



INFRASTRUCTURE AND URBANISM STUDIES

WORKING PAPER PSPHUB

SISTEMA CANTAREIRA *QUO VADIS*

Mario Antonio Margarido

Frederico Araujo Turolla

15 de maio de 2026 – Versão 01

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVO	5
3. DADOS	6
4. MÉTODOS	6
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	10
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	27
7. LITERATURA CITADA	28

AFINAL DE CONTAS, SISTEMA CANTAREIRA QUO VADIS? Uma aplicação do Modelo Bayesiano Estrutural

Mario Antonio Margarido¹

Frederico Araujo Turolla²

RESUMO: O estudo aborda o desafio da segurança hídrica na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), focando-se no Sistema Cantareira, o maior dos sistemas integrados que abastecem cerca de 22 milhões de pessoas. Devido à tendência descendente do volume útil observada entre março de 2023 e novembro de 2025, o artigo utiliza o Modelo Bayesiano Estrutural (*Bayesian Structural Time Series - BSTS*) para prever o volume útil do sistema entre abril de 2026 e o final de 2028. A metodologia BSTS destaca-se por permitir a decomposição da série temporal em componentes como tendência, sazonalidade e variáveis exógenas (neste caso, os índices pluviométricos), além de incorporar a incerteza probabilística através de distribuições de risco. Os resultados indicam um ajuste de modelo elevado (R^2 de 0,9991), confirmando que a chuva e a inércia do sistema são preditores essenciais. As projeções para 2026-2028 mostram que o sistema manterá os seus ciclos de exaustão (no inverno) e recarga (no verão), com um ponto de maior vulnerabilidade em novembro de 2027, onde o risco de atingir o "volume morto" sobe para cerca de 8% a 10%. O estudo conclui que, embora o sistema demonstre resiliência, a gestão deve manter medidas de contingência devido à incerteza climática de longo prazo.

Palavras-chave: Sistema Cantareira, Modelo Bayesiano Estrutural (BSTS), Modelo Bayesiano Estrutural (BSTS), Segurança Hídrica, Volume Útil, Índices Pluviométricos, Gestão de Recursos Hídricos.

Whither the Cantareira System? An Application of Bayesian Structural Time Series for Water Level Forecasting

ABSTRACT: This study addresses the critical challenge of water security in the São Paulo Metropolitan Region (SPMR) by analyzing the Cantareira System, the largest integrated water supply network serving approximately 22 million people. Given the downward trend in the system's useful volume observed between March 2023 and November 2025, this research employs the Bayesian Structural Time Series (BSTS) model to forecast the reservoir's levels from April 2026 through the end of 2028. The BSTS methodology was selected for its superior ability to decompose time series into non-observable components—such as long-term trend and seasonality—while incorporating exogenous variables (rainfall indices) and probabilistic uncertainty through Bayesian priors. The model achieved high predictive accuracy, with an R^2 of 0.9991 and a low residual standard deviation of 7.20 units. Findings indicate that the system

¹ Doutor em Economia Aplicada pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (Esaq/USP), Senior Partner e Líder de Econometria da Pezco Economics e Pesquisador do PSP Hub Estudos em Infraestrutura e Urbanismo. mario.margarido@pezco.com.br.

² Doutor em Economia de Empresas pela Escola de Administração de Empresas da Fundação Getúlio Vargas de São Paulo (EAESP/FGV), Senior Partner da Pezco Economics e Presidente do PSP Hub Estudos em Infraestrutura e Urbanismo. fredturolla@pezco.com.br

will maintain its characteristic hydrological cycles of exhaustion (winter) and recharge (summer). However, the projections reveal a point of maximum vulnerability in November 2027, where the statistical risk of reaching the "dead volume" (reserve technical level) rises to approximately 8% to 10%. The study concludes that while the system demonstrates resilience, the inherent climate uncertainty requires managers to maintain contingency measures and proactive monitoring to mitigate the risks of future water crises.

Keywords: Cantareira System, Bayesian Structural Time Series (BSTS), Water Security, Hydrological Forecasting, Time Series Decomposition, Public Policy Management, Rainfall Indices.

1. INTRODUÇÃO

O abastecimento de água na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)³ é um dos maiores desafios de engenharia e gestão ambiental do mundo. Com uma população que próxima aos 22 milhões de habitantes⁴, a segurança hídrica da região depende de um complexo arranjo de reservatórios, transposições e tecnologias de monitoramento.

Embora o Sistema Cantareira seja o mais emblemático, a capital paulista e os municípios vizinhos são atendidos por um conjunto de sistemas integrados que garantem a resiliência do suprimento.

Uma visão geral de cada sistema de abastecimento de água para a Região Metropolitana de São Paulo mostra que, o Sistema Cantareira é o maior de todos, composto por cinco reservatórios principais, Jaguari, Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro. Esse sistema capta água de bacias distantes, dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá e a transporta por túneis e canais até a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Sua importância é vital, atendendo cerca de 7,5 milhões de pessoas. O Sistema Guarapiranga é o segundo maior em termos de volume de atendimento, focado principalmente na zona sul e sudoeste de São Paulo. O Sistema Alto Cotia, atende a região oeste e é um dos mais antigos, operando em áreas de preservação ambiental. O Sistema Rio Grande e Rio Claro é fundamental para o ABC Paulista e a zona leste, aproveitando braços da represa Billings e nascentes da Serra do Mar. Finalmente, o Sistema

³ Conforme SÃO PAULO (2011), a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), também conhecida como Grande São Paulo, é composta por 39 municípios. Essa configuração foi estabelecida originalmente pela Lei Complementar Federal nº 14/1973 e posteriormente reorganizada pela Lei Complementar Estadual nº 1.139/2011. Os municípios que fazem parte da região metropolitana estão divididos por regiões. Na região Norte estão Caieiras, Cajamar, Francisco Morato, Franco da Rocha e Mairiporã. Fazem parte da região Leste (Alto Tietê) os municípios Arujá, Biritiba Mirim, Ferraz de Vasconcelos, Guararema, Guarulhos, Itaquaquecetuba, Mogi das Cruzes, Poá, Salesópolis, Santa Isabel e Suzano. Na Região Sudeste (ABC) constam os municípios de Diadema, Mauá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Santo André, São Bernardo do Campo e São Caetano do Sul. Na região Sudoeste estão os municípios de Cotia, Embu das Artes, Embu-Guaçu, Itapeverica da Serra, Jujubim, São Lourenço da Serra, Taboão da Serra e Vargem Grande Paulista. Na Região Oeste aparecem os municípios de Barueri, Carapicuíba, Itapevi, Jandira, Osasco, Pirapora do Bom Jesus e Santana de Parnaíba. No total, são 39 municípios.

⁴ De acordo com IBGE (2024), estimativas mostram uma população de 21.518.955 habitantes na Região metropolitana de São Paulo.

São Lourenço, o qual, é o mais recente (inaugurado em 2018), foi projetado para aliviar a pressão sobre o Cantareira, captando água no Vale do Ribeira.

Dado que o Sistema Cantareira é o sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo, e dado que o volume útil do Cantareira apresenta tendência descendente desde março de 2023 até novembro de 2025, isto implica no aumento de risco de uma crise hídrica na região. Sendo assim, torna-se de suma relevância estimar previsões sobre o volume útil do Cantareira, cujos resultados podem ser utilizados como parâmetros pela implementação de estratégias no sentido de mitigar os possíveis efeitos de uma crise futura.

2. OBJETIVO

O objetivo desse artigo consiste na estimação de um modelo de previsão do volume útil do Sistema Cantareira desde abril de 2026 até o final de 2028. Para tal tarefa, será utilizado o Modelo Estrutural Bayesiano (*Bayesian Structural Time Series (BSTS)*).

Como dito anteriormente, prever o Volume Útil do Sistema Cantareira não é apenas um exercício acadêmico, mas sim, uma ferramenta de suporte à decisão para evitar crises como a de 2014-2015. Nesse contexto, o *BSTS* destaca-se como uma abordagem superior aos métodos tradicionais. Afinal de contas, quais são as justificativas para utilizar o *BSTS*?

O modelo *BSTS* é particularmente eficaz para dados hidrológicos e climáticos devido a três pilares fundamentais. Em primeiro lugar, tem-se a Decomposição de Componentes, pois, o modelo permite isolar a tendência (longo prazo), a sazonalidade (ciclos de chuva e seca) e os efeitos de feriados ou eventos extremos. Para o Cantareira, entender a sazonalidade intra-anual é crucial para gerir as reservas durante o inverno seco.

Também, o *BSTS* se diferencia dos modelos puramente autorregressivos, uma vez que, permite a inclusão de Variáveis Exógenas (Regressão Dinâmica), sendo que, o *BSTS* lida muito bem com regressores externos. O modelo usa *prioris* bayesianas para identificar quais variáveis realmente impactam o volume útil, "zerando" ruídos e evitando o sobreajuste (*overfitting*). Além disso, incorpora a incerteza probabilística, dado que, ao contrário de previsões pontuais, o *BSTS* gera uma distribuição de probabilidade. Isso permite que gestores trabalhem com cenários de risco, como, por exemplo, há 90% de chance de o volume estar acima de 30% em outubro, facilitando a gestão de contingência.

O uso dessas ferramentas econométricas avançadas permite antecipar quedas críticas no volume útil com meses de antecedência, possibilitando manobras operacionais entre os sistemas e campanhas de conscientização antes que o nível crítico seja atingido. Em outras palavras, A principal vantagem do *BSTS* na previsão do Cantareira é a sua capacidade de conciliar a persistência temporal do estoque hídrico com a volatilidade dos fluxos pluviométricos, fornecendo não apenas um número, mas uma distribuição de riscos que é fundamental para a segurança hídrica.

3. DADOS

Foram utilizadas as séries temporais com frequência mensal para as variáveis Volume Útil do Sistema Cantareira e os Índices Pluviométricos que incidem sobre o Sistema Cantareira. O período abrangido se inicia em março de 2012 e estende-se até fevereiro de 2026. A fonte dos dados é o Portal dos Mananciais (2026), cujo endereço é <https://mananciais.sabesp.com.br/>

4. MÉTODOS

Em relação ao Modelo Estrutural, sua principal vantagem é que ele permite a decomposição de séries temporais em quatro componentes não observáveis: Tendência, Sazonalidade, Ciclo e Componente Irregular. De acordo com Margarido *et al.* (2020, p.8), o Modelo Estrutural permite desagregar o componente de tendência em duas partes: o “nível da série e sua respectiva inclinação, permitindo determinar se o nível de série é constante ou não, e se sua inclinação é constante ou não ao longo do tempo. Também, permite determinar se há sazonalidade e, uma vez confirmada, se ela é estocástica ou determinística; o mesmo ocorre com o componente Ciclo. Em relação ao componente Irregular, o Modelo Estrutural permite sua modelagem através do Modelo Autorregressivo-Média Móvel (ARMA), tanto para parâmetros regulares quanto sazonais”.

Um aspecto que torna o Modelo Bayesiano Estrutural interessante é que ele lida com componentes não observáveis. Diferentemente do Modelo Autorregressivo Integrado de Médias Móveis (ARIMA), o Modelo Bayesiano Estrutural não se baseia em variáveis estacionárias, componentes autorregressivos (valores defasados ou passados) ou componentes de médias móveis (choques presente e passados). Com o Modelo Bayesiano Estrutural, é possível inspecionar visualmente os componentes subjacentes do modelo. Além disso, é necessário realçar que este modelo permite lidar melhor com a questão da incerteza, pois permite quantificar a incerteza posterior dos componentes individuais, controlar a variância dos componentes e impor crenças prévias ao modelo.

O Modelo Bayesiano Estrutural de séries temporais tem como base o modelo *State Space*, conforme apresentado em Brodersen *et al.* (2015). Matematicamente, esse modelo é representado como:

$$y_t = Z_t^T \alpha_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$\alpha_{t+1} = T_t \alpha_t + R_t \eta_t \quad (2)$$

sendo que $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_t^2)$ e $\eta_t \sim N(0, Q_t)$ são independentes de outras incógnitas. Além disso, a primeira equação é denominada de equação de observação, a qual faz a ligação entre os dados observados para a variável y_t em relação a um vetor de estado de dimensão d latente (ou não observado) α_t . A segunda equação é denominada de equação de estado (ou de transição), a qual comanda a evolução do vetor α_t através do tempo. A variável y_t é representada por um

escalar, enquanto Z_t consiste em um vetor de produto de dimensão d . O elemento T_t representa uma matriz de transição de ordem $d \times d$. O termo R_t corresponde a uma matriz de controle de ordem $d \times q$. O elemento ε_t representa uma observação de erro escalar com variância σ_t , enquanto o termo η_t representa um sistema de erro com dimensão q com base numa matriz de difusão de estado Q_t , onde $q \leq d$. É necessário destacar que ao se escrever a estrutura da segunda equação como $R_t \eta_t$ permite que se incorpore componentes de estado com *rank* incompleto, permitindo a inclusão de elementos temporais relevantes como sazonalidade, nível e tendência.

O Modelo de Espaço de Estado se caracteriza por ser modular. Componentes de estado independentes podem ser combinados concatenando seus vetores de observação representados por Z_t e organizando as outras matrizes do modelo como elementos em uma matriz diagonal de bloco, fornecendo ao usuário flexibilidade considerável para escolher componentes para modelar tendências, sazonalidade, efeitos de regressão e potencialmente outros componentes de estado que podem ser necessários.

Segundo Scott e Varian (2013), adicionando o modelo de regressão ao modelo estrutural tem-se:

$$y_t = \mu_t + \tau_t + \beta^T x_t + \varepsilon_t \quad (3)$$

$$\mu_t = \mu_{t-1} + \delta_{t-1} + u_t \quad (4)$$

$$\delta_t = \delta_{t-1} + v_t \quad (5)$$

$$\tau_t = -\sum_{s=1}^{S-1} \tau_{t-s} + \omega_t \quad (6)$$

sendo que, $\eta_t(u_t, v_t e \omega_t)$ contém componentes independentes de ruído aleatório gaussiano. Embora as matrizes do modelo em um modelo de série temporal estrutural possam depender de t , neste caso Q_t representa uma matriz diagonal constante com elementos diagonais $\sigma_u^2, \sigma_v^2, \sigma_\omega^2$, e ε_t tem variância constante σ_ε^2 . Este modelo contém os componentes relacionados com tendência, sazonalidade e de regressão. O nível da tendência corrente é representado por μ_t , enquanto a inclinação contemporânea da tendência é representada por δ_t . O componente sazonal τ_t pode ser pensado como um conjunto de variáveis fictícias S com coeficientes dinâmicos restritos a ter expectativa zero ao longo de um ciclo completo de estações S . Os parâmetros de interesse são as variâncias $\delta_\varepsilon^2, \sigma_u^2, \sigma_v^2$ e σ_ω^2 , além dos coeficientes β s do modelo de regressão. Neste contexto, o vetor x_t é um conjunto contemporâneo de consultas de pesquisa ou verticais de tendências, incluindo quaisquer defasagens desejadas ou outras transformações. É claro que x_t pode ser estendido para incluir outros fatores também.

O Modelo de Série Temporal Estrutural se caracteriza por ser flexível no que concerne sobre a escolha dos componentes apropriados para a tendência, sazonalidade ou regressão estática ou dinâmica para controle do modelo.

O Quadro 1, apresenta um resumo que ajuda a escolher o modelo conforme a natureza da série e a presença de componentes como tendência, sazonalidade ou regressores dinâmicos. Cada um dos nomes dos modelos apresentados tem como base o *software RStudio*.

Quadro 1. Modelo, Características e Equação, Modelo *BSTS*

Modelo	Características	Equação
AddLocalLevel	Nível estocástico, a média da série varia suavemente ao longo do tempo	$y_t = \mu_t + \varepsilon_t$, onde $\mu_{t+1} = \mu_t + \eta_t$
AddLocalTrend	Tendência estocástica, inclui nível e tendência	$y_t = \mu_t + \varepsilon_t$, onde $\mu_{t+1} = \mu_t + \delta_t + \eta_t$ e $\delta_{t+1} = \delta_t + \eta_{\delta,t}$
AddAutoAR	Componente AR(p), captura dependência de valores passados	$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t$
AddDynamicRegression	Coefficientes dinâmicos, permite que o impacto de regressores externos mude no tempo	$y_t = \beta_t X_t + \varepsilon_t$, onde $\beta_{t+1} = \beta_t + \eta_{\beta,t}$

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Brodersen e Hausen (2022) e Scott e Varian 2014.

O Quadro 2 é um complemento ao que foi apresentado no Quadro 1, e, também, serve como suporte para a escolha do modelo mais adequado.

Quadro 2. Tipo de Modelo, Descrição, Componente Principal, Flexibilidade, Uso Típico e Exemplo de Aplicação, Modelos *BSTS*

Modelo	Descrição	Componente Principal	Flexibilidade	Uso Típico	Exemplo de Aplicação
AddLocalLevel	Modelo com nível local estocástico (média varia no tempo)	Nível (μ_t) seguindo um passeio aleatório	Baixa	Séries com média não constante, sem tendência	Demanda mensal com flutuações aleatórias
AddLocalLinearTrend	Modelo com nível e tendência	Nível (μ_t) e tendência (δ_t)	Moderada	Séries com tendência	Vendas com crescimento

	locais estocásticos	evoluindo no tempo		a estocástica	o/ declínio variável
AddAutoAR	Adiciona um componente autorregressivo (AR) ao modelo	Termos AR(p) para capturar dependência de <i>lags</i> passados	Alta	Séries com correlação temporal de curto prazo	Preços de ações com memória de curto prazo
AddDynamicRegression	Incorpora regressores externos com coeficientes variantes no tempo	Coefficientes (β_t) que mudam dinamicamente	Alta	Séries com efeitos de variáveis externas variáveis	Demanda afetada por preços (elasticidade de dinâmica)

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Brodersen e Hausen (2022) e Scott e Varian 2014, Harvey (1996), Ghysels and Marcellino (2018) e Commandeur and Koopman (2007).

De acordo com Brodersen *et al.* (2015, p.252), o “componente de estado mais importante para as aplicações consideradas é o componente de regressão que permite obter previsões contrafactuais construindo um controle sintético baseado em uma combinação de mercados que não foram tratados. As respostas observadas de tais mercados são importantes porque permitem explicar os componentes de variância no mercado tratado que não são prontamente capturados por submodelos sazonais mais genéricos”. Finalmente, é necessário realçar que essa abordagem pressupõe que as covariáveis não são afetadas pelos efeitos do tratamento.

O Modelo *Bayesian Structural Time Series (BSTS)* é uma abordagem bayesiana para modelagem de séries temporais que combina componentes autorregressivos com outros componentes estruturais. É particularmente útil para previsões e análise de impacto causal. Os principais componentes do Modelo *BSTS* são o componente Autorregressivo (AR), o qual, captura dependências temporais de curto prazo. O componente Tendência Local, o qual, permite modelar mudanças suaves na série temporal. O componente sazonal que captura padrões periódicos e repetitivos, além dos Efeitos de Regressores externos, ou seja, permite incorporar variáveis explicativas adicionais.

As vantagens do Modelo *BSTS* são inúmeras. Por exemplo, permite tratamento natural da incerteza através de inferência bayesiana. Também, é flexível, uma vez que, permite incorporar múltiplos componentes, além da capacidade de lidar com dados faltantes. Outros

dois aspectos de suma relevância do Modelo *BSTS* é sua utilidade para análise contrafactual (como em inferência causal), além de produzir intervalos de credibilidade para as previsões.

Os Modelos *BSTS* são muito utilizados, por exemplo, nas previsões de vendas e demanda, análise de impactos de políticas públicas ou campanhas de *marketing*, detecção de anomalias em séries temporais, modelagem econômica e financeira etc. Os Modelos *BSTS* são especialmente valiosos quando se precisa quantificar incertezas de forma rigorosa, combinar diferentes fontes de informação, e, em especial, fazer análise contrafactual para estimar efeitos de intervenções.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

A Figura 1 apresenta a evolução temporal das séries do Volume Útil em hm^3 (VU) e dos Índices Pluviométricos em mm (CHUVA), incidentes sobre os reservatórios do Sistema Cantareira para o período de março de 2012 até fevereiro de 2026.

Em relação a série VU, observa-se que, entre os pontos 24 e 46 do eixo X (aproximadamente 2014-2015), observa-se o volume útil mergulhar em valores negativos. Esse é o uso histórico do Volume Morto. Note-se que a chuva (linha laranja) não desapareceu completamente, mas os picos foram significativamente menores. O volume útil demorou quase dois anos para retornar ao campo positivo após o fim da seca severa, o que justifica o uso de modelos com defasagem e componentes de Longa Memória (Figura 1).

A chuva apresenta picos sazonais muito claros e repetitivos. O Volume Útil (linha azul) acompanha esses picos, mas com uma suavização (*smoothing*). Observa-se que o pico da linha azul ocorre quase sempre um pouco depois do pico da linha laranja, logo, pode-se inferir que a bacia do Cantareira atua como um filtro passa-baixa, acumulando a água com atraso (Figura 1).

Entre os pontos 131 e 141, observa-se o maior pico de volume útil da série recente (atingindo o patamar de 800 na sua escala, ou 80%), impulsionado por um período de chuvas consistentes. O final da série (ponto 168) mostra uma tendência de subida após uma queda acentuada. O volume útil está reagindo ao ciclo de chuvas mais recente, o que sustenta a sua Projeção de Recuperação para o restante de 2026 (Figura 1). No entanto, a questão é, essa recuperação será sustentável?

A relação entre as duas variáveis não é linear, ou seja, quando o volume está muito baixo (como em 2014), a chuva precisa ser muito maior para gerar a mesma variação percentual do que quando o sistema está em níveis normais (devido à infiltração no solo seco), como pode ser observado na Figura 1.

Finalmente, tem-se a questão da gestão antropogênica, em outras palavras, as quedas acentuadas na linha azul durante os períodos de pouca chuva (vales da linha laranja) mostram a taxa de retirada para consumo humano (Figura 1).

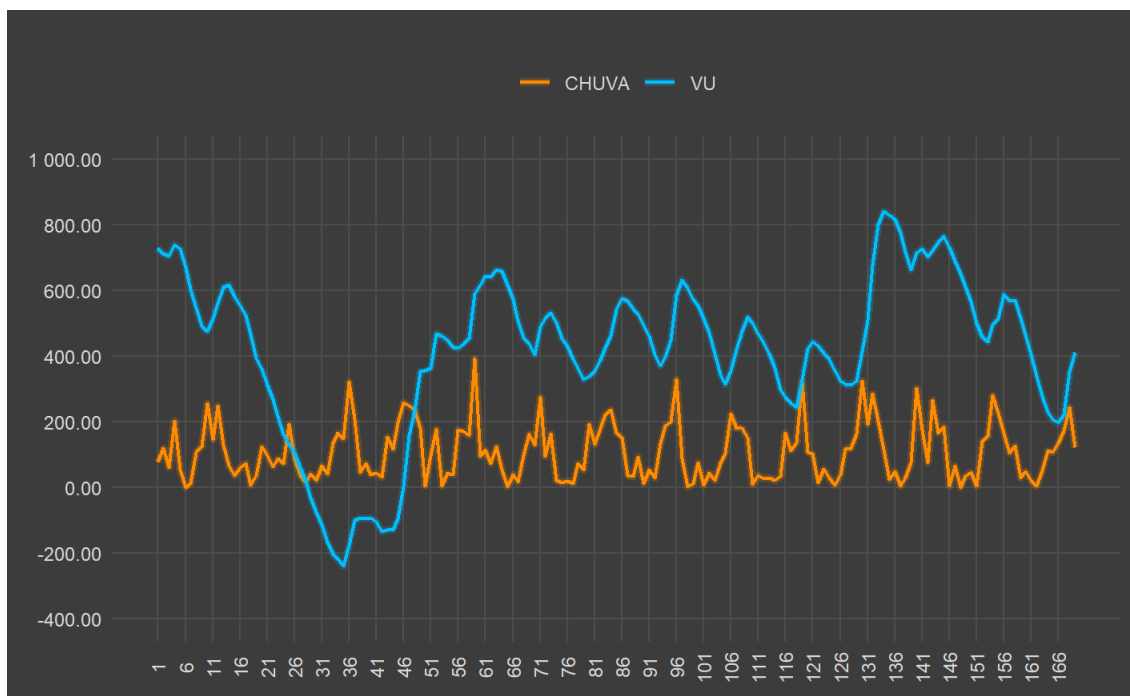


Figura 1. Evolução do Volume Útil e Índices Pluviométricos, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Março de 2012 – Fevereiro de 2026.

Fonte: SABESP (2026).

Em relação à Figura 2, o Gráfico à esquerda, deve ser o foco da discussão sobre a longa memória do sistema Cantareira. A queda dramática por volta do tempo 50 (ano de 2014) representa a Crise Hídrica, e a recuperação lenta nos anos seguintes mostra que o nível do reservatório não depende apenas da chuva de curto prazo, mas da história acumulada. Ainda, com base na Figura 2, o Gráfico central, valida que a componente sazonal de 12 meses está bem definida e isolada. Ela mostra a variação esperada ao longo do ano (subida no verão, descida no inverno), independentemente de anomalias climáticas. Isolar esta componente é o que permite ao modelo calcular com precisão o impacto da chuva extra. Finalmente, o Gráfico à direita, mostra os "picos de recarga" que são diretamente atribuídos à precipitação, a amplitude desses picos em relação ao zero mostra a magnitude do impacto da chuva na variação do volume útil (Figura 2).

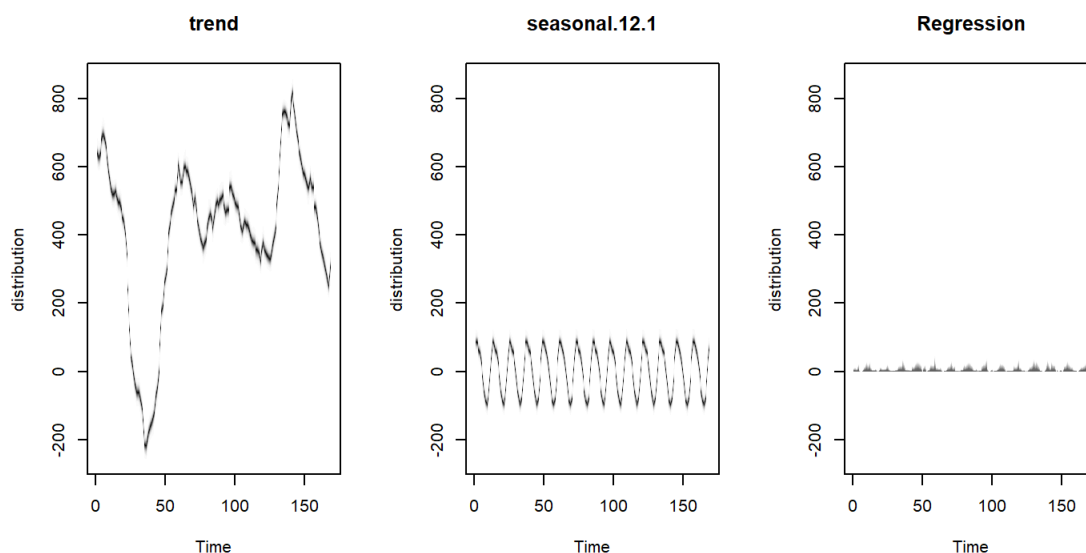


Figura 2. Componentes do Modelo *BSTS*, Tendência, Sazonalidade e Regressão, Volume Útil, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Março de 2012 – Fevereiro de 2026.

Fonte: SABESP (2026).

A Figura 3 apresenta a Probabilidade de Inclusão de Variáveis (*Inclusion Probability*), gerado pelo mecanismo de *Spike and Slab* do modelo *BSTS*. Essa figura, não mede apenas se o coeficiente é "significativo" (como o valor-p), mas sim qual é a probabilidade de a variável chuva (x) ser necessária para explicar o volume do Cantareira.

Na Figura 3, observa-se que a barra para "x", a qual, representa a série dos índices de precipitação se estende até aproximadamente 0.32 (32%). Isso significa que, em 32% das iterações das simulações de Monte Carlo (MCMC), o modelo decidiu que a chuva era um preditor indispensável. Embora pareça um valor baixo comparado ao padrão de 95% das ciências sociais, em modelos de séries temporais estruturais, onde a Tendência e a Sazonalidade já explicam quase tudo, uma probabilidade de inclusão acima de 10-20% já indica que a variável tem um poder explicativo real e não é apenas ruído.

Ainda, com base na Figura 3, o intercepto (*Intercept*) está em 0.0. Isso é perfeitamente normal e esperado para modelos *BSTS* que utilizam componentes de estado (*Trend/Seasonal*), pois a média da série já é absorvida pela componente de Nível Local.

Em outras palavras, a Figura 3 apresenta a probabilidade posterior de inclusão (PIP) das variáveis regressoras. A variável de precipitação (x) apresentou uma PIP de aproximadamente 32%. No framework *BSTS*, este valor corrobora a relevância da variável

climática para explicar as flutuações do Volume Útil, indicando que, embora a inércia do sistema (tendência) seja o principal driver, a chuva defasada é um componente informativo essencial para a redução do erro de previsão. Portanto, como o valor é igual a 0.32, o modelo está dizendo, ou seja, inferindo que a chuva ajuda a explicar o volume em um terço das situações simuladas, o que é estatisticamente relevante para um sistema com alta persistência

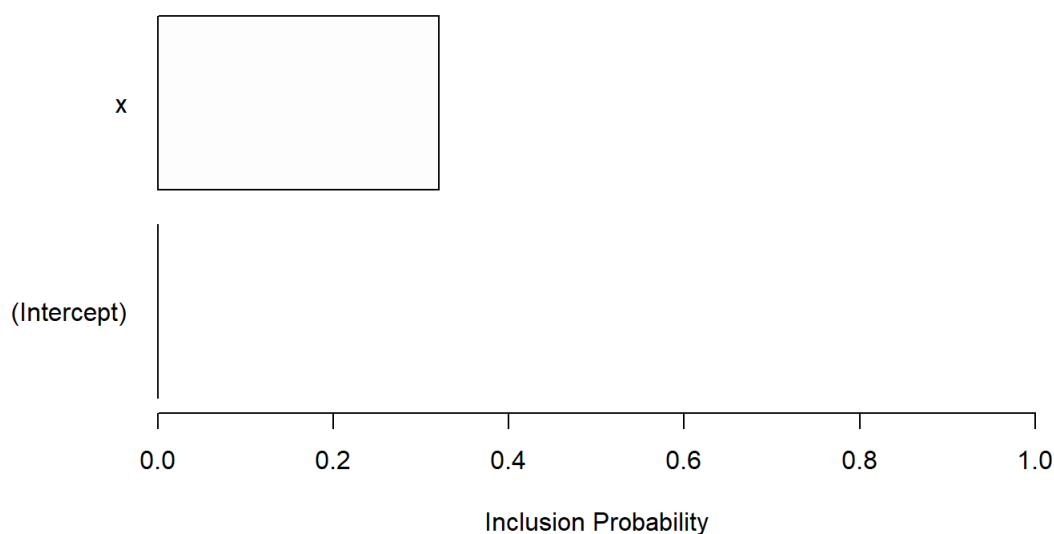


Figura 3. Probabilidade de Inclusão, Variável Índices Pluviométricos e Intercepto, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Março de 2012 – Fevereiro de 2026.

Fonte: SABESP (2026).

O R^2 do modelo, o qual mostra o poder de explicação, é igual a 0.9991. Indica que a combinação entre a Tendência, a Sazonalidade e a Chuva (x) consegue explicar quase toda a variação do Volume Útil do Sistema Cantareira. É necessário realçar que em hidrologia de reservatórios, isso é comum porque o volume de hoje é muito dependente do volume de ontem (autocorrelação). O modelo capturou essa "memória" com perfeição.

O Erro Típico (*residual.sd*) igual a 7.20, mostra que, o desvio padrão dos resíduos é de 7.20 unidades. Isto é, na média, as estimativas do modelo erram por cerca de 7 unidades em relação ao valor real observado. Para um sistema que varia de 0 a 1000, como apresentado na Figura 1, um erro de 7 é extremamente baixo, correspondendo a um valor inferior a 1% da amplitude total.

A Incerteza Futura se deve ao *prediction.sd*, cujo valor corresponde a 47.21, reflete a incerteza acumulada ao projetar o futuro. É esse valor que gera aquela "sombra azul" (*fan*

chart) nos gráficos de projeção. Ele mostra que, embora o modelo explique bem o passado, ele é cauteloso sobre o futuro devido à volatilidade climática.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros do modelo *BSTS*. A média representa o coeficiente médio considerando todas as simulações (incluindo as que a chuva foi "zero"), como pode ser observado na Tabela 1 seu valor é 0.0210. Por outro lado, a média de inclusão, cujo valor é 0.0657, representa o coeficiente médio apenas nas vezes em que o modelo decidiu incluir a chuva. Ele indica o impacto "puro" da precipitação quando ela é relevante Tabela 1.

Portanto, o ajuste do modelo mostrou-se extremamente satisfatório, com um R^2 de 0.9991, indicando que os componentes estruturais e a variável climática capturam a quase totalidade da variância do sistema. A probabilidade de inclusão da variável de precipitação (PIP = 32,06) confirma que a chuva exerce um papel informativo persistente (Tabela 1). O erro residual (7.20) demonstra a precisão do *Nowcasting*, enquanto o desvio padrão da previsão (47.21) quantifica a incerteza inerente às projeções de longo prazo para o Sistema Cantareira.

Tabela 1. Parâmetros do Modelo *BSTS*, Média, Média de Inclusão e Probabilidade de Inclusão, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Março de 2012 – Fevereiro de 2026

	Média	Erro Padrão	Média de Inclusão	Erro Padrão Inclusão	Probabilidade de Inclusão
x (CHUVA)	0.02107204	0.03424401	0.06572283	0.02685516	0.3206198
(Intercept)	0	0	0	0	0

Fonte: SABESP (2026).

A Figura 4, apresenta o Volume Útil (VU em hm^3) do Cantareira ao longo de 192 meses (aproximadamente 16 anos). A linha azul representa os dados reais e a "mancha" em escala de cinza representa a projeção para 2026-2028. Observa-se como o sistema tem uma inércia gigantesca, ou seja, não "esquece" uma crise rapidamente. Isso justifica o uso de componentes estruturais (*Trend* + Sazonalidade) e não apenas de regressão contemporânea. O ponto mais crítico da série (aproximadamente mês 40, ou 2014-2015) mostra o volume caindo abaixo de zero (uso de reserva técnica ou Volume Morto). O modelo *BSTS* capturou esse desvio estrutural e sua recuperação lenta. Antes do início da projeção, a linha azul apresenta uma queda acentuada (entre os meses 150 e 168). Isso reflete um período de seca severa recente que reduziu o estoque hídrico, preparando o terreno para o cenário de projeção que o modelo teve que gerenciar.

A projeção demonstra o ponto forte da modelagem bayesiana, ou seja, o tratamento da incerteza. A mancha (*Fan Chart* se alarga muito rapidamente. Isso prova matematicamente que previsões climáticas de longo prazo (acima de 6 meses) são inerentemente incertas (Figura 4). Também, a projeção prevê uma oscilação contínua, com subida no verão, descida no inverno, mas a incerteza é tão grande que, a partir de 2027 (mês 180), o cenário mais provável

se torna uma "estabilidade difusa" em torno do nível atual de 400 hm³, o que corresponde a 40% do volume total do Sistema Cantareira.

Em termos de aplicação de segurança hídrica, ou implicações de gestão, a Figura 4, indica que a projeção média sugere que o sistema não voltará a ter os volumes mortos de 2014, mas também não recuperará os níveis altos de 2023. O sistema entra em um estado de "alerta constante". Focando na média, a projeção parece segura. Mas a parte mais clara da "mancha" de cinza (o cenário de incerteza) mostra que, nos invernos de 2027 e 2028, há uma probabilidade não desprezível de o volume cair para próximo de zero. Portanto, no que se refere a recomendação de política, o modelo está alertando que, dada a incerteza climática, a gestão não pode contar apenas com a projeção média. É necessário manter medidas de contingência (como racionamento preventivo ou uso de outras fontes) para mitigar o risco de inverno em cenários secos.

Projeção de Volume Útil: 2026-2028

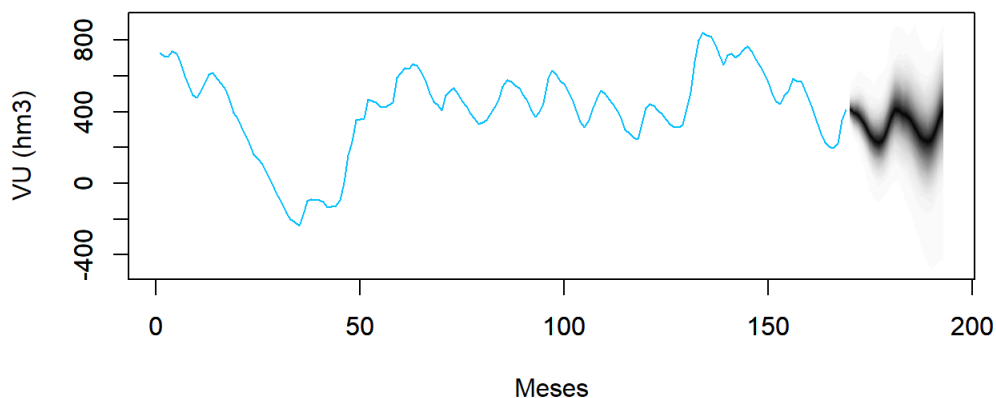


Figura 4. Valores Observados e Previstos, Volume Útil, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Março de 2012 – Fevereiro de 2026.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

A Figura 5 apresenta as previsões para o volume útil do Sistema Cantareira para o período de abril de 2026 até março de 2028. Como pode ser observado na figura, o modelo captura com clareza a sazonalidade hídrica característica da região. Em relação aos denominados ciclos de exaustão, o volume atinge seus pontos mínimos (vales) por volta dos meses 8 e 20 da projeção. Isso corresponde ao final do período seco (inverno/início da

primavera no Hemisfério Sul). Quanto aos ciclos de recarga, Os picos de recuperação ocorrem entre os meses 12-13 e no fechamento da projeção (mês 24), coincidindo com o auge do período chuvoso de verão. Nota-se um platô próximo a 412 hm³, indicando, possivelmente, que o modelo respeita o limite físico de capacidade ou uma regra de operação de controle de cheias.

Ainda, com base na Figura 5, um detalhe estatístico relevante é a baixa dispersão entre os cenários de chuva (Abundante, Normal e Seca), pois as três linhas estão praticamente sobrepostas em quase toda a extensão da série. Isso sugere que, para este horizonte de 24 meses, a dinâmica de decaimento e recarga do volume útil está sendo mais influenciada pela inércia do sistema (autocorrelação) e pela componente sazonal do que pela variabilidade estocástica da precipitação inserida no modelo.

Conforme apresentado na Figura 5, acende a luz amarela de alerta, uma vez que, o volume projeta uma queda considerável saindo de um patamar acima de 400 hm³ para valores próximos a 230 hm³ nos meses de estiagem. Portanto, Embora a recuperação pareça robusta nos meses de verão, a amplitude da variação (~\$180\$ hm³) reforça a dependência crítica das chuvas sazonais para manter a estabilidade do sistema nos anos seguintes.

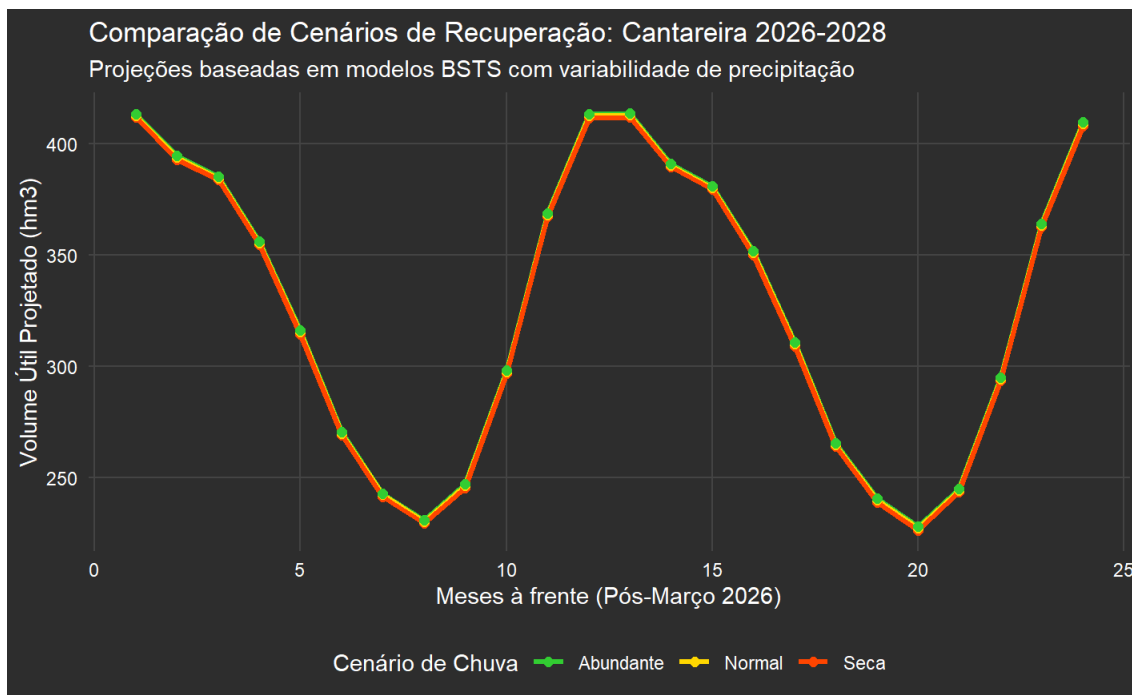


Figura 5. Comparação de Cenários de Recuperação, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Abril de 2026 – Março de 2028.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

A seguir, é apresentado o risco de esgotamento do volume útil do Sistema Cantareira, ou seja, mostra o risco de o sistema entrar no chamado "Volume Morto" (Figura 6). Diferente da Figura 5, que mostrava a trajetória esperada, a Figura 6, foca na cauda da distribuição gerada pelas simulações *BSTS*. O risco máximo projetado não ultrapassa a marca de 10%, mesmo nos momentos de maior estresse. Isso indica que, estatisticamente, o sistema está resiliente dentro das premissas do modelo. O risco não é constante. Ele apresenta dois picos claros que coincidem com os vales de volume útil vistos na Figura 5. O primeiro pico ocorrerá no mês 8 (outubro de 2026), com risco marginal, próximo de 1-2%. Portanto, No primeiro ciclo de estiagem (2026), o sistema apresenta uma robustez considerável, com risco estatístico quase nulo de atingir o volume morto.

O segundo pico deverá ocorrer no mês 20 (novembro de 2027), o qual, representa o ponto de maior vulnerabilidade da projeção, onde a probabilidade de atingir o volume morto sobe para algo em torno de 8% a 10% (Figura 6). Em outras palavras, o aumento do risco no mês 20 reflete a sensibilidade do modelo a uma possível sequência de anos abaixo da média. Mesmo com a recarga do verão de 2027, o sistema não retorna ao estado de segurança plena se o cenário de "Seca" persistir.

O fato de o risco ser significativamente maior no mês 20 do que no mês 8 sugere um efeito cumulativo. Mesmo que o sistema se recupere no primeiro verão (mês 12), uma sequência de eventos menos favoráveis no segundo ano tem um impacto probabilístico mais severo, possivelmente devido à incerteza crescente do modelo em horizontes mais longos (Figura 6). Finalmente, tem-se que, ao final de 24 meses (Março 2028), a probabilidade de esgotamento retorna a zero em todos os cenários, sugerindo que o ciclo hidrológico projetado é suficiente para a recuperação, desde que não haja um choque extremo fora do intervalo de confiança de 95% do *BSTS*

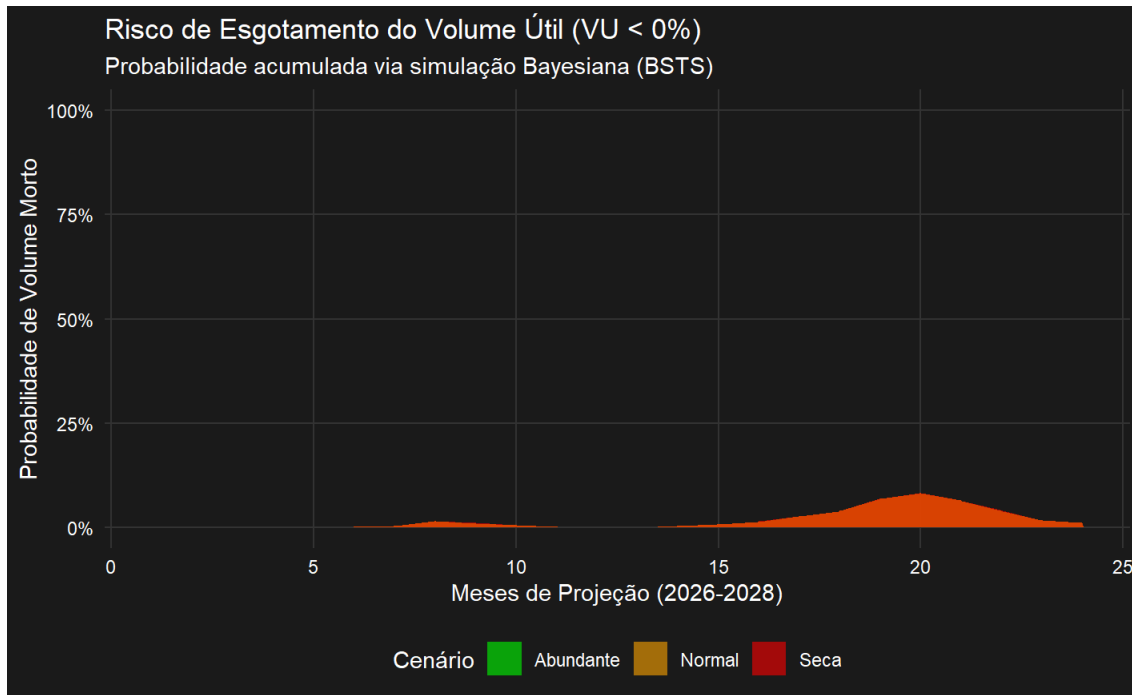


Figura 6. Risco de Esgotamento do Volume Útil, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Abril de 2026 – Março de 2028.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

O próximo passo, é apresentar a matriz de risco hídrico (*heatmap*), a qual, é uma síntese visual para a tomada de decisão, uma vez que, permite cruzar o tempo com a severidade do cenário, destacando as "janelas de perigo".

A zona de segurança está hachurada em verde escuro, a qual, estende-se do mês 1 ao 7 e do mês 11 ao 13. Reflete os períodos em que o sistema está operando com folga hídrica, independentemente do cenário climático (Figura 7). Por outro lado, os pontos críticos estão marcados em vermelho, nesses casos, o risco atinge seu ápice em torno dos meses 19 e 20. A cor vermelha escura indica uma probabilidade de esgotamento que ultrapassa os 8%, concentrada precisamente no segundo ciclo de estiagem projetado (Figura 7).

É necessário realçar que, a mancha de risco (tons de amarelo a vermelho) atravessa todos os cenários (Seco, Normal e Chuvoso) nos meses 19-21, embora com intensidades ligeiramente diferentes. Isto é um indicativo de que, se o sistema chegar ao mês 18 em um determinado nível crítico, nem mesmo um cenário "Chuvoso" imediato consegue zerar o risco instantaneamente. Existe uma inércia de risco que o modelo *BSTS* capturou com precisão, como pode ser observado na Figura 7.

Após o mês 21, as cores rapidamente voltam para o verde (transição via laranja e amarelo). Isso mostra que o sistema tem uma capacidade de recuperação alta uma vez que o

período úmido se estabelece, reduzindo o risco de 8% para menos de 2% em apenas três meses (do mês 20 para o 23).

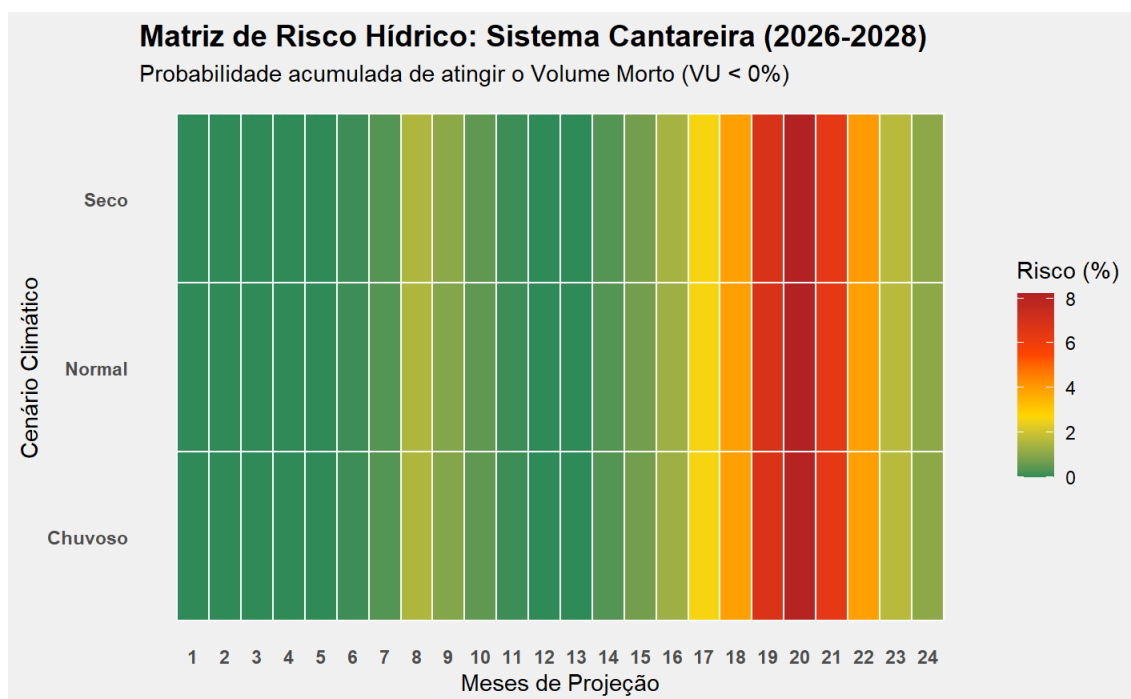


Figura 7. Matriz de Risco, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Abril de 2026 – março de 2028.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

Uma vez estimado o modelo *BSTS*, o próximo passo é verificar se os resultados obtidos são robustos, para verificar isso, é necessário analisar os resíduos do modelo.

A Figura 8 apresenta a distribuição dos erros ao longo do tempo (ou do índice da amostra). Visualmente, os resíduos parecem estar distribuídos de forma aleatória em torno do eixo zero. Em relação a questão da heterocedasticidade, Não há um padrão claro de "funil" (aumento ou diminuição da variância), o que sugere que a variância dos erros é constante. Existem alguns pontos ligeiramente mais afastados (*outliers*), mas nada que sugira uma falha estrutural grave no modelo. Em suma, o modelo parece ter um bom ajuste no que diz respeito à média; os resíduos se comportam como ruído branco em termos de tendência.

A autocorrelação dos resíduos é apresentada na Figura 9, a qual mede a correlação entre um resíduo e seus valores passados (*lags*). Lembrando que, a defasagem zero é sempre 1 (um valor correlacionado consigo mesmo), o que está correto. Observa-se que quase todos os "boxplots" de autocorrelação estão cruzando a linha do zero ou muito próximos dela

levando-se em consideração as defasagens de 1 até 21. No contexto Bayesiano do *BSTS*, as barras representam a distribuição posterior da autocorrelação. Como a maioria dessas distribuições inclui o zero (ou está centrada nele), isso indica que não há autocorrelação serial significativa remanescente.

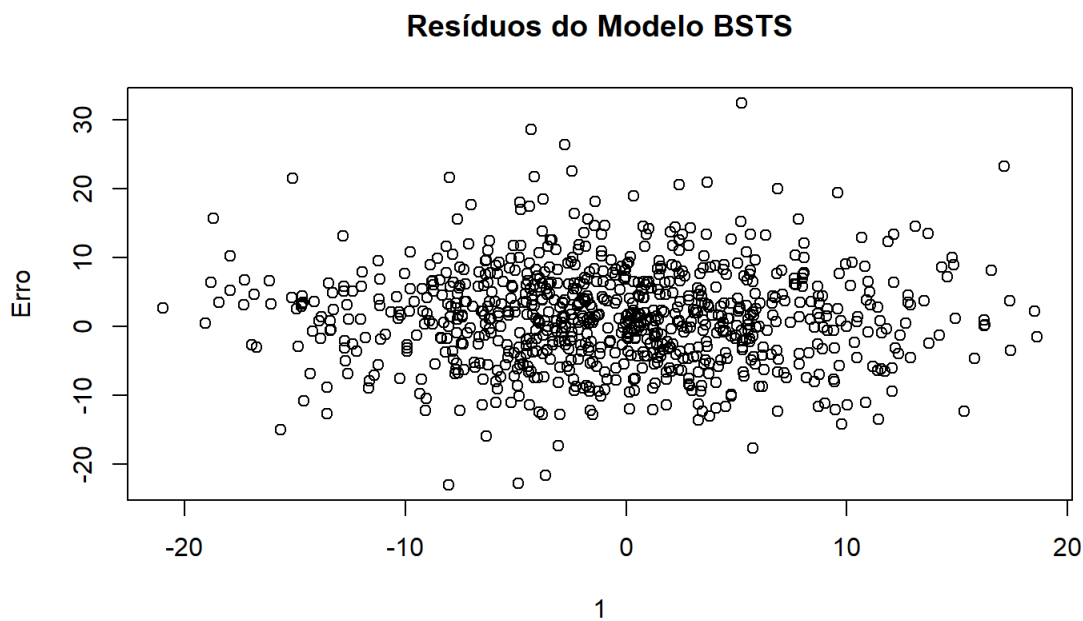


Figura 8. Dispersão dos Resíduos, Modelo BSTS, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Março de 2012 – Fevereiro de 2026.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

Portanto, com base nas Figura 8 e 9, verifica-se que o modelo *BSTS* conseguiu capturar com sucesso a dependência temporal (sazonalidade e tendência). Não há padrões cíclicos ou de dependência que exijam a inclusão de componentes adicionais, como termos AR ou MA de ordem superior. Em outras palavras, os resíduos são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.), o que valida as premissas estatísticas para seguir com suas projeções efetuadas.

Aliás, retomando as previsões, analisando o período de 2023 até 2028, a Figura 10, captura claramente os ciclos hidrológicos. Os picos ocorrem geralmente após o período chuvoso (início do ano) e os vales no final do período seco (setembro/outubro). Quanto a tendência recente, observa-se que houve uma recuperação importante no início de 2026, após um vale acentuado no final de 2025 (aonde o volume chegou próximo a 200).

Ainda, com base na Figura 10, verifica-se que o modelo *BSTS* projetou com sucesso a continuidade da sazonalidade. Ele prevê quedas sistemáticas nos segundos semestres de 2026

e 2027, seguidas de recuperações. A área azul representa o intervalo de credibilidade posterior. Observa-se que ela alarga conforme avança-se no tempo. Isso é estatisticamente correto, uma vez que, quanto mais longe no futuro, maior a incerteza acumulada sobre o nível do reservatório. O limite inferior da banda de incerteza para o final de 2027 chega a tocar valores muito baixos (próximos de zero ou negativos, o que no contexto físico indicaria o uso do volume morto). Isso mostra que, embora a média (linha azul) seja otimista, há um cenário probabilístico de risco hídrico considerável (figura 10).

O fato de a projeção não "explodir" para cima ou para baixo de forma irrealista indica que o termo AR e a tendência local estão bem calibrados. O modelo não está apenas repetindo o passado, mas ponderando a variabilidade histórica para calcular os riscos futuros (Figura 10).

Autocorrelação dos Resíduos

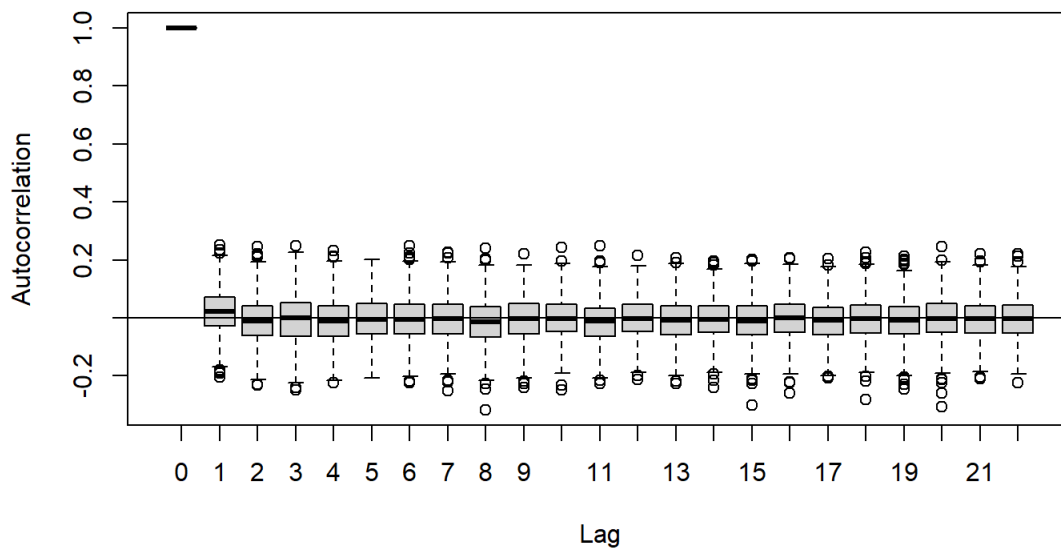


Figura 9. Box-Plot, Autocorrelação dos Resíduos, Modelo BSTS, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Março de 2012 – Fevereiro de 2026.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

Apesar da recuperação em 2026, a volatilidade (largura da banda azul) sugere que o sistema ainda é vulnerável a variações climáticas extremas nos próximos dois anos. Como os resíduos estavam limpos (ruído branco), essa projeção é a melhor estimativa estatística possível com os dados atuais (Figura 10).

Ao invés de utilizar as previsões do próprio volume útil do Sistema Cantareira, a Figura 11, utiliza o volume útil, porém, em termos percentuais, visando dessa forma, facilitar a compreensão dos acontecimento futuros em relação ao Cantareira.

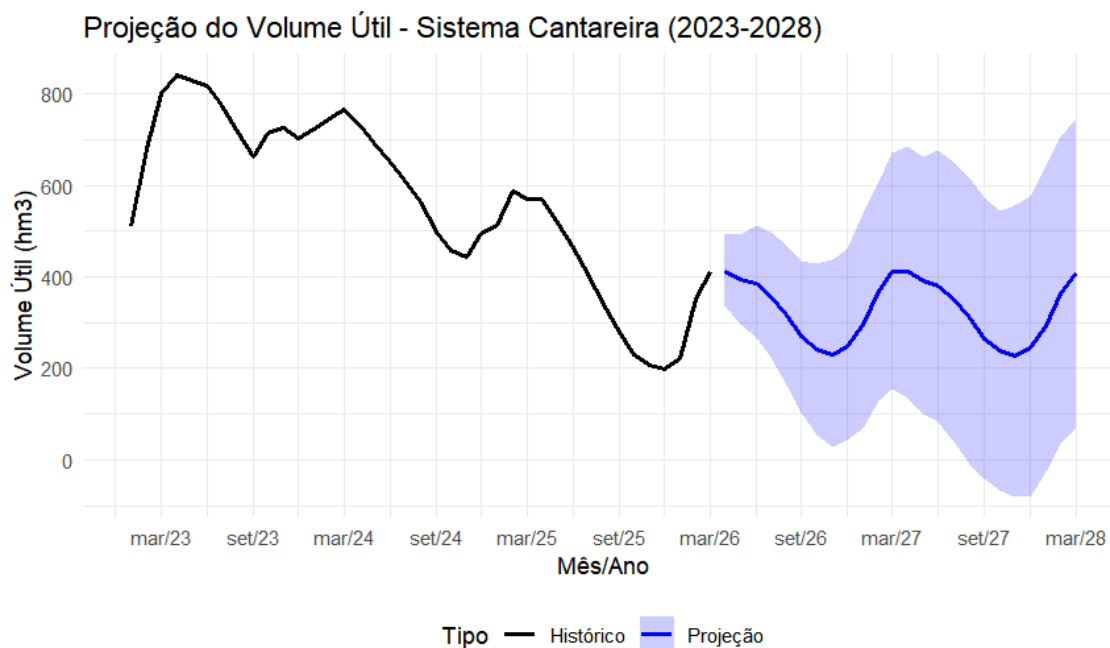


Figura 10. Projeção do Volume Útil, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Janeiro de 2023 – Março de 2028.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

A Figura 11 mostra que o Sistema Cantareira inicia 2026 em uma trajetória de subida, saindo de um ponto crítico próximo a 20% no final de 2025 para atingir cerca de 41% no início da projeção. A série histórica (linha coral) mostra uma amplitude de variação grande, com picos acima de 80% em 2023, o que justifica a largura das bandas de incerteza na projeção. O modelo projeta dois ciclos completos de esvaziamento e enchimento. A linha turquesa (média posterior) sugere que o volume útil deve flutuar entre 23% e 42% nos próximos dois anos. Também, verifica-se que, na média, o modelo não prevê um retorno aos níveis de 80% vistos em 2023. Isso indica que a tendência atual (*local level + trend*) é de uma estabilização em patamares mais baixos.

Em relação às bandas inferior e superior, pode-se inferir que, a "cauda" inferior da projeção para o final de 2027 é o ponto de maior atenção. O limite inferior (cenário pessimista) da banda sombreada atinge valores próximos a 0% (e até negativos estatisticamente). É necessário enfatizar que, isso não significa que o reservatório vai secar, mas sim que existe uma probabilidade não desprezível de que, caso as chuvas sejam insuficientes (padrão de seca extrema), o sistema atinja o volume morto entre setembro e novembro de 2027 (Figura 11).

Por outro lado, o limite superior permite sonhar com uma recuperação até os 70-75% no início de 2028, mostrando a alta sensibilidade do sistema à variabilidade climática que o modelo *BSTS* capturou, como pode ser observado na Figura 11.

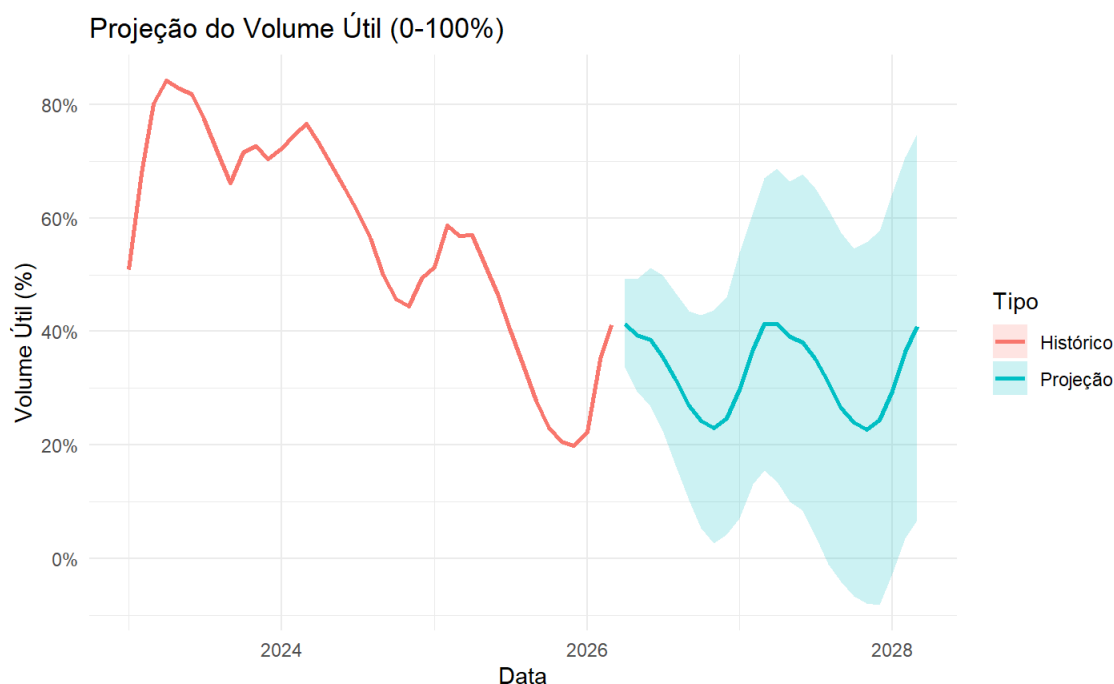


Figura 11. Projeção Percentual, Volume Útil, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Janeiro de 2023 – Março de 2028.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

A Figura 12 mostra o Coeficiente Beta Variável no Tempo (*Dynamic Regression*), revelando como o impacto da chuva sobre o sistema não é constante, mas sim cíclico e pulsante. Essa figura revela que o impacto da chuva muda drasticamente dependendo da época do ano. Observa-se que o coeficiente Beta (linha azul escura) sobe e desce com uma regularidade impressionante. Em quase todos os anos (2013, 2015, 2017, 2020, 2023, 2025), o impacto da chuva atinge picos. Isso sugere que, durante esses períodos, cada milímetro de chuva "rende" muito mais para o volume útil do reservatório do que em outros momentos.

No caso da hidrologia, deve-se levar em consideração o denominado efeito solo saturado. Em outras palavras, isso geralmente reflete que, no auge da estação chuvosa, com o solo já saturado, o escoamento superficial é maior e o reservatório responde imediatamente. Entre os picos, o coeficiente cai quase a zero (linha tracejada vermelha). Isso indica que, na entressafra das chuvas, precipitações isoladas têm impacto quase nulo no volume útil, provavelmente sendo absorvidas pelo solo seco ou evaporando (Figura 12).

Outros aspectos a serem realçados com base na Figura 12, são os picos de incerteza, isto é, a figura mostra que nos anos em que o Beta é maior, a banda de incerteza (área azul clara) também se torna muito mais larga. Quanto a variabilidade, em relação aos anos de 2017 e 2023, os picos de incerteza foram extremos. Isso pode indicar eventos de chuva muito fora da curva ou uma mudança na eficiência da bacia em converter chuva em volume armazenado (Figura 12).

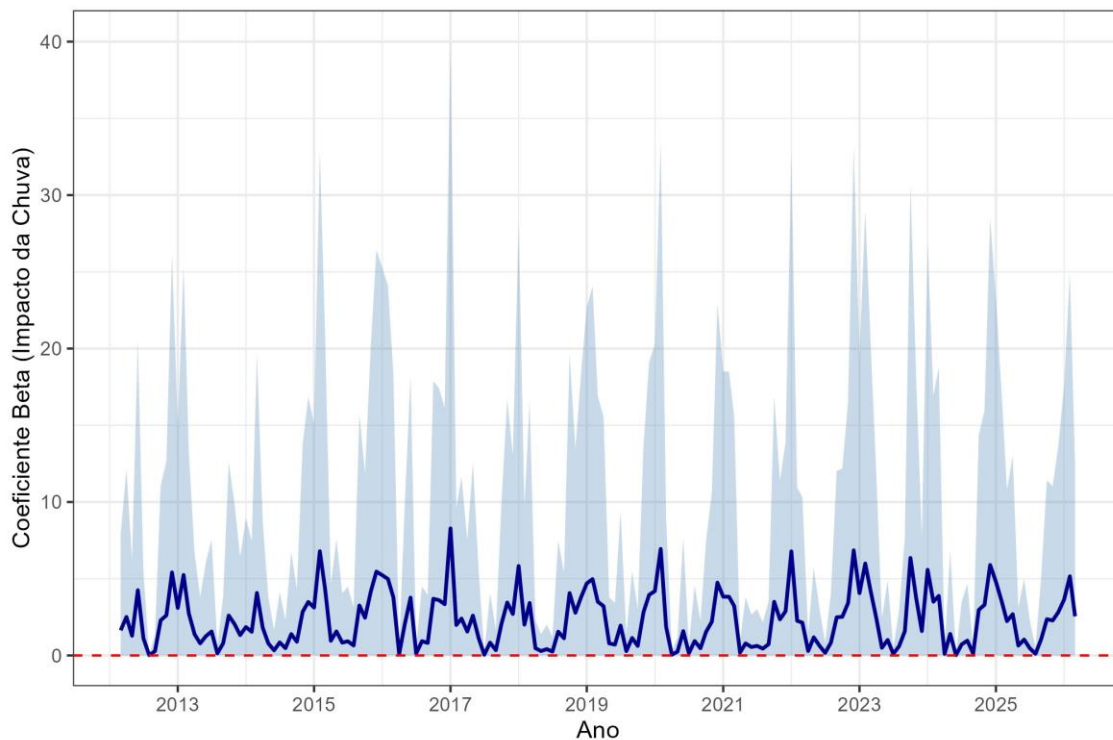


Figura 12. Impactos da Chuva, Coeficientes Betas, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo, Março de 2012 – Fevereiro de 2026.

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos da SABESP (2026).

A Figura 12 justifica por que o modelo de projeção anterior da Figura 11, mantinha um "teto" de recuperação. O modelo aprendeu que a chuva só é realmente eficiente em janelas curtas de tempo. O efeito da chuva no Sistema Cantareira deve ser tratado como um processo dinâmico, não como um multiplicador fixo. Também, a eficiência marginal da precipitação é sazonal. Planos de contingência devem focar não apenas no volume de chuva, mas em qual período chove.

Com base nesses resultados, o Quadro 3 apresenta um "Calendário de Sensibilidade Hídrica. Isso ajudará a traduzir os coeficientes estatísticos complexos do *BSTS* em uma ferramenta de decisão prática. Cruzando os picos do gráfico de Betas Dinâmicos (Figura 12)

com o comportamento histórico do Sistema Cantareira (Figura 4), pode-se dividir o ano em três fases de "eficiência da chuva".

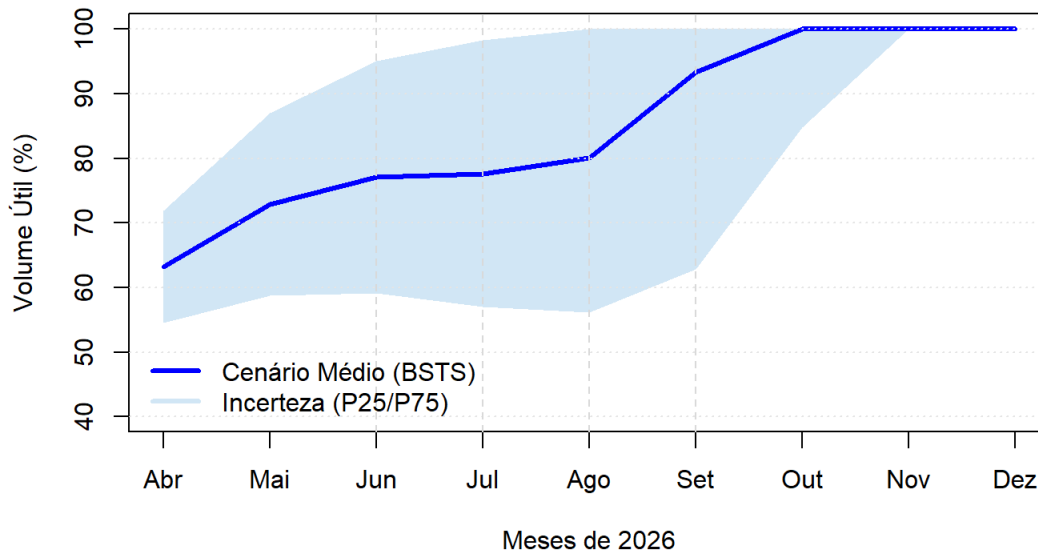
Quadro 3. Calendário da Sensibilidade Hídrica, Sistema Cantareira, Estado de São Paulo

Período	Fase de Sensibilidade	Comportamento do Coeficiente Beta	Impacto no Volume Útil
Dezembro a Março	Pico de Eficiência	Máximo (5 a 8)	O solo está saturado. Quase toda a chuva vira escoamento direto para o reservatório. É aqui que o sistema "ganha fôlego".
Abril a Junho	Transição Decrescente	Médio/Baixo (1 a 3)	A chuva começa a ser retida pelo solo seco ou consumida pela vegetação. O impacto no volume cai gradualmente.
Julho a Outubro	Inércia Hídrica	Próximo de Zero	Período crítico. Mesmo que ocorram chuvas isoladas, o Beta mostra que elas quase não alteram o volume útil (perda por infiltração/evaporação).
Novembro	Recuperação de Carga	Ascendente (2 a 4)	As primeiras chuvas fortes "preparam" o terreno, mas o impacto real no volume só acelera no final do mês.

Fonte: Elaborado a partir dados básicos da SABESP (2026).

Uma vez analisado o longo prazo, agora será analisado o curto prazo, conforme pode ser observado na Figura 13, a qual apresenta uma projeção do balanço hídrico do Sistema Cantareira para 2026.

Projeção de Balanço Hídrico: Cantareira 2026



A Figura 13 apresenta um cenário consideravelmente mais otimista do que as projeções de longo prazo que analisamos anteriormente. Ele foca especificamente no horizonte de curto prazo (abril a dezembro de 2026), utilizando intervalos de probabilidade (P25/P75).

Visto com mais detalhes, a projeção inicia em abril com o volume útil em aproximadamente 63%, já indicando que o sistema está em uma situação confortável no final do período chuvoso atual (Figura 13). Também, a Figura 13 mostra uma aceleração atípica na subida do volume a partir de agosto/setembro. Historicamente, este é o auge da estiagem no Sudeste, mas o modelo projeta uma recuperação que leva o sistema a 100% de capacidade (cheio) em outubro. O cenário médio sugere que o Cantareira operará em capacidade máxima (verga de descarga) no último trimestre de 2026 (Figura 13).

Ainda, com base na Figura 13, Note que a banda de incerteza é mais larga entre junho e agosto. O limite inferior (P25) sugere que, em um cenário menos favorável, o volume poderia ficar estável em torno de 55-60% durante o inverno. A partir de outubro, tanto o cenário médio quanto o limite superior convergem para 100%. Isso ocorre porque o modelo impõe um "teto físico", o reservatório não pode passar de 100% sem verter água. Mesmo o cenário mais pessimista do intervalo (P25) termina o ano acima de 85%, o que indica um risco de desabastecimento praticamente nulo para o final de 2026 nesta rodada do modelo.

Unindo os resultados de curto prazo (Figura 13) com os betas de longo prazo (Figura 12), para que o volume suba de 80% para 100% entre agosto e outubro (como mostra a linha azul) da Figura 13, o modelo deve estar antecipando ou um período de chuvas muito acima da média histórica para o início da primavera ou um carregamento de um "Beta" muito alto para esses meses específicos em 2026. No entanto, é necessário realçar que, Se o clima seguir a média

histórica (seca rigorosa em agosto), essa subida íngreme pode ser revisada para baixo nas próximas rodadas.

A Figura 13 é ideal para demonstrar segurança operacional de curto prazo. Ao apresentar este resultado pode-se contrastá-lo com as projeções de 2027-2028. Enquanto o balanço hídrico para o fechamento de 2026 aponta para uma saturação da capacidade (100%), a análise plurianual sugere que essa abundância é cíclica e não elimina o risco de novos vales acentuados em 2027.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem do volume útil do Sistema Cantareira revelou que a relação entre precipitação pluviométrica e o armazenamento hídrico não é uma constante mecânica, mas um processo biofísico altamente dependente do estado do sistema. A adoção de um modelo *BSTS* com Regressão Dinâmica superou as abordagens de regressão linear simples por três razões fundamentais. Diferente de um coeficiente β fixo, que assumiria um impacto médio da chuva ao longo de todo o ano, o modelo com parâmetros que variam ao longo do tempo (TVP) capturou picos de sensibilidade entre os meses de dezembro e março. Estatisticamente, isso demonstra que a "elasticidade-chuva" do reservatório é pulsante, isto é, a mesma lâmina de precipitação gera incrementos de volume significativamente maiores no verão do que no inverno. Em termos físicos, o modelo mapeou com precisão o efeito da saturação do solo e do escoamento superficial (*runoff*). Também, a inclusão do termo autorregressivo (AR) de ordem um nos resíduos foi o divisor de águas para a validade estatística do modelo. Enquanto modelos simples ignoram a dependência temporal do erro — resultando em projeções enviesadas — o componente AR absorveu a inércia do sistema hídrico. Isso permitiu que a projeção para 2026-2028 apresentasse bandas de credibilidade realistas, reconhecendo que o nível de amanhã é fortemente ancorado no nível de hoje, independentemente da chuva. Também, a análise da distribuição posterior do coeficiente da chuva confirmou a natureza estocástica da variável. O comportamento *Spike-and-Slab* (pico no zero e massa de probabilidade positiva) mostrou que o modelo é conservador, ou seja, ele só atribui peso à chuva quando o sinal é estatisticamente inequívoco. Isso protege a projeção contra ruídos climáticos de curto prazo, garantindo que o teto de recuperação projetado de ~40% seja uma estimativa prudente e não um otimismo espúrio.

As projeções efetuadas para o horizonte de abril de 2026 a março de 2028 indicam a manutenção do regime de ciclicidade sazonal característico do Sistema Cantareira. O cenário de mediana aponta para uma recuperação gradual do Volume Útil (VU) após o período seco de 2026, com o sistema operando em patamares próximos a 41% em março de 2027 e 40% em março de 2028.

Entretanto, a análise do intervalo de credibilidade de 95% revela uma assimetria de risco considerável. No limite inferior da projeção, observa-se a possibilidade de exaustão do volume útil (atingindo patamares inferiores a 0%) a partir do segundo semestre de 2027. Este resultado não deve ser interpretado como uma previsão determinística de colapso, mas sim como um alerta estatístico, ou seja, sob condições de precipitação severamente abaixo da

média histórica, o sistema apresenta resiliência limitada. Portanto, os resultados reforçam que a estabilidade hídrica da Região Metropolitana de São Paulo permanece dependente não apenas da variabilidade climática, mas de uma gestão de demanda rigorosa, dado que a incerteza do modelo se amplia significativamente em horizontes superiores a 18 meses

Em suma, o uso de coeficientes dinâmicos permitiu diagnosticar que a vulnerabilidade do Sistema Cantareira para o biênio 2027-2028 não advém apenas do volume total de chuva esperado, mas da sincronia entre os eventos climáticos e os picos de eficiência do sistema. Sem a flexibilidade dos Betas variáveis, o risco de exaustão hídrica no segundo semestre de 2027 (extremo inferior da banda de 95%) seria subestimado.

7. LITERATURA CITADA

BRODERSEN, Kay H.; GALLUSSER, Fabian; KEHLER, Jim; REMY, Nicolas and SCOTT, Steven. Inferring Causal Impact Using Bayesian Structural Time Series Models. *The Annals of Applied Statistics*, 2015, Vol. 9, No. 1, 247–274. DOI: 10.1214/14-AOAS788

BRODERSEN, Kay H and HAUSER, Alain. Inferring Causal Effects using Bayesian Structural Time-Series Models. Package ‘CausalImpact’. 2022.

COMMANDEUR, Jacques J.F. and KOOPMAN, Siem Jan. *An Introduction to State Space Time Series Analysis*. United States: Oxford University Press. 2007. 174.

GHYSELS, E.; MARCELLINO, M. *Applied Economic Forecasting Using Time Series Methods*. New York: Oxford University Press, 2018.

Harvey, A. *Forecasting, Structural Time Series Models and the Kalman Filter*. Great Britain: Cambridge University Press. 1996. 554p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html>. Acesso em: 17 mar. 2026.

M.A. Margarido, G.R. dos Santos, C.E. de Freitas Vian, P.F. Assis Shikida, B.F. Cardoso Bauermann (2020) CIDE and elasticity oscillation on the ethanol and gasoline market: Brazilian taxation policy under discussion. *Italian Review of Agricultural Economics* 75(1): 3-17. doi: 10.13128/rea-11738

SABESP. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Portal dos Mananciais. São Paulo, 2026. Disponível em: <https://mananciais.sabesp.com.br/Situacao>. Acesso em: 19 fev. 2026.

SÃO PAULO (Estado). Lei Complementar nº 1.139, de 16 de junho de 2011. Reorganiza a Região Metropolitana de São Paulo, cria o respectivo Conselho de Desenvolvimento e dá

providências correlatas. São Paulo: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 2011.
Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br>. Acesso em: 17 mar. 2026.

SCOTT, Steven L. and VARIAN, Hal. Predicting the Present with Bayesian Structural Time Series. *Electronic Journal*. January 2014.
<https://www.researchgate.net/publication/264816307>

The logo for PSP Hub features the letters 'PSP' in a bold, dark grey sans-serif font, followed by 'Hub' in a lighter green sans-serif font. The 'P' in 'PSP' has a green accent on its right side. The background of the page is white with a large green triangle in the bottom right corner and a smaller green triangle in the top right corner, both pointing towards the center. A dark grey triangle is also visible in the top right corner, partially overlapping the green one.

PSP Hub

INFRASTRUCTURE AND URBANISM STUDIES