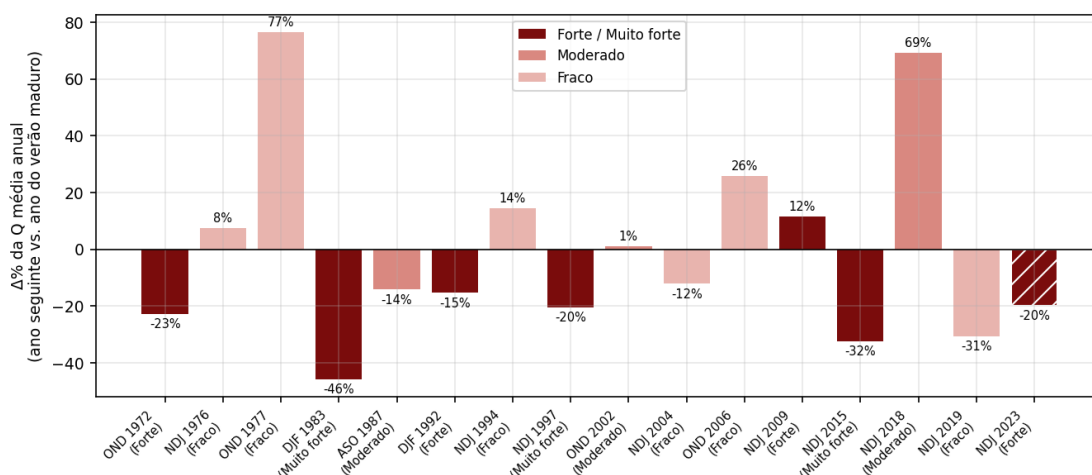


Figura 7 – Variação percentual da vazão média anual no ano seguinte ao verão maduro de cada El Niño, por intensidade (total de 16 episódios; NDJ 2023 hachurado: dados estimados).

8.3 Correlações com defasagem, composições e tendências

As correlações entre o ONI defasado (0 a 12 meses) e as vazões mensais são praticamente nulas (Figura 8; $|r| \leq 0,08$), confirmando que a influência do ENSO é episódica e não proporcional. A análise de composição (Figura 9) mostra diferenças de medianas em geral modestas; o resultado significativo é a vazão mínima do período seco, maior em anos neutros que sob La Niña ($p \approx 0,04$) — as estiagens tendem a ser mais severas sob qualquer episódio ENSO. As tabelas completas de correlações, composições e estratificação por intensidade constam do ANEXO 2.

Sobreposta à variabilidade ENSO existe uma tendência de fundo de redução das vazões (Figura 10): a média anual caiu de 30,4 m³/s (1972–1996) para 26,8 m³/s (1997–2022), -12%. As declividades de Sen são negativas em todas as séries; na série medida a significância é marginal ($p \approx 0,09$ para os períodos úmidos), e a análise de sensibilidade com a série estendida reforça o sinal de queda (ANEXO 2). **Esse resultado coincide com o que foi detalhadamente estudado e exposto no Relatório Final do Projeto “De Olho no Velhas” e aponta para uma redução sistemática das vazões do Rio das Velhas na região a montante da ETA Bela Fama, o que coloca em risco a segurança hídrica da capital do estado e de toda a RMBH.**

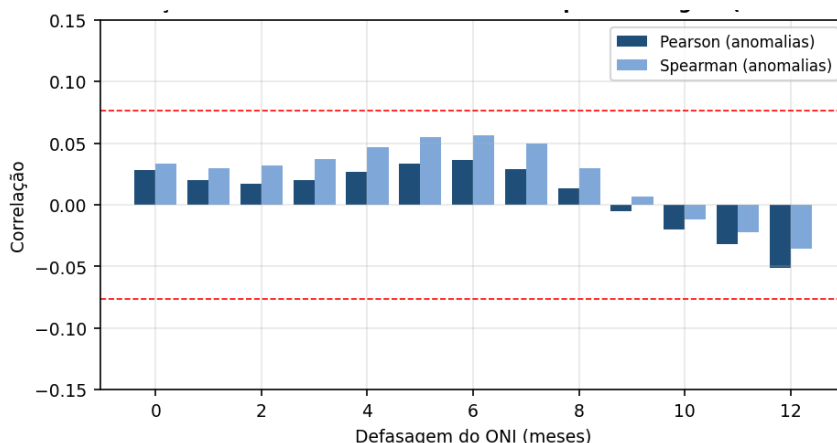


Figura 8 – Correlação ONI × anomalia de vazão mensal por defasagem (1971–2026).

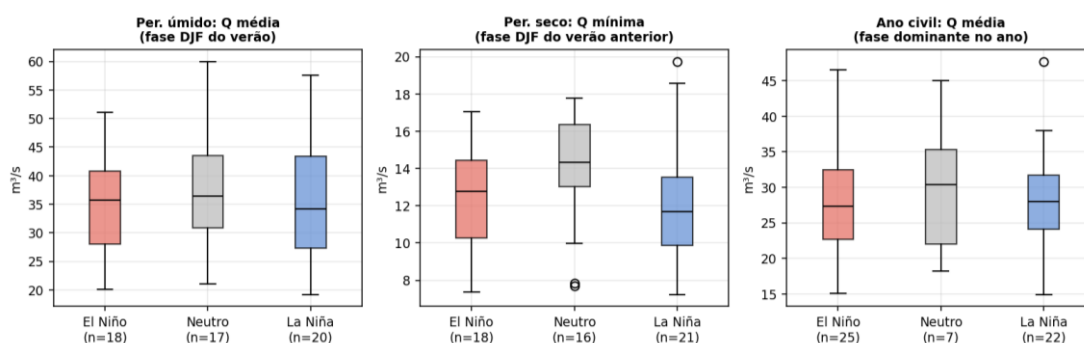


Figura 9 – Distribuições de vazões por fase ENSO, série atualizada até 2025/2026.

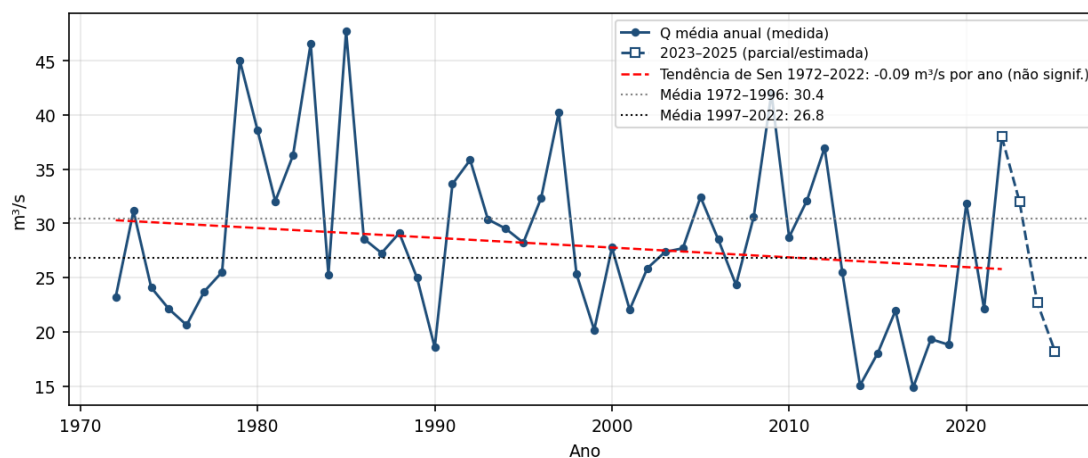


Figura 10 – Vazão média anual e tendência de longo prazo (Mann-Kendall/Sen na série medida).

9 Influência da La Niña e o Risco de Cheias

Examinando o lado “excesso” da influência do ENSO, verificou-se a associação entre a La Niña e as grandes cheias. A Figura 11 apresenta a dispersão entre o ONI e as vazões médias diárias (1971–2026), com o limiar de 250 m³/s; os pontos estimados por dupla massa (2024–2026) aparecem vazados e nenhum deles ultrapassa o limiar (máximo de 186,7 m³/s), de modo que os eventos de grande cheia permanecem sendo os 14 históricos.

A observação confirma-se e ganha precisão: as grandes cheias concentram-se na faixa de ONI de aproximadamente -1,0 a +1,5 (mais exatamente, de -1,01 a +1,54 nos 14 eventos históricos).

Não há registro de vazão superior a 250 m³/s em períodos de La Niña ou de El Niño mais fortes que esses limites — as fases extremas do ENSO, em ambos os sinais, não produziram grandes cheias na série. Dentro dessa faixa, porém, os dias de grande cheia são cerca de três vezes mais frequentes sob La Niña do que sob El Niño (Figura 12; qui-quadrado, $p = 0,018$), e sob La Niña ocorreram as duas maiores cheias da série (715 m³/s em 09/01/2022 e 477 m³/s em 03/01/2012).

A resposta hidrológica ao ENSO é, portanto, assimétrica e complementar: os grandes El Niños produzem déficit no ano seguinte ao verão maduro; as La Niñas amplificam o risco de cheias extremas durante o próprio evento, sem efeito defasado sistemático (o teste-espelho pós-La Niña não revela padrão; ANEXO 2). Como os super El Niños foram historicamente sucedidos por La Niñas, o ciclo completo seca–cheia torna-se antecipável em suas duas pontas.

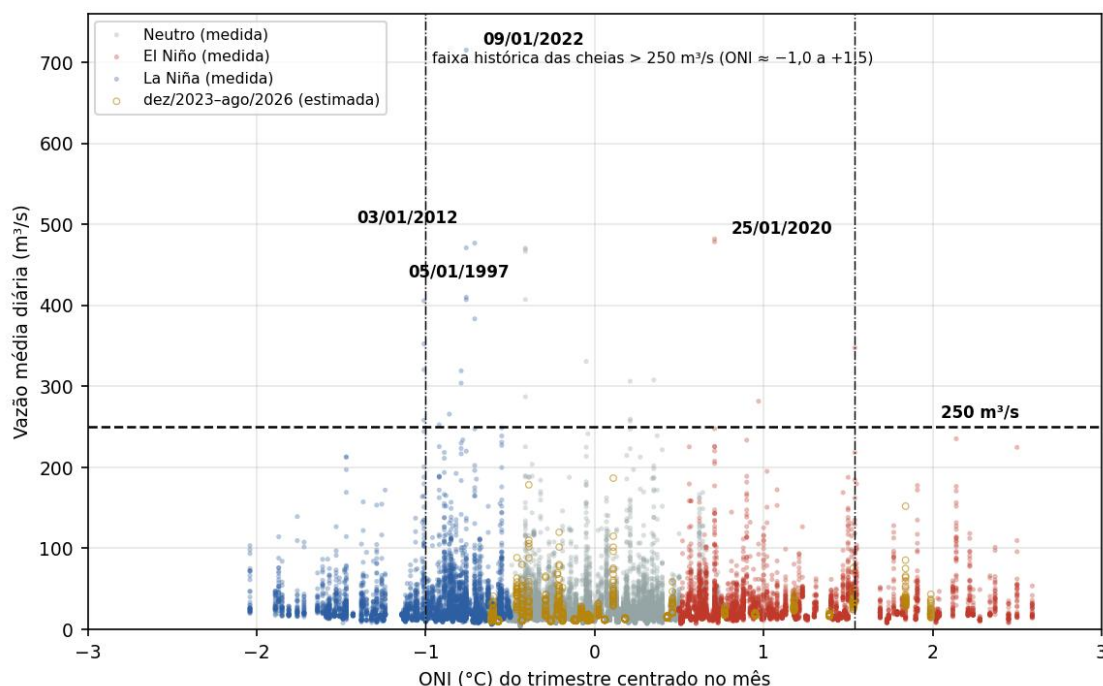


Figura 11 – Dispersão ONI x vazões médias diárias (1971–2026), com o limiar de 250 m³/s, a faixa histórica das grandes cheias (ONI ≈ -1,0 a +1,5) e as quatro maiores cheias anotadas. Pontos vazados: série estimada. Elaboração FPSF.

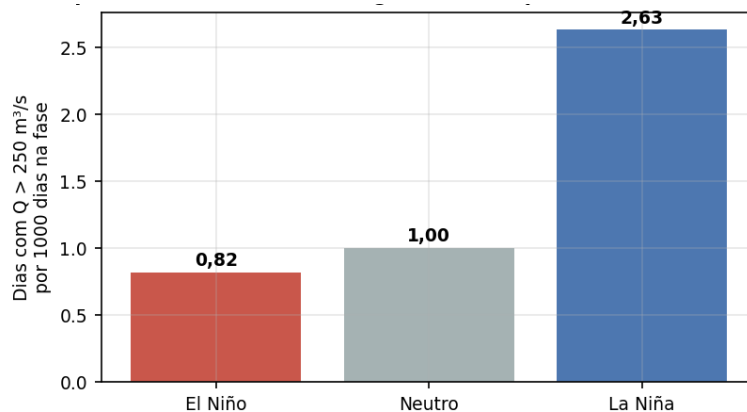


Figura 12 – Frequência de dias com $Q > 250 \text{ m}^3/\text{s}$, normalizada pela permanência em cada fase ENSO (1971–2026).

Data do pico	Vazão de pico (m ³ /s)	ONI do trimestre	Fase ENSO
06/02/1979	306,3	0,21	Neutro
03/01/1982	330,8	-0,05	Neutro
27/01/1985	352,4	-1,01	La Niña
26/02/1985	265,7	-0,86	La Niña
28/01/1991	307,8	0,35	Neutro
24/01/1992	347,5	1,54	El Niño
24/12/1994	281,6	0,97	El Niño
14/12/1995	405,5	-1,01	La Niña
05/01/1997	470,6	-0,41	Neutro
29/12/2008	319,1	-0,79	La Niña
16/12/2011	252,4	-0,92	La Niña
03/01/2012	476,8	-0,71	La Niña
25/01/2020	481,9	0,71	El Niño
09/01/2022	715,0	-0,76	La Niña

Tabela 3 – Eventos independentes de grande cheia (Q diária > 250 m³/s, separação ≥ 15 dias), com o ONI e a fase ENSO vigentes. Elaboração FPSF.

10 O El Niño de 2026/27: um Evento Possivelmente Recordista

Em 11 de junho de 2026 a NOAA declarou formalmente a instalação do El Niño, e o evento vem se intensificando em ritmo excepcional: o ONI atingiu +0,95 no trimestre AMJ/2026 e +1,39 em MJJ/2026 — a ascensão mais rápida do registro para essa época do ano.

As previsões mais recentes são notáveis. Segundo a compilação multi-modelo de julho de 2026 divulgada por Zeke Hausfather (The Climate Brink), com 667 membros de 14 modelos sazonais, **a mediana ponderada do pico situa-se em 3,6 °C de anomalia (destendenciada) na região Niño 3.4 — cerca de 0,8 °C acima do recorde de 2,75 °C de 2015/16 —, com aproximadamente 91% dos membros excedendo esse recorde e a metade central da distribuição inteiramente igual ou acima dele. Trata-se de projeção fora do envelope de qualquer evento já observado.** Em termos do índice RONI, que remove o aquecimento de fundo dos oceanos, o evento seria apenas moderadamente recordista (o recorde em RONI pertence a 1982/83), o que sugere que a resposta hidrológica real possa situar-se aquém dos cenários mais extremos.

A própria comunidade científica adverte que os modelos nunca foram verificados nesse território — “concordância entre modelos não é prova” —, e a NOAA já havia alertado que **um evento sem precedentes pode produzir impactos atmosféricos também sem precedentes, não apenas versões mais intensas dos padrões conhecidos. Essas ressalvas reforçam, e não atenuam, a necessidade de preparação.** O Capítulo 11 aplica a esse cenário o modelo de previsão desenvolvido nesta Nota.

Um ponto de calendário é essencial: pela convenção adotada, o verão maduro do evento ocorrerá em DJF/2027, de modo que o ano hidrológicamente crítico — o de queda acentuada das vazões — será 2028, e não 2027, embora possam ocorrer reduções de vazão também nesse ano. O ano de 2027 tende a ser o “ano do evento” (período úmido 2026/27 sob El Niño pleno), instalando-se a depressão severa em 2028, tal como 2016→2017 e 2024→2025.

11 Cenários de Queda de Vazões para 2028

Este capítulo constitui a contribuição central da Nota: a partir do padrão histórico confirmado, desenvolve-se um modelo para estimar a intensidade da queda das vazões em função do ONI de pico, aplicando-o ao El Niño excepcional de 2026/27 para projetar cenários para o ano crítico de 2028.

11.1 Construção e validação do modelo

Montou-se um conjunto com os 16 episódios de El Niño de 1972 a 2023, tendo como variável-alvo a variação percentual da vazão média anual ($Y \rightarrow Y+1$) e como preditores o ONI de pico e o nível da base (a vazão média do ano Y relativa à média de longo prazo, 28,6 m³/s). Ambos os preditores são estatisticamente significativos: a queda é tanto maior quanto mais intenso o El Niño (correlação $r = -0,57$) e quanto mais “inflada” a base de partida ($r = -0,54$). A Tabela 4 apresenta o conjunto de dados; a equação ajustada é

$$\Delta\% = 111,4 - 28,8 \cdot \text{ONI}_{\text{pico}} - 71,6 \cdot (\text{Qmed_base}/28,6).$$

Como a amostra é pequena, a avaliação foi feita por reamostragem *leave-one-out* (cada episódio é previsto sem participar do ajuste) — o único teste adequado com esse tamanho de amostra. Foram comparados cinco modelos, incluindo o Random Forest sugerido para a tarefa (Tabela 5). Sobre os 16 episódios, todos os modelos são fracos (o Random Forest fica tecnicamente empatado com a regressão simples e piora com mais preditores), porque os eventos fracos e moderados são erráticos. Restrito, porém, aos 7 eventos fortes e muito fortes — que são os relevantes para o caso de 2026/27 —, o modelo de regressão prevê a queda com erro médio de apenas 9,9 pontos percentuais (Figura 13): previu -54% para 1983 (real -46%), -31% para 2015/16 (real -32%) e -31% para 1997/98 (real -20%). O único erro grosseiro é a exceção de 2009/10, resgatada pela La Niña. Adotou-se, assim, a regressão como modelo principal, também porque, ao contrário do Random Forest, ela é capaz de extrapolar — requisito indispensável para o cenário de 2026/27.

Episódio	Int.	ONI pico	Base relativa (Qmed Y/28,6)	Δ% observado
OND 1972	Forte	1,84	1,09	-22,7
NDJ 1976	Fraco	0,84	0,83	7,6
OND 1977	Fraco	0,84	0,89	76,5
DJF 1983	Muito forte	2,14	1,63	-45,7
ASO 1987	Moderado	1,49	1,02	-14,2
DJF 1992	Forte	1,54	1,25	-15,3
NDJ 1994	Fraco	0,97	0,99	14,5
NDJ 1997	Muito forte	2,37	0,89	-20,4
OND 2002	Moderado	1,19	0,96	1,2
NDJ 2004	Fraco	0,71	1,13	-12,1
OND 2006	Fraco	0,88	0,85	25,8
NDJ 2009	Forte	1,50	1,01	11,7
NDJ 2015	Muito forte	2,59	0,77	-32,2

Episódio	Int.	ONI pico	Base relativa (Qmed Y/28,6)	Δ% observado
NDJ 2018	Moderado	1,05	0,66	69,3
NDJ 2019	Fraco	0,75	1,11	-30,6
NDJ 2023	Forte	1,99	0,79	-19,8

Tabela 4 – Conjunto de dados dos 16 episódios de El Niño usados no modelo de previsão. Elaboração FPSF.

Modelo	MAE LOOCV (p.p.)	R ² LOOCV
M0 – Média (baseline)	27,9	-0,14
M1 – Linear: ONI	22,4	0,12
M2 – Linear: ONI + base	22,3	0,20
M3 – Random Forest: ONI + base	21,6	0,26
M4 – Random Forest: 4 preditores	24,1	0,08
M2 restrito a fortes+ (n=7)	9,9	—

Tabela 5 – Desempenho dos modelos na validação leave-one-out (alvo: Δ% da vazão média anual). Elaboração FPSF.

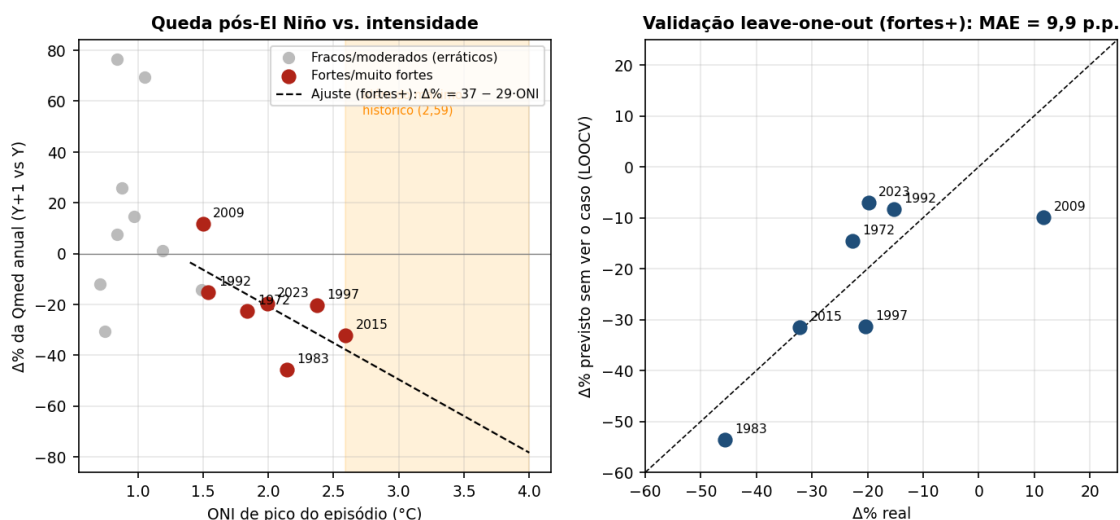


Figura 13 – À esquerda, queda pós-El Niño vs. ONI de pico, com o ajuste dos eventos fortes+; à direita, validação leave-one-out nesses eventos (erro médio de 9,9 pontos percentuais). Elaboração FPSF.

11.2 Cenários para valores de ONI dentro do domínio histórico

Aplicando o modelo ao evento de 2026/27, cujo verão maduro será DJF/2027 (ano de queda = 2028), a Tabela 6 cruza cenários de ONI de pico (2,0 a 2,8, compatíveis com a faixa historicamente observada e com a metade inferior da previsão de 2026) com cenários de base (vazão média de 2027 entre 24 e 33 m³/s).

Uma propriedade robusta e útil emerge: por efeito de regressão à média, o valor absoluto de chegada em 2028 é pouco sensível ao que ocorrer em 2027 — uma base maior gera queda percentual maior e conduz ao mesmo patamar final. O que comanda o patamar de 2028 é o ONI de pico: a vazão média de 2028 resulta em cerca de 22–24 m³/s se o pico ficar em 2,0, e em

cerca de 17 m³/s se atingir 2,8 — este último já no nível dos piores anos da série. Os limites inferiores dos intervalos de 80% descem a 7–12 m³/s, território de crise aguda.

ONI pico	Qmed 2027 suposta	Δ% previsto	IC80% inf.	IC80% sup.	Qmed 2028 (m³/s)	Pior caso	Melhor caso
2,0	24,0	-6,2	-40	27	22,5	14,5	30,6
2,0	28,6	-17,7	-51	16	23,5	13,9	33,1
2,0	33,0	-28,7	-62	5	23,5	12,5	34,6
2,4	24,0	-17,7	-51	16	19,8	11,7	27,8
2,4	28,6	-29,2	-63	4	20,2	10,7	29,8
2,4	33,0	-40,2	-74	-7	19,7	8,7	30,8
2,8	24,0	-29,2	-63	4	17,0	8,9	25,0
2,8	28,6	-40,7	-74	-7	17,0	7,4	26,5
2,8	33,0	-51,8	-85	-18	15,9	4,9	27,0

Tabela 6 – Cenários de queda para 2028, ONI de pico entre 2,0 e 2,8. Intervalos de ~80%. Elaboração FPSF.

11.3 Cenários extremos: ONI de pico superior a 3 °C

A previsão multi-modelo de julho de 2026 aponta, contudo, para um pico bem acima do domínio histórico: mediana de 3,6 °C mensal em Niño 3.4 (na convenção do ONI), o que corresponde a aproximadamente 3,4–3,7 em termos do ONI trimestral usado nesta Nota (referência: 2015/16 teve 2,75 mensal e 2,59 trimestral). A Tabela 7 estende o modelo a valores de ONI de pico de 3,0 a 4,0, apresentando tanto a extrapolação linear quanto um cenário alternativo com saturação da resposta no pior Δ% já observado (–46%), que fornece um piso conservador.

Os resultados são severos em todos os caminhos metodológicos. Para ONI de pico de 3,0, a queda prevista é de cerca de 47% e a vazão média de 2028 fica em torno de 15 m³/s — empatando com os dois piores anos da história (2017: 14,9; 2014: 15,1). Para ONI de 3,4 (equivalente trimestral da mediana prevista), a queda alcança ~58% e a vazão média cai a cerca de 12 m³/s — aproximadamente 20% abaixo do pior ano já registrado em 54 anos. Para ONI de 3,7 a 4,0, os valores descem a 7–10 m³/s. No cenário conservador com saturação, o piso situa-se em 13–15 m³/s, ainda no nível dos piores anos históricos.

As consequências físicas desses patamares são graves. Uma vazão média anual de 7 a 12 m³/s significaria que o ano inteiro de 2028 escoaria, em média, menos do que hoje escoia um período seco típico (a média dos períodos secos de 2024–2025 foi de ~12,2–12,8 m³/s). Como as estiagens ficam muito abaixo da média anual, as vazões do período seco de 2028 seriam empurradas para a vizinhança — ou abaixo — do mínimo absoluto de toda a série (3,56 m³/s, em outubro de 2017), num sistema de captação a fio d'água, sem reservatório, que atende 71% de Belo Horizonte, e sobre aquíferos reguladores já rebaixados.

ONI pico	Qmed 2027 suposta	Δ% linear	IC80%	Qmed 2028 linear	Qmed 2028 c/ saturação (–46%)
3,0	24,0	-35,1	[-69; -2]	15,6	13,0
3,0	28,6	-46,6	[-80; -13]	15,3	15,4

ONI pico	Qmed 2027 suposta	$\Delta\%$ linear	IC80%	Qmed 2028 linear	Qmed 2028 c/ saturação (-46%)
3,0	33,0	-57,6	[-91; -24]	14,0	17,8
3,4	24,0	-46,6	[-80; -13]	12,8	13,0
3,4	28,6	-58,1	[-92; -25]	12,0	15,4
3,4	33,0	-69,1	[-103; -36]	10,2	17,8
3,7	24,0	-55,2	[-89; -22]	10,7	13,0
3,7	28,6	-66,8	[-100; -33]	9,5	15,4
3,7	33,0	-77,8	[-111; -44]	7,3	17,8
4,0	24,0	-63,9	[-97; -30]	8,7	13,0
4,0	28,6	-75,4	[-109; -42]	7,0	15,4
4,0	33,0	-86,4	[-120; -53]	4,5	17,8

Tabela 7 – Cenários extremos (ONI de pico 3,0–4,0), com extrapolação linear e cenário conservador com saturação em -46%. Elaboração FPSF.

11.4 Painel de gatilhos para monitoramento

Para uso operacional durante 2026 e 2027, a Tabela 8 traduz o modelo em um painel de gatilhos: à medida que o ONI de pico do evento for se definindo mês a mês, lê-se diretamente a queda prevista e a vazão média esperada para 2028, permitindo aos gestores atualizar continuamente o planejamento sem refazer o estudo.

Se o ONI de pico atingir	$\Delta\%$ previsto (base média)	Qmed 2028 esperada (m³/s)	Referência histórica
1,5 °C	-3%	27,6	~2 quedas leves em 3 casos
2,0 °C	-18%	23,5	nível do EN 2023/24
2,5 °C	-32%	19,4	nível do recorde 2015/16
3,0 °C	-47%	15,3	além de qualquer registro
3,5 °C	-61%	11,2	mediana prevista p/ 2026 (~3,4-3,6)
4,0 °C	-75%	7,0	teto dos modelos (CESM1)

Tabela 8 – Painel de gatilhos: vazão média esperada em 2028 em função do ONI de pico observado (base = média de longo prazo). Elaboração FPSF.

11.5 O fator La Niña e o cenário de resgate

A única exceção histórica ao padrão de queda — o episódio 2009/10 — deveu-se à instalação imediata de uma La Niña forte, que recompôs as chuvas. A Tabela 9 mostra que, nos demais seis eventos fortes, o ano de queda transcorreu sob condições neutras ou de La Niña fraca, sem resgate. **Como os super El Niños tendem a ser sucedidos por La Niñas, existe a possibilidade de que uma La Niña forte de instalação rápida em 2027/28 atenuie a queda prevista para 2028. No entanto, como demonstra a Tab. 9, a probabilidade de um resgate pode ser considerada pequena, pois, historicamente, o resgate ocorreu em apenas um caso dos sete registrados. O monitoramento do ONI ao longo de 2027 permitirá reconhecer esse cenário em tempo real; até que ele se confirme, o planejamento deve basear-se no cenário de queda, que é o mais provável e o de maior consequência.**

Ano da queda (Y+1)	Episódio EN precedente	ONI DJF do ano Y+1	Houve resgate (subida)?
1974	OND 1972	-1,87	não (-22,7%)
1984	DJF 1983	-0,63	não (-45,7%)
1993	DJF 1992	+0,13	não (-15,3%)
1999	NDJ 1997	-1,51	não (-20,4%)
2011	NDJ 2009	-1,29	SIM (+11,7%)
2017	NDJ 2015	-0,08	não (-32,2%)
2025	NDJ 2023	-0,46	não (-19,8%)

Tabela 9 – Fase ENSO do ano de queda de cada El Niño forte e a ocorrência (ou não) de “resgate” por La Niña. Elaboração FPSF.

11.6 Vazões de referência e ressalvas

Para traduzir os cenários à linguagem regulatória, calcularam-se, sobre a série medida, as vazões de referência da estação: a Q7,10 (vazão mínima de sete dias com dez anos de recorrência) resulta em cerca de 8,7–8,9 m³/s, e a Q95 (vazão superada em 95% do tempo) em cerca de 11,8 m³/s. **Os cenários centrais e extremos de 2028 situam a vazão média anual em torno ou abaixo desses valores de referência, o que, em termos de outorga e disponibilidade hídrica, configura situação de estresse severo do sistema.**

Ressalvas obrigatórias:

- (i) tudo acima de ONI $\approx$ 2,6 é extrapolação, pois o modelo foi treinado num domínio que o cenário previsto excede em até 50%, e nenhum sistema de previsão foi verificado nesse território; os intervalos de 80% são largos e, nos cenários mais extremos, chegam a cruzar valores fisicamente impossíveis, denunciando o limite da linearidade;
- (ii) a leitura pelo RONI sugere resposta possivelmente mais próxima dos cenários de ONI 2,8–3,0;
- (iii) um evento sem precedentes pode gerar teleconexões qualitativamente distintas, para mais ou para menos;
- (iv) uma La Niña forte subsequente pode abortar parcialmente a queda; e
- (v) os valores de 2024–2026 usados como base são estimativas por dupla massa, embora as variações percentuais do teste de 2023/24 sejam, por construção, medições diretas de Rio Acima.

Em síntese, todos os caminhos convergem para 2028 entre “empatado com o pior ano da história” e “muito abaixo de qualquer registro” — a incerteza está em quão inédita será a crise, não em se haverá crise.

12 Implicações para a Segurança Hídrica da RMBH

Os resultados têm aplicação estratégica direta. O sistema Bela Fama, por ser captação a fio d'água sem reservatório de regularização, não dispõe de estoque para atravessar recessões

prolongadas: sua segurança depende das vazões afluentes e da capacidade de antecipação dos gestores. O padrão aqui demonstrado e quantificado fornece essa antecipação: o verão maduro do super El Niño ocorrerá em DJF de 2026/27, e o histórico, agora corroborado por um modelo preditivo, indica que o estresse hidrológico mais severo se manifestará ao longo de 2028 — em especial no período seco de maio a setembro —, com risco de vazões no nível das mínimas históricas ou abaixo delas. No entanto, principalmente devido à imprevisibilidade associada a valores mais altos de ONI, nunca antes ocorridos, ao longo do ano de 2027 já poderá se estabelecer um quadro de redução notável da disponibilidade hídrica.

Há, portanto, na melhor das hipóteses, uma janela de oportunidade de mais de um ano para planejamento e implementação de medidas preparatórias, e não apenas reativas. O comportamento caracterizado deve repetir-se em outras bacias de Minas Gerais com regime hidroclimático similar, de modo que as conclusões podem subsidiar planos de abastecimento também de outras regiões do Estado.

O risco associado ao evento de 2026/27 sobrepõe-se a duas vulnerabilidades estruturais já instaladas: a tendência de fundo de redução das vazões (–12% entre os subperíodos analisados) e a degradação dos aquíferos de altitude que sustentam as vazões de estiagem, degradação essa resultante do bombeamento de água para rebaixamento do nível freático nas diversas minas existentes na bacia e do bombeamento realizado em áreas urbanizadas e por empreendimentos industriais e comerciais da região. A conjunção de evento climático excepcional, tendência decrescente e perda de capacidade regularizadora dos aquíferos configura cenário que exige atenção imediata dos órgãos gestores.

13 **Recomendações**

- **Incorporar formalmente o cenário de queda de 2028 aos planos de contingência** do abastecimento da RMBH, admitindo, conforme o painel de gatilhos (Tabela 8), vazões médias anuais entre 12 e 20 m³/s nos cenários centrais e possivelmente inferiores nos extremos, com atenção máxima ao período seco de 2028;
- **Implementar as medidas preparatórias antes do período seco de 2027**, por precaução, dado que o período úmido 2026/27 já transcorrerá sob o evento: redução de perdas, gestão de demanda, regras operativas de racionamento preventivo, fontes alternativas e interligações;
- **Acompanhar mensalmente o ONI e o RONI** e as discussões diagnósticas do CPC/NOAA, do INMET/CPTEC e das compilações multi-modelo, atualizando os cenários pelo painel de gatilhos a cada nova leitura do índice;
- **Preparar, em paralelo, a gestão do risco de cheias** para a provável La Niña subsequente (a partir do verão 2028/29): como o risco de cheias diárias extremas é cerca de três vezes maior sob La Niña, os planos de defesa civil devem considerar janela de atenção reforçada, sem prejuízo da vigilância permanente; **o risco se agrava consideravelmente devido à grande quantidade de barragens e de pilhas de rejeitos de mineração existentes em toda a bacia e devido à intensificação dos eventos extremos de chuva, de alta erosividade, associados às mudanças climáticas.**



- **Rever criticamente e de forma urgente as outorgas e os rebaixamentos de aquíferos** na bacia, considerando o papel regularizador dos aquíferos de altitude e o cenário de estresse previsto, à luz das vazões de referência Q7,10 e Q95; monitorar, de forma confiável e independente, as vazões bombeadas para comprovar que respeitam os limites outorgados ou redefinidos pela revisão a ser feita.
- **Investigar e coibir ou limitar urgentemente as captações de água subterrânea irregulares;**
- **Buscar junto à COPASA a disponibilização pública das leituras das réguas que a empresa mantém no local de Honório Bicalho, o que permitirá corrigir e atualizar as vazões estimadas por dupla massa (ANEXO 1) e validar em tempo real as previsões desta Nota;**
- **Estender os estudos** às séries de precipitação da bacia (próxima Nota Técnica), a outras estações e à atualização contínua das séries, incorporando o episódio 2026/27 assim que observado.

14 Limitações do Estudo

Os resultados referem-se a uma única estação fluviométrica e devem ser extrapolados com cautela para outras bacias. A resposta episódica identificada, embora estatisticamente significativa, baseia-se em número reduzido de grandes eventos (7), inerente à raridade dos super El Niños, o que torna largos os intervalos de previsão.

O modelo preditivo é confiável apenas dentro do domínio histórico; sua aplicação a valores de ONI superiores a 2,6 é extrapolação e deve ser lida como indicativa de ordem de grandeza e sob as ressalvas do item 11.6.

A série de vazões de 2024 a 2026 é estimada por dupla massa, com as ressalvas do ANEXO 1. A atribuição formal da tendência de fundo entre causas climáticas e antrópicas não é objeto desta Nota e será tratada com a análise das precipitações. Essas limitações serão progressivamente endereçadas nas próximas Notas da série.

15 Referências

INSTITUTO FÓRUM PERMANENTE SÃO FRANCISCO (FPSF). Projeto “De Olho no Velhas” (Plataforma Semente – MPMG), finalizado em 30/08/2025. Repositório de documentos: <https://www.forumsaofrancisco.eco.br/biblioteca/de-olho-no-velhas/7>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Séries de vazões médias diárias das estações Honório Bicalho (41199998) e Rio Acima (41195050), Rio das Velhas, MG (HidroWeb / Hidro-Telemetria).

NOAA/CLIMATE PREDICTION CENTER (CPC). Oceanic Niño Index (ONI). www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/oni.ascii.txt. Acesso em 29/08/2026.

NOAA/CPC. ENSO Diagnostic Discussion — El Niño Advisory, agosto de 2026; e NOAA, comunicado de 11/06/2026.

NOAA/NATIONAL WEATHER SERVICE. Public Information Statement 26-05: adoção do RONI, fevereiro de 2026.



HAUSFATHER, Z. The Strongest El Niño Ever. The Climate Brink, 13/07/2026.
<https://www.theclimatebrink.com/p/the-strongest-el-nino-ever>.

INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR CLIMATE AND SOCIETY (IRI). ENSO Forecast. Columbia University, 2026.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2001; 2012.

FPSF. ANEXO 1 (Dupla Massa) e ANEXO 2 (tabelas de resultados) desta Nota Técnica; planilhas de trabalho associadas, agosto/2026.

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2026

Euler de Carvalho Cruz

Engenheiro – CREA/MG nº 18.738

Complementação dos Dados Faltantes da Estação Honório Bicalho – Método Dupla Massa
Anexo à Nota Técnica FPSF-NT-16-2026 – Influência do ENSO (Índice ONI) nas Vazões do Rio das Velhas na Estação Honório Bicalho

16.1 Introdução e Objetivo

A série de vazões médias diárias da estação fluviométrica de Honório Bicalho (código ANA 41199998), utilizada como base da Nota Técnica FPSF-NT-16-2026, encerra-se em 30/11/2023, data a partir da qual a estação foi desativada pela ANA/SGB (ver adiante). Para viabilizar a atualização dos estudos até o presente — em especial o acompanhamento da resposta do Rio das Velhas ao El Niño excepcional de 2026/27 —, os dados faltantes de Honório Bicalho, de 01/12/2023 a 30/08/2026 (1.004 dias), foram complementados a partir da série da estação telemétrica de Rio Acima (código ANA 41195050), situada 10,4 km a montante, distância medida ao longo do Rio das Velhas, mediante o Método da Dupla Massa.

Com o intuito de verificar a consistência de dados entre as estações fluviométricas e seu uso como ferramenta de preenchimento de lacunas, foi utilizado o Método da Dupla Massa, desenvolvido pelo Geological Survey (USA) e de Regressão Linear, conforme Tucci (2001, 2012), Barbosa et al. (2005) e Oliveira et al. (2010). Este Anexo descreve o método, sua adaptação ao caso de duas estações fluviométricas, a caracterização das estações envolvidas, a análise de consistência realizada — incluindo a identificação e o tratamento dos trechos inconsistentes da curva —, a justificativa da inclinação adotada e o procedimento de preenchimento executado.

16.2 O Método da Dupla Massa

O método baseia-se na suposição de que a relação entre os dados de uma estação e os de uma ou mais estações vizinhas deve ser linear e consistente ao longo do tempo. Se houver mudanças nessa relação, o método permite identificá-las e corrigi-las. No caso original descrito na literatura e no precedente interno do FPSF — o preenchimento da série pluviométrica da Lagoa Grande (MMV)/Lagoa dos Ingleses com a série da Barragem das Codornas (Relatório Final do Projeto “De Olho no Velhas”) —, a variável acumulada é a precipitação; no presente caso, a variável acumulada é a vazão média diária, aplicando-se o método, na íntegra, com a mesma lógica.

A análise de dupla massa é essencial para verificar a consistência dos dados. Pontos próximos a uma linha reta indicam correspondência satisfatória entre as séries de dados, enquanto dispersão significativa sugere problemas de medição ou alterações no sistema. Essa análise não fornece explicações diretas, mas aponta inconsistências que requerem investigação adicional. É importante investigar possíveis fontes de erro, como erros de medição ou mudanças ambientais. Assim, a análise de dupla massa melhora a qualidade e a precisão das análises hidrológicas e hidrogeológicas, ao identificar inconsistências nos dados e proporcionar ações para sua correção. (WATER SERVICES, 2024)

Descrição do método, adaptada ao caso fluviométrico:

- **Seleção das estações:** escolher a estação com dados faltantes (estação alvo) — neste caso, a estação Honório Bicalho — e selecionar a(s) estação(ões) vizinha(s) com séries consistentes e bem documentadas — neste caso, a estação de Rio Acima ($n = 1$);
- **Acumulação dos dados:** para as duas estações, calcular os valores acumulados de vazão ao longo do tempo: $Q_{ac}(i) = \sum Q(j)$, com $j = 1$ até i , onde $Q(j)$ é a vazão média diária no dia j ;
- **Gráfico de dupla massa:** construir um gráfico com a vazão acumulada da estação alvo (Honório Bicalho) no eixo y e a vazão acumulada da estação vizinha (Rio Acima) no eixo x — no caso geral de n vizinhas, usa-se no eixo x a média das massas acumuladas, $x(i) = (1/n) \cdot \sum Q_{ac,k}(i)$; aqui, $n = 1$;
- **Identificação de inconsistências:** no gráfico, uma relação linear indica consistência; desvios da linearidade — inflexões e degraus — indicam mudanças nas condições de medição ou inconsistências em uma das séries;
- **Preenchimento dos dados faltantes:** usando a relação linear ajustada entre as massas acumuladas dos trechos consistentes ($y = m \cdot x$), estimar os valores acumulados da estação alvo a partir dos acumulados da estação vizinha e subtrair os valores acumulados consecutivos para determinar a vazão diária estimada — o que equivale, na forma diária, a $Q_{HB}(i) = m \cdot Q_{RA}(i)$.

16.3 Caracterização das Estações

A estação convencional de Honório Bicalho (código fluviométrico 41199998; código pluviométrico 2043128), de responsabilidade da ANA e operação do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), localizava-se às margens do Rio das Velhas, a jusante da estação de Rio Acima e a montante da estação de Raposos e da captação da ETA Bela Fama (COPASA), desta distando apenas 2,4 km. Drena área de aproximadamente 1.550 km² do Alto Rio das Velhas e sua série de vazões médias diárias — 27/04/1971 a 30/11/2023, 52,6 anos sem falhas — é a mais importante da região para avaliação da segurança hídrica da RMBH. Encontra-se desativada desde dezembro de 2023 (ver seção seguinte).

A estação de Rio Acima (código ANA 41195050) é telemétrica, com registros a cada 15 minutos, opera desde 23/02/2017 e situa-se na cidade de Rio Acima, 10,4 km a montante de Honório Bicalho ao longo do Rio das Velhas, fora da influência do remanso da captação de Bela Fama. Sua curva-chave, segundo o SGB, apresenta bons ajustes e uma seção fluvial de menor variabilidade, tendo sido atualizada em 2024 com medições de campo. Não foi possível localizar, nas fontes públicas consultadas, o valor oficial da área de drenagem da estação de Rio Acima, de forma que não se sabe qual área de drenagem é agregada ao fluxo do rio no trecho entre Rio Acima (a montante) e Honório Bicalho (a jusante); sabe-se, contudo, que a foz do Rio de Peixe — importante afluente da margem direita — situa-se a montante da estação de Rio Acima, de modo que sua contribuição já está contida nas vazões ali medidas.

A figura a seguir, a ser inserida, mostra o caminho ao longo do Rio das Velhas entre as duas estações.

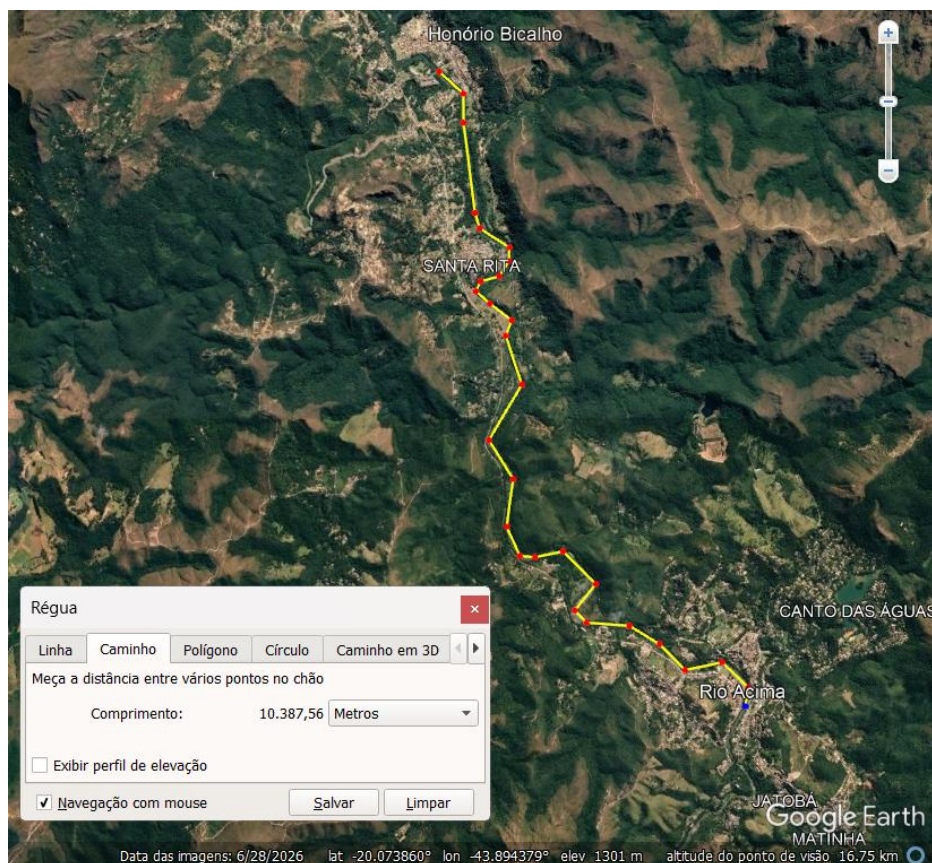


Figura A1.1 – Trajeto do Rio das Velhas entre as estações de Rio Acima e Honório Bicalho (imagem Google Earth a ser inserida). Fonte: Google Earth; elaboração FPSF.

16.4 Contexto: a Desativação de Honório Bicalho e a Estação de Rio Acima

A estação de Honório Bicalho, de extrema importância para os estudos da Nota Técnica FPSF-NT-16-2026, foi desativada pela ANA a partir de dezembro de 2023, sob a alegação, do SGB/CPRM, de que a seção de medição é instável. Os motivos foram detalhados na reunião do Convazão de 1º/08/2024: a seção sofria efeitos atribuídos aos remansos da captação de Bela Fama — distante apenas 2,4 km —, o que comprometia o ajuste da curva-chave, com desvios por diversas vezes superiores a 10% nas cotas baixas; eventos de cheia levaram a estação a colapsos sucessivos, com destaque para a cheia de 2021/2022, seguida de recuperação da estação iniciada em julho de 2022; e um novo colapso total ocorreu em 2023, atribuído pelo SGB a obras locais na seção fluvial. No entendimento do SGB, os dados finais já não eram representativos das vazões do Rio das Velhas naquele ponto.

Registre-se a nota do FPSF: é possível que não sejam obras, ou somente obras, mas também operação ilegal de garimpo realizada na altura de Honório Bicalho — em 31/10/2024 a Polícia Militar de Meio Ambiente desmantelou garimpo ilegal de ouro no Rio das Velhas nesse trecho, com quatro prisões em flagrante e apreensão de duas dragas montadas em balsas; garimpo no leito do Velhas também foi realizado, com autorização da ANM e da SEMAD, na região de Rio Acima em 2022 (ver Referências).

Na mesma reunião do Convazão, o SGB indicou a estação de Rio Acima como referência para o monitoramento: em operação desde 2017, com série já razoável, situada a cerca de 10 km da

captação da COPASA e fora da influência do remanso, com curva-chave de boa estabilidade — atualizada com medições de campo em julho de 2024 — e variabilidade natural de até 10% nas estiagens. Discutiu-se, ainda, a necessidade de medições semanais ou mesmo diárias na estação em situações críticas de estiagem na RMBH, tendo o SGB apontado limitações logísticas e a COPASA se proposto a estruturar parceria (transporte e barcos) para viabilizar o incremento das medições.

Por fim, apesar da desativação da estação da ANA, a COPASA — por considerar a seção de medição importante para seus estudos internos — instalou, há alguns anos, novas réguas no mesmo local de Honório Bicalho, cuja leitura visual é feita duas vezes por dia até o presente. Assim, as vazões provenientes do método de dupla massa aqui aplicado poderão ser corrigidas e atualizadas caso a COPASA forneça ao Instituto Fórum Permanente o histórico completo de suas medições.

O Instituto considera que esse histórico deve ser mantido permanentemente disponível ao público: embora as medições sejam realizadas por uma empresa — agora privada —, os dados referem-se ao rio, patrimônio público, e são de extrema importância para o conhecimento — que também é um direito da população — da situação hídrica do Rio das Velhas imediatamente a montante da captação que atende 71% da capital e 51% da RMBH.

16.5 Aplicação do Método Dupla Massa

Para a construção do gráfico de dupla massa com o objetivo de completar os dados faltantes na série de Honório Bicalho foi utilizada a série de vazões médias diárias de Rio Acima. Como essa série tem dados somente a partir de 23/02/2017, o período comum às duas estações estende-se de 23/02/2017 a 30/11/2023 — 2.472 dias, sem falhas em nenhuma das duas séries, todos utilizados na análise. A correlação entre as vazões diárias das duas estações no período comum é de $r = 0,95$ ($r^2 = 0,90$) — bem acima do mínimo de 0,7 usualmente exigido para o emprego do método —, refletindo a proximidade entre as estações (10,4 km ao longo do rio) e a ausência de tributário de grande porte no trecho intermediário.

A Figura A1.2 apresenta a curva de dupla massa do período comum completo, com a identificação dos trechos consistentes e dos trechos anômalos discutidos a seguir.

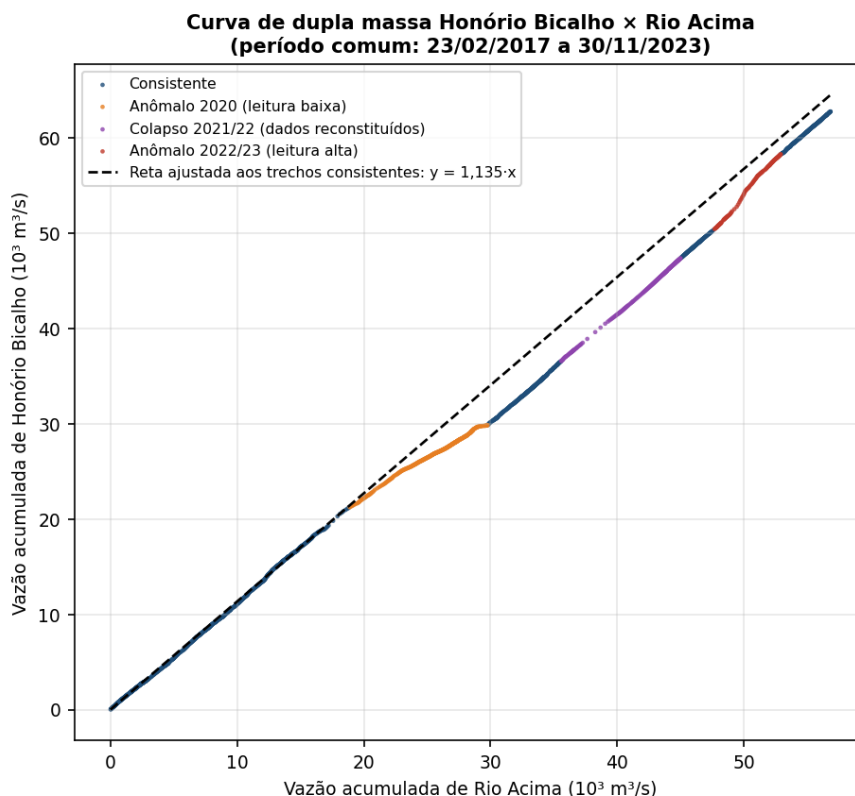


Figura A1.2 – Curva de dupla massa Honório Bicalho × Rio Acima (23/02/2017 a 30/11/2023), com os trechos consistentes (azul), os trechos anômalos de 2020 (laranja) e do verão 2022/23 (vermelho), o trecho reconstituído do colapso de 2021/22 (roxo) e a reta ajustada aos trechos consistentes. Elaboração FPSF.

16.6 Análise de consistência e identificação das inconsistências

Diferentemente do precedente pluviométrico Lagoa Grande × Codornas — em que a curva de dupla massa se mostrou praticamente perfeita ($r^2 = 0,99983$), com desvios mínimos —, a curva de Honório Bicalho × Rio Acima exibe inflexões nítidas, que o método capta com precisão e que coincidem, uma a uma, com o histórico documentado de colapsos da seção de Honório Bicalho descrito na seção anterior. A Figura A1.3 mostra a evolução da razão mensal entre as massas ($\Sigma Q_{HB}/\Sigma Q_{RA}$), com as janelas anômalas destacadas, e a Figura A1.4 apresenta, no formato do precedente interno do FPSF, a curva completa com as retas de referência e a ampliação da parte final.

Três janelas inconsistentes foram identificadas:

- (i) de fevereiro a dezembro de 2020, a razão mensal despenca para 0,49–0,89 — Honório Bicalho passando a registrar menos que Rio Acima, fisicamente implausível para uma seção a jusante —, em sequência imediata à grande cheia de janeiro de 2020 (481,9 m^3/s em Honório Bicalho), indicando dano à seção e/ou curva-chave desajustada nesse período;
- (ii) de dezembro de 2021 a junho de 2022 — exatamente a janela do colapso total causado pela cheia de 2021/2022 (715 m^3/s em 09/01/2022) e da recuperação iniciada em julho de 2022 —, a razão aparenta normalidade (1,145), porém a correlação diária entre as duas séries salta para $r = 0,997$ e a variabilidade da razão

diária cai a menos da metade da observada nos trechos genuínos: trata-se de forte indício de que os dados de Honório Bicalho desse trecho já foram reconstituídos pelo operador (possivelmente a partir da própria Rio Acima), de modo que incluí-los no ajuste da inclinação seria circular; e

- (iii) de dezembro de 2022 a março de 2023, a razão mensal dispara para 1,28–1,78 (degrau visível na curva), em coincidência com o colapso final da seção — atribuído a obras locais e/ou garimpo — que motivou a desativação da estação.

Fora dessas janelas, a razão mensal oscila de forma natural em torno de um valor estável, e a curva de dupla massa restrita aos trechos consistentes — 1.804 dias, 73% do período comum — é praticamente uma reta perfeita: $r^2 = 0,999875$, da mesma ordem do precedente pluviométrico (0,99983). Comprova-se, assim, que a estação de Rio Acima pode ser utilizada como ferramenta de preenchimento dos dados de Honório Bicalho, desde que a relação seja ajustada exclusivamente sobre os trechos em que a seção de Honório Bicalho operou de forma íntegra.

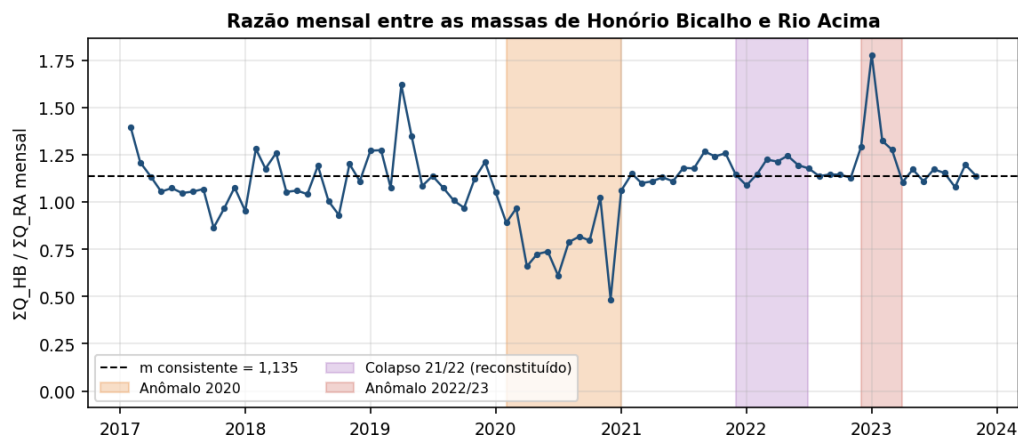


Figura A1.3 – Razão mensal entre as massas acumuladas ($\Sigma Q_{HB}/\Sigma Q_{RA}$) ao longo do período comum, com as três janelas inconsistentes destacadas e a inclinação consistente adotada (linha tracejada). Elaboração FPSF.

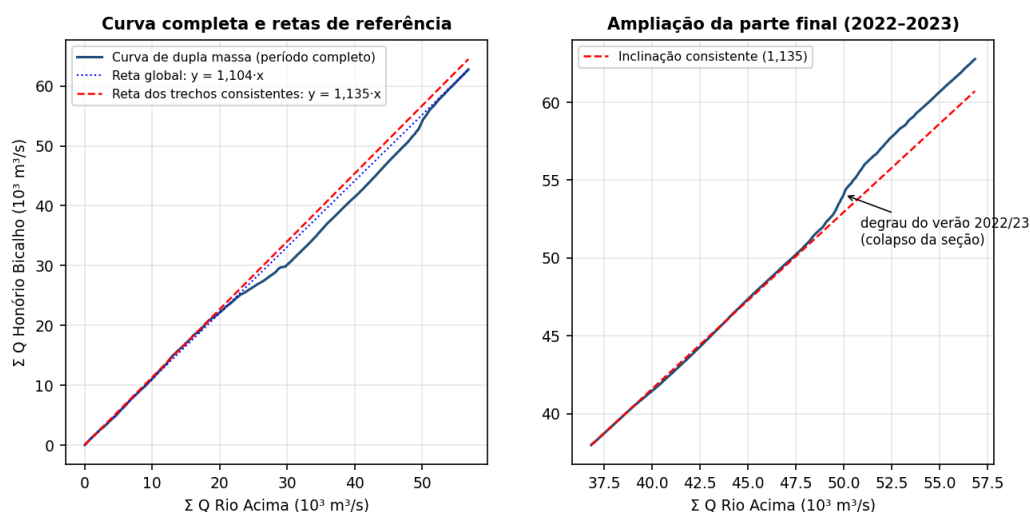


Figura A1.4 – À esquerda, curva de dupla massa completa com a reta global (pontilhada azul) e a reta dos trechos consistentes (tracejada vermelha); à direita, ampliação da parte final (2022–2023), evidenciando o degrau do verão 2022/23 e o retorno à inclinação consistente. Elaboração FPSF.

16.7 Justificativa da inclinação adotada

A escolha da inclinação de preenchimento seguiu o próprio espírito diagnóstico do método de dupla massa: a inclinação deve representar a relação verdadeira entre as duas seções, e não uma média contaminada pelos períodos em que uma delas comprovadamente operou de forma inconsistente. Três alternativas foram consideradas:

- (a) a inclinação global do período comum completo, $m = 1,104$, que embute as três janelas anômalas — em particular o ano de 2020, cuja razão deprimida (0,845) arrasta a média para baixo;
- (b) inclinações de segmentos isolados, que variam de 1,138 (2017–2019) a 1,157 (2021), sensíveis à escolha arbitrária do segmento; e
- (c) a inclinação ajustada ao conjunto de todos os trechos consistentes, excluídas as três janelas anômalas identificadas — critério adotado.

A alternativa (c) foi adotada por reunir as seguintes vantagens: fundamenta-se em evidência dupla e independente — a estatística (razões mensais fora da faixa natural de oscilação; correlação e variabilidade artificiais no trecho reconstituído) e a documental (o histórico de colapsos e recuperações da seção de Honório Bicalho registrado pelo próprio SGB na reunião do Convazão de 1º/08/2024) —; maximiza a amostra utilizável (1.804 dias, abrangendo estações secas e úmidas de seis anos distintos, de 2017 a 2023); e produz a curva de dupla massa de melhor qualidade ($r^2 = 0,999875$). A inclinação resultante é $m = 1,1347$ — isto é, as vazões de Honório Bicalho superam as de Rio Acima, em média, em cerca de 13,5%, coerente com sua posição a jusante e com o acréscimo de área de drenagem incremental no trecho (cujo valor, conforme já registrado, não pôde ser determinado). Cumpre notar que a inclinação global (1,104) subestimaria as vazões preenchidas em cerca de 2,8%, e que a razão do trecho final degradado (até 1,78 no pico da anomalia) as superestimaria fortemente.

16.8 Preenchimento realizado

Definida a inclinação, o preenchimento seguiu a formulação do método — previsão dos acumulados da estação alvo a partir dos acumulados da vizinha e subtração de acumulados consecutivos —, que na forma diária se reduz a: $Q_{HB}(i) = 1,1347 \times Q_{RA}(i)$. Foram assim estimadas as vazões médias diárias de Honório Bicalho de 01/12/2023 a 30/08/2026 — 1.004 dias, sem lacunas, pois a série de Rio Acima é completa nesse intervalo. As vazões estimadas resultaram em média de 22,7 m³/s, mínima de 9,5 m³/s e máxima de 186,7 m³/s no período.

Ressalvas de uso:

- (i) os valores preenchidos são estimativas, adequadas para caracterizar a ordem de grandeza e o comportamento das vazões — finalidade dos estudos da NT-16-2026 —, e não substituem medições diretas;
- (ii) herdaram a variabilidade natural de até 10% reconhecida pelo SGB para a curva-chave de Rio Acima nas estiagens;
- (iii) assumem a estacionariedade da relação entre as seções no período preenchido — hipótese razoável, mas não verificável sem medições em Honório Bicalho; e



- (iv) **poderão ser corrigidos e atualizados caso a COPASA disponibilize o histórico das leituras das réguas que mantém no local de Honório Bicalho, conforme defendido pelo Instituto na seção de contexto.**

16.9 Referências

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2001; 2012.

BARBOSA et al. (2005); OLIVEIRA et al. (2010) — conforme referenciado no documento interno do FPSF “Complementação dos Dados Faltantes – Método Dupla Massa” (caso Lagoa Grande (MMV) x Barragem das Codornas).

WATER SERVICES (2024) — apud documento interno do FPSF acima citado.

CONVAZÃO – Grupo de Acompanhamento das Vazões do Rio das Velhas. Registros da reunião de 1º de agosto de 2024 (desativação da estação Honório Bicalho; estação Rio Acima; curva-chave; frequência de medições; parceria COPASA–SGB).

PROJETO MANUELZÃO/UFGM. Polícia Militar desmantela garimpo ilegal no Rio das Velhas em Nova Lima. Disponível em: manuelzao.ufmg.br/policia-militar-desmantela-garimpo-ilegal-no-rio-das-velhas-em-nova-lima/. Acesso em 13/09/2024.

PROJETO MANUELZÃO/UFGM. Dragas de mineração no Rio das Velhas preocupam moradores. Disponível em: manuelzao.ufmg.br/dragas-de-mineracao-no-rio-das-velhas-preocupam-moradores/; e ESTADO DE MINAS, 24/09/2023. Acesso em 13/09/2024.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Séries de vazões médias diárias das estações Honório Bicalho (41199998) e Rio Acima (41195050), Rio das Velhas, MG (HidroWeb / Hidro-Telemetria).

Tabelas de Resultados dos Cálculos

Este anexo reúne as tabelas de resultados dos cálculos que fundamentam as conclusões e os comentários da Nota, provenientes das planilhas de trabalho revisadas (série atualizada até 2026). Não se incluem as tabelas de valores diários de vazões e de ONI, por serem muito extensas.

Tabela A2.1. Teste da hipótese do ano pós-El Niño (16 episódios): vazão média anual no ano do verão DJF maduro (Y) e no ano seguinte (Y+1), com a variação percentual. (*) valores com dados estimados por dupla massa.

Episódio (pico)	Intensidade	Pico ONI (°C)	Ano Y	Q méd. Y (m³/s)	Q méd. Y+1 (m³/s)	Δ (%)	Dados
OND 1972	Forte	1,84	1973	31,2	24,1	-22,7	medidos
NDJ 1976	Fraco	0,84	1977	23,7	25,5	7,6	medidos
OND 1977	Fraco	0,84	1978	25,5	45,1	76,5	medidos
DJF 1983	Muito forte	2,14	1983	46,6	25,3	-45,7	medidos
ASO 1987	Moderado	1,49	1988	29,1	25,0	-14,2	medidos
DJF 1992	Forte	1,54	1992	35,9	30,4	-15,3	medidos
NDJ 1994	Fraco	0,97	1995	28,2	32,3	14,5	medidos
NDJ 1997	Muito forte	2,37	1998	25,3	20,2	-20,4	medidos
OND 2002	Moderado	1,19	2003	27,4	27,7	1,2	medidos
NDJ 2004	Fraco	0,71	2005	32,4	28,5	-12,1	medidos
OND 2006	Fraco	0,88	2007	24,3	30,6	25,8	medidos
NDJ 2009	Forte	1,50	2010	28,7	32,1	11,7	medidos
NDJ 2015	Muito forte	2,59	2016	21,9	14,9	-32,2	medidos
NDJ 2018	Moderado	1,05	2019	18,8	31,8	69,3	medidos
NDJ 2019	Fraco	0,75	2020	31,8	22,1	-30,6	medidos
NDJ 2023	Forte	1,99	2024	22,7	18,2	-19,8	estimados*

Tabela A2.2. Teste de Wilcoxon pareado unilateral da hipótese, por subconjunto de intensidade.

Subconjunto	n	Quedas	Δ% mediano	Wilcoxon p (unilateral)
Moderado ou mais forte	10	7	-17,6%	0,0654
Forte ou muito forte	7	6	-20,4%	0,0156

Tabela A2.3. Correlações de Pearson e Spearman entre o ONI defasado (0–12 meses) e as anomalias padronizadas de vazão mensal (1971–2026).

Defasagem (meses)	Pearson (anomalias)	p-valor	Spearman (anomalias)	p-valor
0	0,028	0,480	0,033	0,397
1	0,020	0,615	0,030	0,443
2	0,017	0,662	0,032	0,416

Defasagem (meses)	Pearson (anomalias)	p-valor	Spearman (anomalias)	p-valor
3	0,020	0,616	0,037	0,342
4	0,027	0,494	0,047	0,226
5	0,033	0,398	0,055	0,159
6	0,036	0,362	0,056	0,148
7	0,029	0,456	0,050	0,199
8	0,013	0,732	0,030	0,445
9	-0,005	0,902	0,007	0,862
10	-0,020	0,619	-0,012	0,757
11	-0,032	0,408	-0,022	0,567
12	-0,051	0,190	-0,036	0,352

Tabela A2.4. Composições por fase ENSO: medianas das vazões e p-valores dos testes de Kruskal-Wallis e Mann-Whitney.

Conjunto	Variável	Mediana EN	Mediana Neutro	Mediana LN	p Kruskal-Wallis	p EM × Neutro	p EN×LN	p Ne×LN
Período úmido (fase DJF)	Q media	35,6	36,4	34,2	0,617	0,314	0,942	0,512
Período úmido (fase DJF)	Q max	223,2	187,7	182,2	0,776	0,509	0,589	0,867
Período úmido (fase DJF)	Q min	12,2	13,1	12,2	0,638	0,597	0,770	0,337
Período seco (fase DJF verão anterior)	Q media	17,1	18,8	16,6	0,326	0,234	0,545	0,203
Período seco (fase DJF verão anterior)	Q max	33,4	33,4	31,2	0,954	0,904	0,811	0,818
Período seco (fase DJF verão anterior)	Q min	12,8	14,3	11,7	0,116	0,105	0,517	0,064
Ano civil (fase dominante)	Q media	27,4	30,4	28,0	0,925	0,789	0,873	0,709
Ano civil (fase dominante)	Q max	212,7	124,3	206,9	0,152	0,191	0,400	0,055

Conjunto	Variável	Mediana EN	Mediana Neutro	Mediana LN	p Kruskal-Wallis	p EM × Neutro	p EN×LN	p NexLN
Ano civil (fase dominante)	Q min	12,0	13,1	11,5	0,570	0,616	0,631	0,241

Tabela A2.5. Estratificação das vazões do período úmido por categoria de intensidade do ONI DJF.

Categoria (ONI DJF)	n	Qmed mediana	Qmax mediana	Qmin mediana
EN muito forte	3	33,2	224,7	14,1
EN forte	3	41,1	225,3	12,3
EN moderado	2	36,2	191,4	14,7
EN fraco	11	35,7	221,7	12,0
Neutro	16	36,1	195,8	12,9
LN fraco	12	37,8	226,2	12,3
LN moderado	4	35,9	183,1	11,4
LN forte	4	29,5	131,3	12,1

Tabela A2.6. Tendências de longo prazo (Mann-Kendall e declividade de Sen), na série medida e, como sensibilidade, na série estendida.

Série	Período	Z	p-valor	Sen (m³/s por ano)	Signif. (5%)
Qmed anual (medida)	1972–2022	-1,09	0,2764	-0,090	não signif.
Qmin anual (medida)	1972–2022	-1,10	0,2729	-0,040	não signif.
Qmed per. seco (medida)	1971–2023	-1,19	0,2345	-0,044	não signif.
Qmed per. úmido (medida)	1971/72–2022/23	-1,71	0,0868	-0,180	marginal
Qmed anual (sensib. c/ estendida)	1972–2025	-1,40	0,1607	-0,104	não signif.
Qmed per. úmido (sensib. c/ estendida)	1971/72–2025/26	-2,12	0,0340	-0,203	SIGNIFICATIVA

Tabela A2.7. Frequência de dias com vazão diária superior a 250 m³/s, por fase ENSO (1971–2026).

Fase	Dias na fase (1971–2026)	Dias com Q>250	Dias>250 por 1000 dias
El Niño	4865	4	0,82
Neutro	9962	10	1,00
La Niña	5327	14	2,63

Tabela A2.8. Fase ENSO do ano de queda de cada El Niño forte e ocorrência de “resgate” por La Niña.

Ano da queda (Y+1)	Episódio EN precedente	ONI DJF do ano Y+1	Houve resgate (subida)?
1974	OND 1972	-1,87	não (-22,7%)
1984	DJF 1983	-0,63	não (-45,7%)
1993	DJF 1992	+0,13	não (-15,3%)
1999	NDJ 1997	-1,51	não (-20,4%)
2011	NDJ 2009	-1,29	SIM (+11,7%)
2017	NDJ 2015	-0,08	não (-32,2%)
2025	NDJ 2023	-0,46	não (-19,8%)

Tabela A2.9. Segmentos da curva de dupla massa Honório Bicalho × Rio Acima e respectivas inclinações (detalhes no ANEXO 1).

Segmento	Período	Inclinação $\Sigma Q_{HB}/\Sigma Q_{RA}$	Situação
A	23/02/2017–31/12/2019	1,138	consistente
B	01/01/2020–31/12/2020	0,845	anômalo (leitura baixa)
C	01/01/2021–30/11/2021	1,157	consistente
D	01/12/2021–30/06/2022	1,145	reconstituído (excluído)
E	01/07/2022–28/02/2023	1,392*	anômalo em dez/22–mar/23
F	01/03/2023–30/11/2023	1,163	consistente (abr–nov/23)
—	Conjunto consistente (1.804 dias)	1,1347	ADOTADA ($r^2=0,999875$)
—	Global (2.472 dias)	1,104	referência

Tabela A2.10. Conjunto de dados dos 16 episódios usados no modelo de previsão da queda (ONI de pico, base relativa e Δ% observado).

Episódio	Int.	ONI pico	Base relativa (Qmed Y/28,6)	Δ% observado
OND 1972	Forte	1,84	1,09	-22,7
NDJ 1976	Fraco	0,84	0,83	7,6
OND 1977	Fraco	0,84	0,89	76,5
DJF 1983	Muito forte	2,14	1,63	-45,7
ASO 1987	Moderado	1,49	1,02	-14,2
DJF 1992	Forte	1,54	1,25	-15,3
NDJ 1994	Fraco	0,97	0,99	14,5
NDJ 1997	Muito forte	2,37	0,89	-20,4
OND 2002	Moderado	1,19	0,96	1,2
NDJ 2004	Fraco	0,71	1,13	-12,1
OND 2006	Fraco	0,88	0,85	25,8

Episódio	Int.	ONI pico	Base relativa (Qmed Y/28,6)	Δ% observado
NDJ 2009	Forte	1,50	1,01	11,7
NDJ 2015	Muito forte	2,59	0,77	-32,2
NDJ 2018	Moderado	1,05	0,66	69,3
NDJ 2019	Fraco	0,75	1,11	-30,6
NDJ 2023	Forte	1,99	0,79	-19,8

Tabela A2.11. Desempenho dos modelos de previsão na validação leave-one-out (MAE e R²).

Modelo	MAE LOOCV (p.p.)	R² LOOCV
M0 – Média (baseline)	27,9	-0,14
M1 – Linear: ONI	22,4	0,12
M2 – Linear: ONI + base	22,3	0,20
M3 – Random Forest: ONI + base	21,6	0,26
M4 – Random Forest: 4 preditores	24,1	0,08
M2 restrito a fortes+ (n=7)	9,9	—

Tabela A2.12. Cenários de queda para 2028 com ONI de pico entre 2,0 e 2,8 (intervalos de ~80%).

ONI pico	Qmed 2027 suposta	Δ% previsto	IC80% inf.	IC80% sup.	Qmed 2028 (m³/s)	Pior caso	Melhor caso
2,0	24,0	-6,2	-40	27	22,5	14,5	30,6
2,0	28,6	-17,7	-51	16	23,5	13,9	33,1
2,0	33,0	-28,7	-62	5	23,5	12,5	34,6
2,4	24,0	-17,7	-51	16	19,8	11,7	27,8
2,4	28,6	-29,2	-63	4	20,2	10,7	29,8
2,4	33,0	-40,2	-74	-7	19,7	8,7	30,8
2,8	24,0	-29,2	-63	4	17,0	8,9	25,0
2,8	28,6	-40,7	-74	-7	17,0	7,4	26,5
2,8	33,0	-51,8	-85	-18	15,9	4,9	27,0

Tabela A2.13. Cenários extremos de queda (ONI de pico 3,0–4,0), com extrapolação linear e cenário conservador com saturação.

ONI pico	Qmed 2027 suposta	Δ% linear	IC80%	Qmed 2028 linear	Qmed 2028 c/ saturação (-46%)
3,0	24,0	-35,1	[-69; -2]	15,6	13,0
3,0	28,6	-46,6	[-80; -13]	15,3	15,4
3,0	33,0	-57,6	[-91; -24]	14,0	17,8
3,4	24,0	-46,6	[-80; -13]	12,8	13,0
3,4	28,6	-58,1	[-92; -25]	12,0	15,4

ONI pico	Qmed 2027 suposta	$\Delta\%$ linear	IC80%	Qmed 2028 linear	Qmed 2028 c/ saturação (-46%)
3,4	33,0	-69,1	[-103; -36]	10,2	17,8
3,7	24,0	-55,2	[-89; -22]	10,7	13,0
3,7	28,6	-66,8	[-100; -33]	9,5	15,4
3,7	33,0	-77,8	[-111; -44]	7,3	17,8
4,0	24,0	-63,9	[-97; -30]	8,7	13,0
4,0	28,6	-75,4	[-109; -42]	7,0	15,4
4,0	33,0	-86,4	[-120; -53]	4,5	17,8

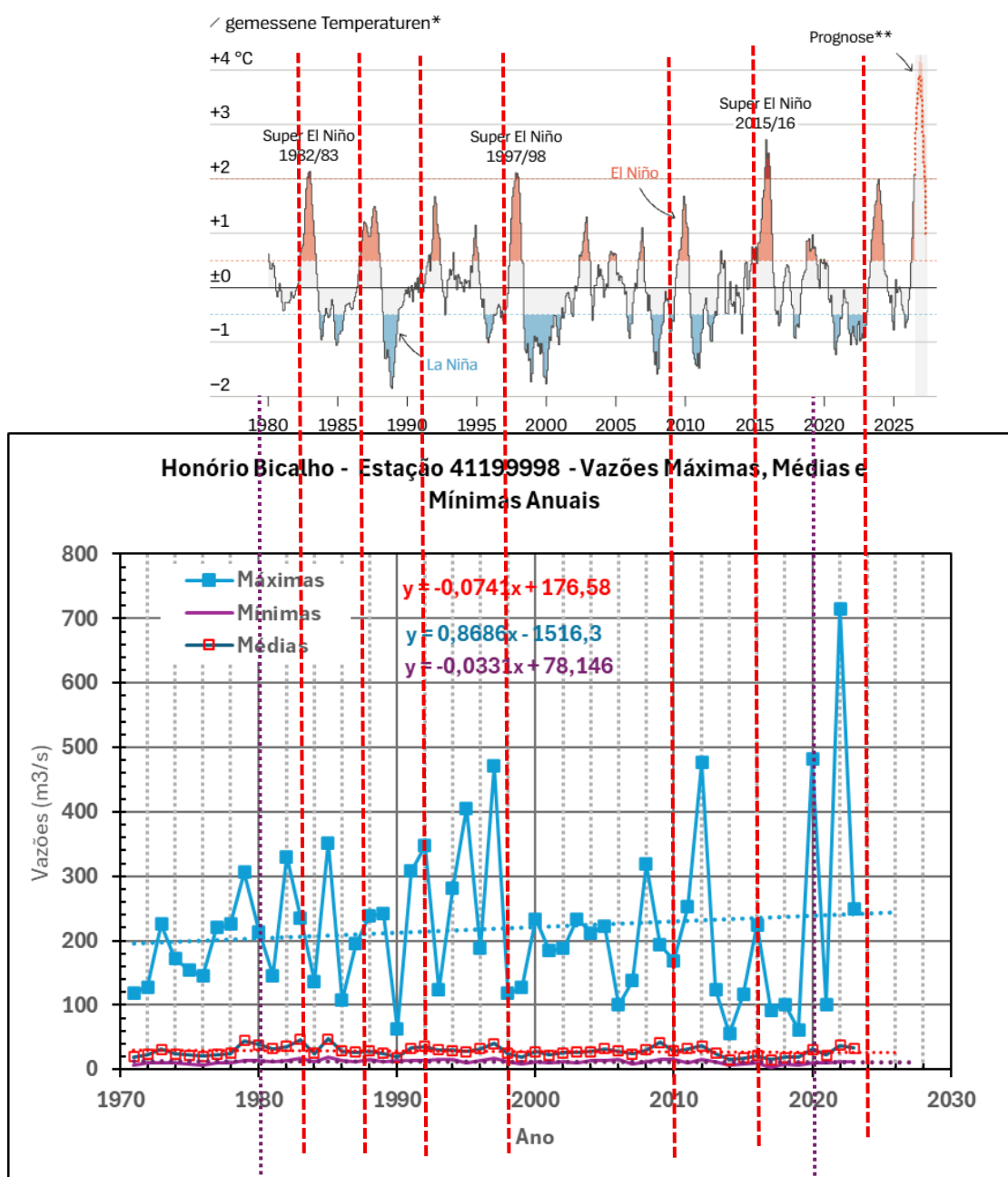
Tabela A2.14. Painel de gatilhos: vazão média esperada em 2028 em função do ONI de pico observado.

Se o ONI de pico atingir	$\Delta\%$ previsto (base média)	Qmed 2028 esperada (m ³ /s)	Referência histórica
1,5 °C	-3%	27,6	~2 quedas leves em 3 casos
2,0 °C	-18%	23,5	nível do EN 2023/24
2,5 °C	-32%	19,4	nível do recorde 2015/16
3,0 °C	-47%	15,3	além de qualquer registro
3,5 °C	-61%	11,2	mediana prevista p/ 2026 (~3,4-3,6)
4,0 °C	-75%	7,0	teto dos modelos (CESM1)

Gráficos Preliminares (Análise Visual de Origem)

Comparação entre Vazões do Rio das Velhas em Honório Bicalho e Períodos de El Niño e La Niña

Este anexo reúne os gráficos preliminares elaborados manualmente pelo autor, nos quais foi identificada visualmente, pela primeira vez, a queda das vazões que se segue aos episódios de ONI mais altos — observação que constituiu o ponto de partida de toda a investigação desenvolvida nesta Nota Técnica. Os gráficos são inseridos a seguir.



Fonte do gráfico das variações de temperatura no oceano Pacífico:

<https://www.spiegel.de/wissenschaft/super-el-nino-die-kommenden-monate-werden-die-klimazukunft-der-erde-sichtbar-machen-a-be71cd4f-7de7-4bf7-8ddd-a033e266f12e>

Revista Der Spiegel – Artigo de Por Johann Grolle - 27 de agosto de 2026

Fonte dos gráficos de vazões e volumes escoados do Rio das Velhas e de precipitações acumuladas medidas na Estação Barragem das Codornas:

<https://www.forumsaofrancisco.eco.br/biblioteca/de-olho-no-velhas/7>

Instituto Fórum Permanente São Francisco – Projeto “De Olho no Velhas” – Relatório Final – Parte 11 – ago/2025

