



2025

ANÁLISE DE PERFIS DE CONSUMO DE ÁGUA POR TELEMEDAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO DE UNIDADES COM RESERVATÓRIOS INDEPENDENTES DE PRESSÃO

Gabriel Coelho Pinto ^a; Peter Batista Cheung ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, gabriel.c.pinto@ufms.br

^b Professor Orientador, Pós-Doutor, peter.cheung@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº / Bairro Universitário / 79070-900 / Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi identificar padrões de consumo que revelem a presença de reservatórios utilizando telemetria e análise de correlação de séries temporais. Para tal, desenvolveu-se uma metodologia em linguagem R para processar grandes volumes de dados horários de consumo e dados instantâneos de pressão, que foram sincronizados após um robusto pré-processamento para garantir a qualidade temporal e espacial. A análise estatística baseou-se no cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) individualmente para cada unidade consumidora, sob a premissa de que a infraestrutura de reservação atua como um elemento desacoplador hidráulico. Correlações positivas fortes ($r>0.55$) indicaram Abastecimento Direto, enquanto correlações fracas ou nulas ($r<0.30$) indicaram Desacoplamento Hidráulico (Cisternas).

A aplicação da metodologia em uma amostra de 24 unidades consumidoras revelou uma notável dicotomia, com 92% da amostra apresentando desacoplamento hidráulico (reservatórios), em contraste com apenas 8% que demonstrou dependência direta da pressão. Os resultados validam a eficácia do Coeficiente de Correlação de Pearson como uma ferramenta eficaz para segmentar o perfil de consumo. Esta predominância de demanda inelástica à pressão aponta para uma oportunidade significativa de gestão de perdas, permitindo à concessionária implementar estratégias de gerenciamento de pressão para reduzir a carga hidráulica média da rede e os vazamentos reais sem comprometer o volume fornecido aos clientes. A principal limitação do método reside na sua alta sensibilidade à qualidade e consistência dos dados de entrada.

Palavras-chave: padrões de consumo de água, telemedição, gestão de demanda.

ABSTRACT

The objective of this work was to identify consumption patterns that reveal the presence of reservoirs using telemetry and time series correlation analysis. To this end, a methodology was developed in the R language to process large volumes of hourly consumption and instantaneous pressure data, which were synchronized following a robust pre-processing stage to ensure temporal and spatial quality. The statistical analysis was based on calculating the Pearson Correlation Coefficient (r) individually for each consumer unit, under the premise that the storage infrastructure acts as a hydraulic decoupling element. Strong positive correlations ($r>0.55$) indicated Direct Supply, while weak or null correlations ($r<0.30$) indicated Hydraulic Decoupling (Cisterns).

The application of the methodology to a sample of 24 consumer units revealed a notable dichotomy, with 92% of the sample showing hydraulic decoupling (reservoirs), contrasting with only 8% that demonstrated direct pressure dependency. The results validate the effectiveness of the Pearson Correlation Coefficient as an efficient tool for segmenting the consumption profile. This predominance of demand inelastic to pressure points to a significant opportunity for loss management, allowing the utility to implement pressure management strategies to reduce the network's average hydraulic load and real leakages without compromising the volume supplied to customers. The main limitation of the method lies in its high sensitivity to the quality and consistency of input data.

Keywords: water consumption patterns, telemeasurement, demand management.

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento da demanda de água é uma estratégia vital para a sustentabilidade dos sistemas urbanos, sendo a demanda residencial o maior componente do uso municipal de água. Estudos prévios sobre o uso residencial de água têm sido cruciais para o aprimoramento do projeto de sistemas de distribuição, previsão de demanda e avaliação de políticas de conservação.

O progresso tecnológico tem viabilizado a coleta de dados de consumo com grande precisão, por meio de sistemas de medição remota (ou *smart metering*). Essa riqueza de detalhes é essencial para criar modelos que simulem com exatidão o comportamento do fluxo hidráulico e que auxiliem na tomada de decisões. Os dados instantâneos de consumo, quando devidamente analisados, aprimoram a gestão de contas e clientes, além de refinar a estimativa de perdas físicas e não físicas.

Um fator que dificulta a análise da demanda e a operação da rede de distribuição de água é a presença de tanques de armazenamento prediais, especialmente em edifícios mais altos, onde são usados para garantir a pressão necessária para os diferentes andares. Esses tanques, frequentemente acoplados a bombas, criam um ponto de consumo que se torna, em parte, independente da pressão direta da rede pública.

O objetivo deste trabalho é identificar padrões de consumo de água que revelem a presença de reservatórios, utilizando telemetria e análise de agrupamento de séries temporais em ambiente de programação, com foco na avaliação da correlação entre o perfil de consumo e a variação da pressão da rede.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Variabilidade e Caracterização do Consumo Residencial

O consumo de água residencial é influenciado por múltiplos fatores, incluindo características socioeconômicas (como renda e número de ocupantes), o tipo de dia (útil ou final de semana), clima e a eficiência dos aparelhos. O uso residencial exibe um padrão cíclico diário (dia, noite, e períodos de transição) e variações sazonais.

Estudos detalhados de uso final da água mostram que a maior parte do consumo interno ocorre no banheiro. Por exemplo, segundo Oneda e Kalbusch (2018) em uma residência em Joinville-SC, os chuveiros

representaram 49% do consumo semanal, seguidos pela pia da cozinha (16%), outras torneiras (15%), e bacias sanitárias e máquina de lavar roupas (10% cada).

O perfil diário de consumo de água é o indicador principal do processo de consumo. A análise desses padrões, realizada por Mello et al. (2017), revelou que os perfis de dias de semana geralmente apresentam similaridade na distribuição das vazões, com picos mínimos na madrugada e vazão elevada entre 6h e 18h. Os perfis de finais de semana também mostram baixo consumo na madrugada, mas com consumos elevados ao longo do dia

2.2 Telemedição e identificação dos padrões

A telemedição de dados de consumo oferece às empresas de saneamento informações em tempo real, otimizando a compreensão das demandas dos consumidores e a administração eficiente de suas redes de distribuição.

Uma vez que todos os dados necessários são obtidos pode-se usar de recursos conhecidos para determinar padrões, alguns dos mais conhecidos são técnicas de agrupamento (clustering), algoritmos não-hierárquicos como o K-means. Para a comparação de séries temporais o DTW, Dynamic Time Warping é amplamente adotado pois permite reconhecimento de formas similares. Outra técnica analítica muito usada é o PCA, método dos componentes principais, esse ajuda a determinar as componentes dominantes do consumo.

2.3 O Impacto dos Reservatórios no Padrão de Fluxo

A presença de caixas d'água nos prédios muda bastante o fluxo diário nas tubulações de água. Mazaheri et al. (2025) mostram que, embora a demanda máxima dependa do número de pessoas, os reservatórios nos edifícios transformam os números de fluxo, algo que só agora está sendo bem avaliado. Analisar esses dados, com ajuda da medição remota, é essencial para a gestão das contas e para calcular precisamente as perdas reais e as falhas no sistema (Silva et al., 2021).

A presença de reservatórios (cisternas) leva ao desacoplamento do consumo da rede e da pressão. Quando os tanques de armazenamento estão presentes, a demanda é amortecida. Wagner et al. (1988) explica que o fornecimento de água a um nó depende da carga (pressão), mas quando há tanques, o coeficiente máximo de demanda de água (PHF) pode diminuir, sugerindo que a demanda instantânea da rede é menos elástica à pressão.

2.3.1 Funcionamento Hidráulico e a Pressão da Água

De acordo com Mazaheri et al. (2025), o principal efeito das caixas d'água nos edifícios é a separação hidráulica entre o uso da água e a rede pública. Esses tanques, cruciais para manter a pressão nos andares dos prédios, usam válvulas de boia que controlam a entrada de água conforme o nível do reservatório, e não conforme o uso imediato. Com isso, a demanda na rede principal diminui: nos momentos de maior consumo, a água sai do tanque, aliviando a pressão sobre a infraestrutura de abastecimento.

2.3.2 Efeitos no Fluxo Mínimo Noturno e Controle de Perdas

A relação entre reservatórios e o acompanhamento das perdas hídricas é intrincada. Silva et al. (2021) indicam que examinar o consumo doméstico mínimo geralmente entre 2h e 5h da manhã é crucial para calcular as perdas efetivas (vazamentos), supondo que o uso humano seja bem pequeno nesse período.

Porém, Mazaheri et al. (2025) mostram que ter reservatórios muda essa ideia. O enchimento desses reservatórios ocorre principalmente à noite, o que pode aumentar o fluxo noturno em até 400% se todos os prédios tiverem reservatórios. Isso confirma o que Silva et al. (2021) já avisaram sobre consumos noturnos normais (como irrigação ou enchimento de piscinas) que escondem vazamentos e alteram os padrões de consumo mínimo, complicando a identificação de problemas. A intensidade desse aumento, detalhada por Mazaheri et al. (2025), depende da pressão da rede, variando de 74% a 400% conforme as condições de operação (1,5 a 3 bar).

3 METODOLOGIA

Para descobrir padrões de uso de água que pudessem indicar a presença de reservatórios, foi criado um algoritmo para examinar, juntar e analisar estatisticamente grandes quantidades de dados. O processo foi dividido em quatro partes principais: Coletar os dados e prepará-los, ajustar os tempos e analisar a relação entre eles.

3.1 Ferramentas e Base de Dados

Para trabalhar com os dados, foi usada a linguagem de programação R (com o ambiente RStudio versão 2025.09.1), junto com bibliotecas especiais para organizar os dados (tidyverse, janitor), análise geoespacial (geosphere, leaflet) e tratamento de séries temporais (lubridate). O banco de dados que usado tem três fontes diferentes de informação:

- Dados de Pressão (Monitoramento da Rede): Leituras instantâneas de pressão (mca), coletadas a cada 15 minutos por 52 aparelhos instalados na rede de distribuição.
- Dados de Consumo (Telemetria): Quantidades de água medidas m³ por hora, obtidas por telemetria para um grupo de registros selecionados, em uma área controlada de uma rede de distribuição urbana mista, abrangendo potenciais perfis residenciais e comerciais.
- Dados Cadastrais e Geográficos: Coordenadas de latitude e longitude tanto dos sensores de pressão quanto das unidades consumidoras (matrículas).

3.2 Mapeamento geoespacial

Visto que a rede de distribuição não possui uma setorização explícita nos dados brutos ligando cada cliente a um sensor específico, foi necessário realizar um mapeamento espacial

Para cada matrícula, o algoritmo achou o sensor mais próximo, estabelecendo uma relação única. Para assegurar a integridade da análise, um filtro espacial foi aplicado, descartando consumidores cujas coordenadas tinham inconsistências ou a distância ao sensor era maior que 10 km.

3.3 Ajuste Temporal e Limpeza dos Dados

Um dos maiores obstáculos encontrados foi a diferença no ritmo de coleta dos dados: a pressão era medida a cada 15 minutos (em um ponto no tempo), enquanto o uso da água era medido a cada hora. Para conseguir comparar as duas coisas, foi usada uma técnica que junta os dados mais próximos no tempo. O algoritmo associou a cada registro de consumo horário a leitura de pressão instantânea mais próxima no tempo, respeitando a causalidade física. Além disso, foi feita uma limpeza nos dados para garantir que fossem de boa qualidade:

- **Tempo Máximo Aceitável:** Foram descartados fora os dados em que a diferença entre a leitura de consumo e a de pressão era maior que 120 minutos (o que provavelmente indicava um problema de comunicação do sensor).
- **Valores Realistas:** Foram descartados todos os dados com valores negativos ou zerados de pressão ou consumo, para evitar erros de leitura e problemas nos sensores.

3.4 Análise Estatística e Visualização

A detecção do perfil de consumo foi baseada na premissa de que a infraestrutura de reservação atuam como elementos desacopladores hidráulicos. Para verificar essa hipótese, calculou-se o Coeficiente de Correlação de Pearson r para cada unidade consumidora individualmente. A classificação preliminar dos perfis baseou-se nos seguintes critérios:

- **Intensidade:** A magnitude do valor de r indica a força da correlação entre a pressão da rede e o volume consumido. Quanto mais próximo de -1 ou +1, mais forte é a relação linear. Valores próximos de 0 indicam uma relação linear fraca ou inexistente.
- **Direção:** O sinal de r indica a direção da relação:
 - **Positiva ($r > 0$):** À medida que uma variável aumenta, a outra também tende a aumentar. No contexto deste

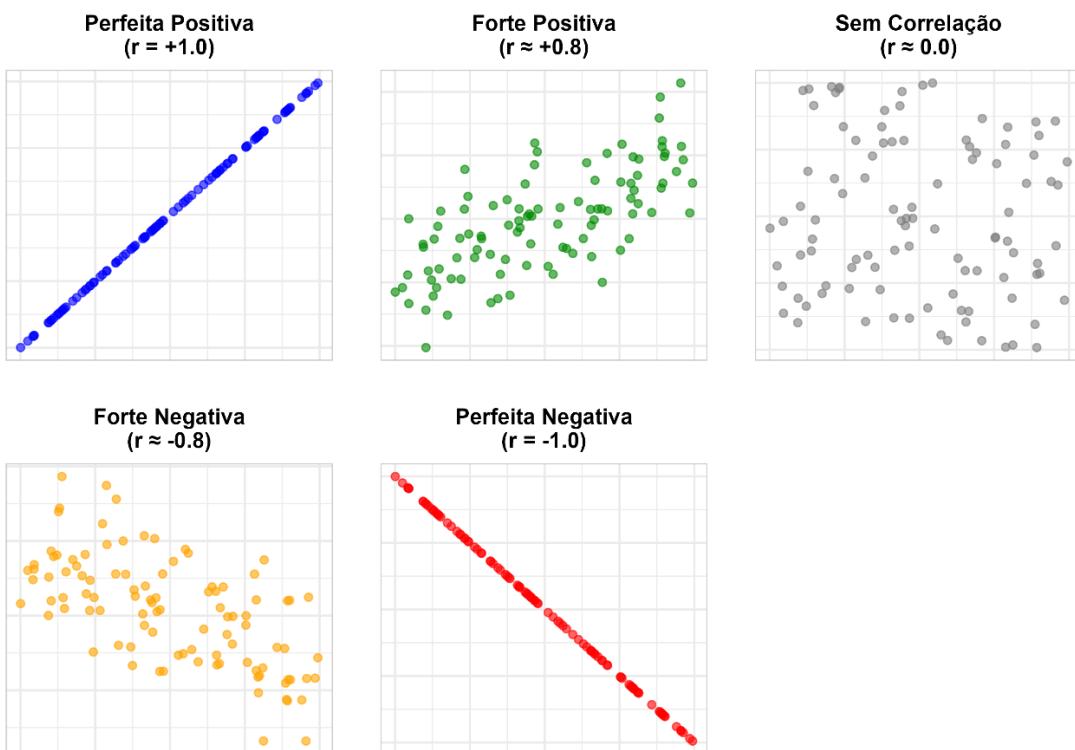
estudo, indica que o aumento da pressão favorece o aumento do consumo.

- **Negativa ($r < 0$):** À medida que uma variável aumenta, a outra tende a diminuir.

- **Interpretação aplicada:**

- **Correlação Positiva Forte:** Indica Abastecimento Direto. Existe uma dependência física clara: quanto maior a pressão disponível na rede, maior é a vazão consumida pelo imóvel.
- **Correlação Fraca/Nula:** Indica Desacoplamento Hidráulico (Com Cisterna). O consumo da residência ocorre de forma independente das oscilações de pressão da rede pública.

Figura 1- Gráfico de relações de pearson. Fonte: Autor



4 Resultados e discussões

4.1 Caracterização da Amostra e Qualidade dos Dados

A base de dados bruta de consumo continha originalmente registros de 93 unidades consumidoras. Para este estudo, a análise restringiu-se ao subgrupo de interesse composto por 24 matrículas.

O monitoramento da pressão hidráulica foi realizado por 52 dataloggers distribuídos estrategicamente na malha de distribuição. O período de análise compreendeu o intervalo de 31/07/2025 a 30/09/2025.

Após a aplicação dos filtros de consistência espacial (distância máxima de 10 km) e temporal (janela de 120 minutos), a amostra final válida consolidou-se em 24 matrículas, representando 100% do grupo de interesse inicial. O conjunto de dados resultante totalizou 24.557 pares de observações horárias (consumo vs. pressão) utilizadas para o cálculo das correlações e geração dos perfis de consumo.

4.2 Análise de Correlação e Segmentação da Amostra

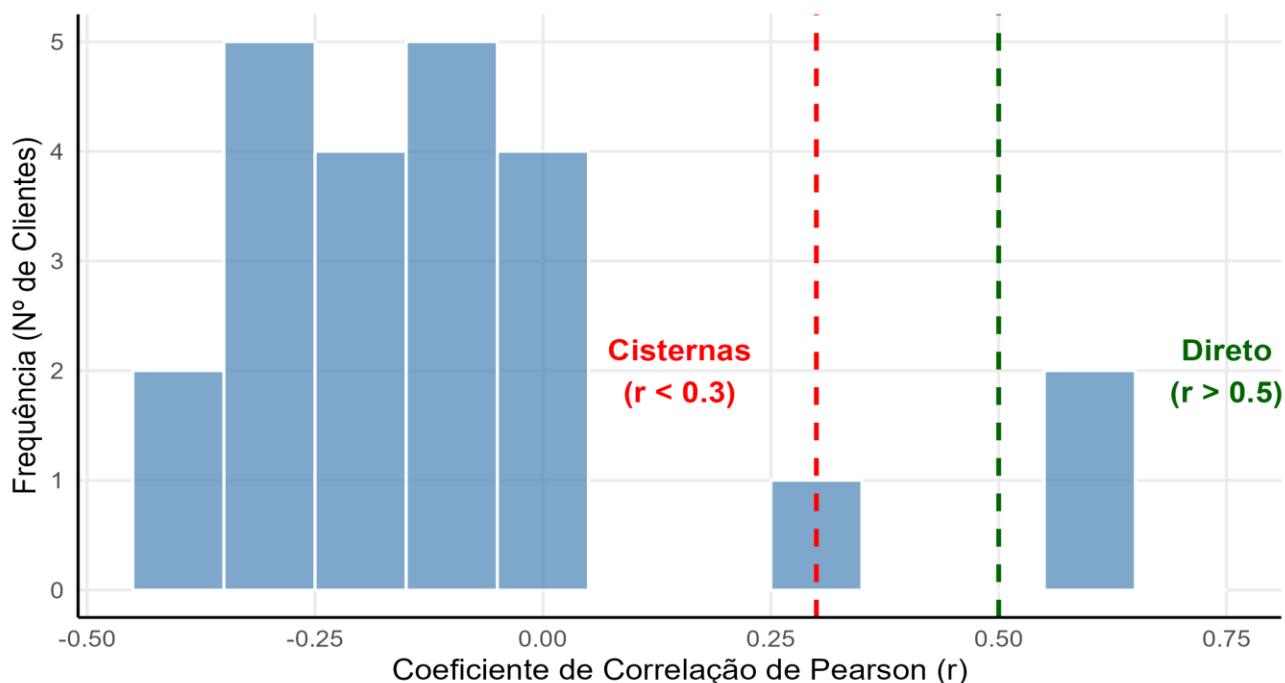
A aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson r ao conjunto de 24 unidades consumidoras revelou uma notável dicotomia nos padrões hidráulicos da rede estudada. Os coeficientes calculados variaram em um espectro amplo, desde um mínimo de $r = -0,43$

até um máximo de $r = 0,61$, evidenciando a coexistência de regimes de abastecimento distintos na mesma zona de pressão. A distribuição de frequências dos coeficientes (apresentada na Figura 2) facilitou a separação da amostra em dois grupos de comportamento, sem casos duvidosos ou inconclusivos:

- Grupo de Abastecimento Direto (8% da amostra): Apenas 2 unidades apresentaram correlação positiva robusta ($r > 0,55$). Nestes casos, a forte linearidade entre a carga hidráulica disponível e o volume consumido confirma a dependência física direta da rede de distribuição.
- Grupo de Desacoplamento Hidráulico (92% da amostra): A vasta maioria, totalizando 22 unidades, apresentou correlações fracas ($r < 0,30$) ou negativas. Este padrão estatístico corrobora a hipótese da predominância de infraestrutura de cisternas, que atua isolando a demanda interna das flutuações de pressão da rede pública.

Não foram registrados coeficientes na faixa intermediária entre 0,30 e 0,55, o que sugere que a transição entre o comportamento "conectado" e "desacoplado" é abrupta nesta malha, facilitando a classificação automática dos clientes.

Figura 2-Histograma de Correlações. Fonte: Autor



4.3 Identificação de Padrões de Consumo

Para ilustrar a dicotomia identificada na análise estatística, selecionaram-se quatro unidades consumidoras representativas dos comportamentos extremos observados na malha (Figura 3 a Figura 6). As Figuras 3 e 4 apresentam os perfis das duas únicas matrículas classificadas como Abastecimento Direto

($r > 0,55$). Em ambos os casos, observa-se visualmente que os períodos de consumo nulo ou reduzido coincidem com as quedas de pressão na rede, retomando-se o consumo apenas quando a carga hidráulica é restabelecida. A dispersão dos pontos segue uma tendência linear ascendente, confirmando a dependência física.

Figura 3 - Gráfico pressão x consumo. Fonte = Autor

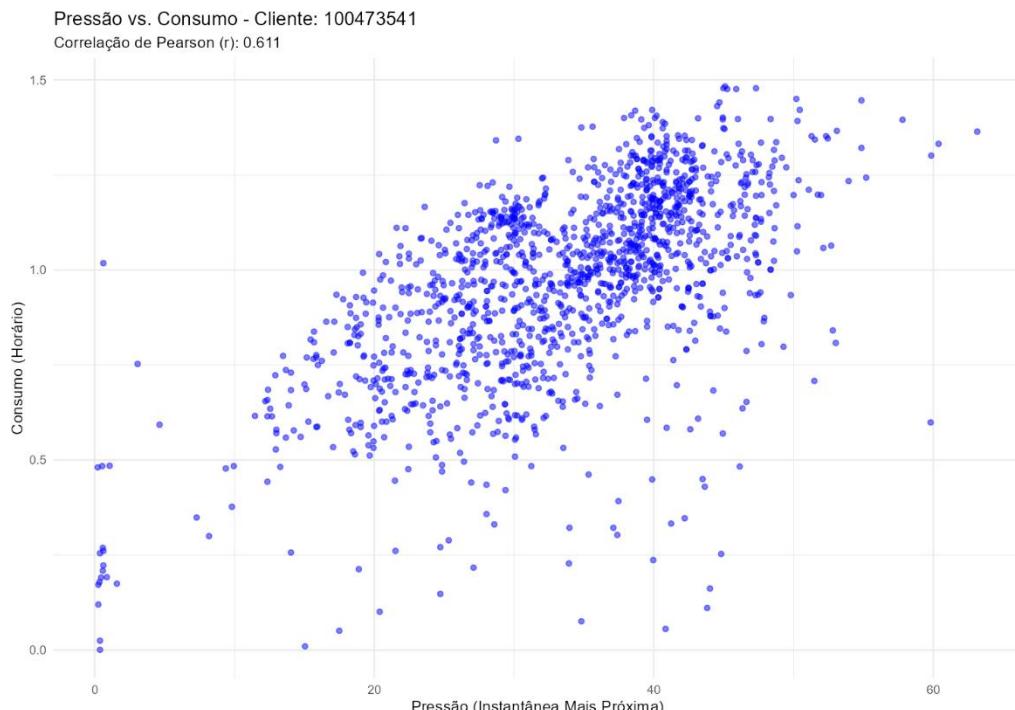
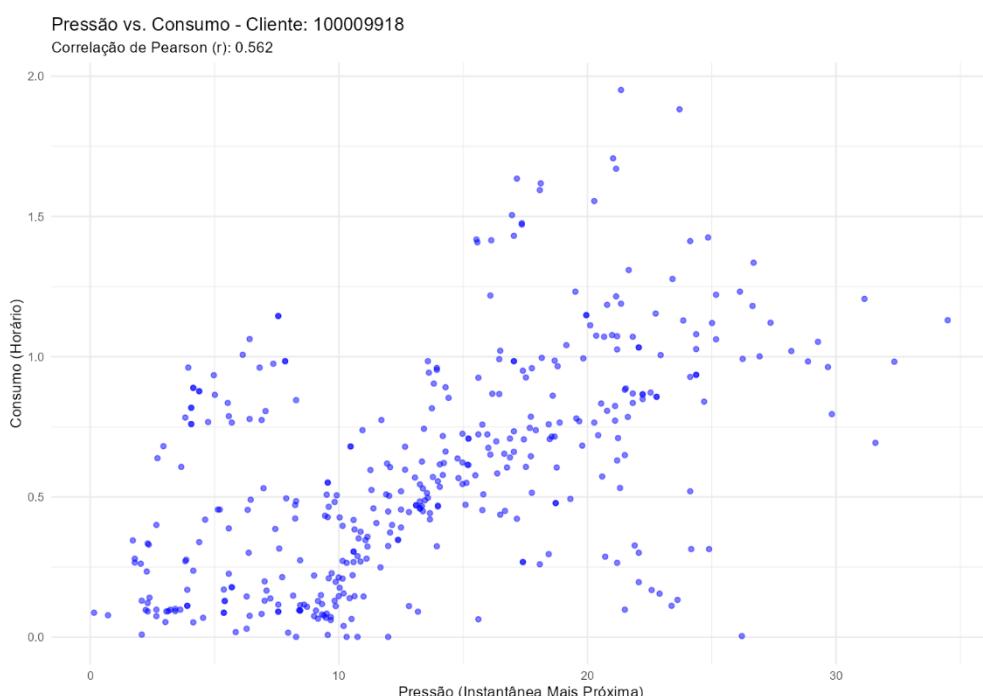


Figura 4 - Gráfico pressão x consumo. Fonte = Autor



Em contraste, as Figuras 5 e 6 exemplificam o comportamento predominante de Desacoplamento Hidráulico (Cisternas). Nestes casos, nota-se que picos de consumo ocorrem frequentemente em momentos de pressão mínima ou decrescente. A

dispersão dos dados apresenta-se como uma "nuvem" difusa, sem direção preferencial, evidenciando que a demanda interna é suprida por um volume reservado e não pela pressão instantânea da rede.

Figura 5 - Gráfico pressão x consumo. Fonte = Autor

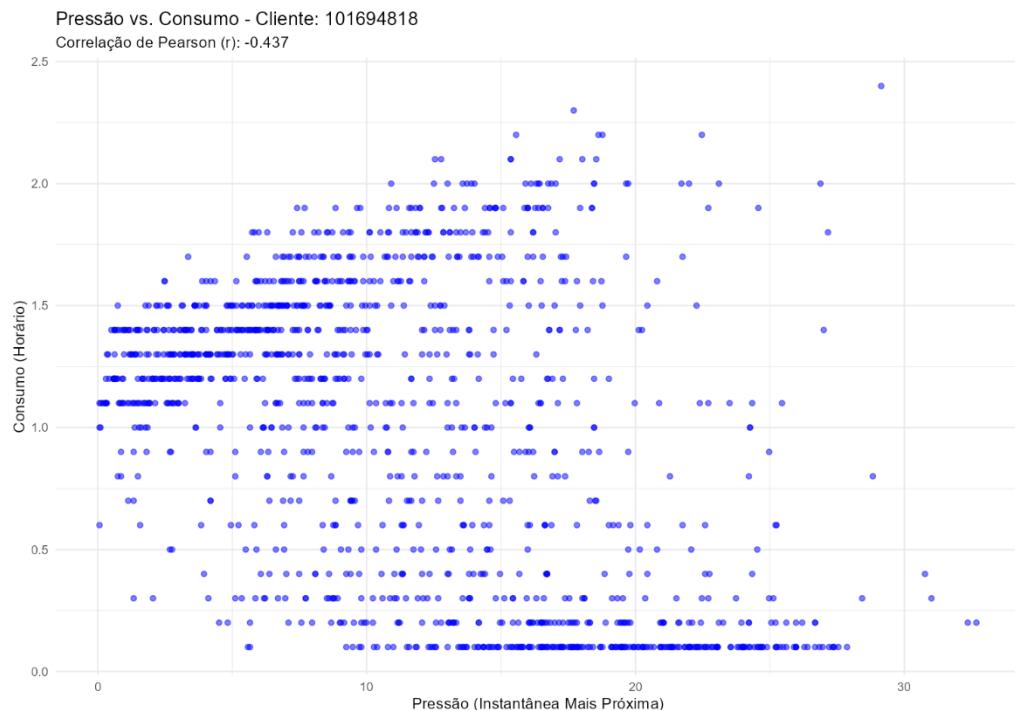
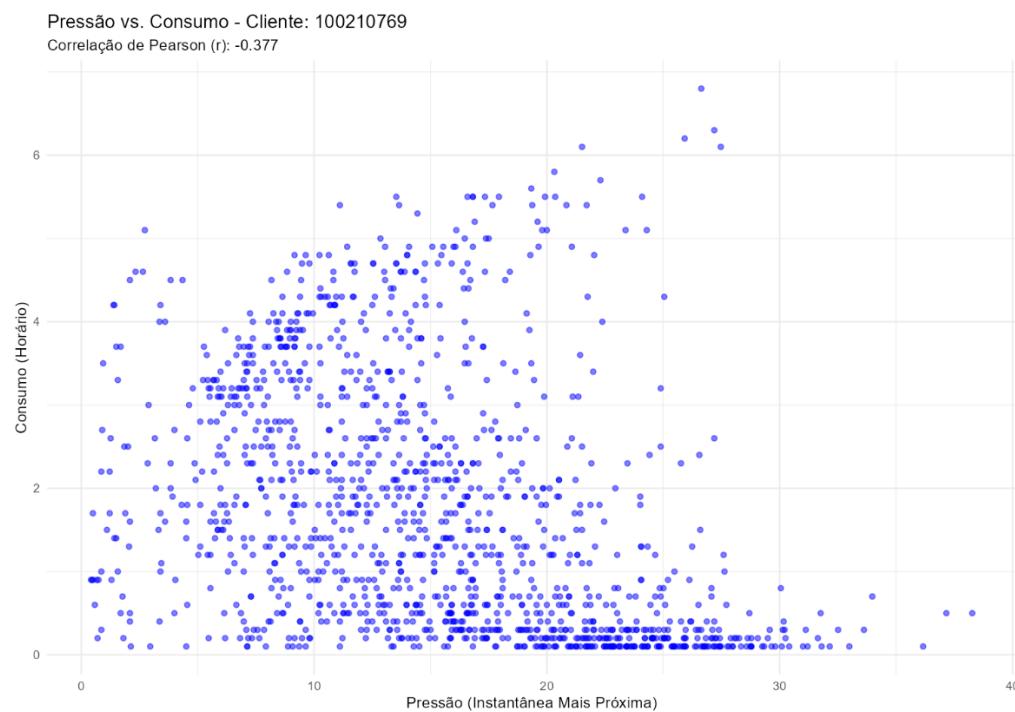


Figura 6 - Gráfico pressão x consumo. Fonte = Autor



5 CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a aplicabilidade de métodos estatísticos de correlação bivariada para a identificação remota de perfis de consumo e infraestrutura de reservação domiciliar em redes de abastecimento de água.

Os resultados obtidos validam a hipótese central da pesquisa. A aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson sobre séries temporais sincronizados de pressão e consumo demonstrou ser uma ferramenta eficaz para distinguir unidades com abastecimento direto daquelas operando com reservatórios. A metodologia permitiu segmentar a amostra com clareza, identificando padrões distintos de dependência e desacoplamento hidráulico.

O diagnóstico da malha analisada revelou uma predominância massiva de unidades com reservação própria (superior a 90% da amostra). Embora a presença de reservatórios seja uma característica comum e prevista em áreas urbanas consolidadas, a sua quantificação precisa traz implicações diretas para a gestão operacional. A constatação de que a grande maioria dos consumidores possui demanda desacoplada da pressão da rede indica que o sistema opera, em muitos momentos, com pressões superiores às estritamente necessárias para o abastecimento imediato.

Esta conclusão aponta para uma oportunidade significativa de gestão de perdas. Com a confirmação de que a demanda do usuário final não é elástica à pressão (devido ao amortecimento das cisternas), a concessionária pode implementar estratégias de gerenciamento de pressão para reduzir a carga hidráulica média da rede e consequentemente os vazamentos reais sem prejudicar o nível de serviço ou o volume fornecido aos clientes.

Como limitação do método, destaca-se a sua alta sensibilidade à qualidade dos dados de entrada. A eficácia da classificação depende rigorosamente da consistência do cadastro técnico (geolocalização precisa) e da disponibilidade de séries históricas de telemetria contínuas e tratadas, exigindo uma etapa robusta de pré-processamento para a eliminação de ruídos e inconsistências físicas.

6 AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e ao curso de Engenharia Civil pela infraestrutura e base acadêmica oferecidas. Ao professor orientador Peter Batista Cheung, pela

confiança, direção segura e pelos conhecimentos partilhados, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também todo o apoio da minha família e amigos; sem eles, nada disso seria possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUCHBERGER, S. G.; WELLS, G. J. Intensity, Duration, and Frequency of Residential Water Demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Reston, VA, v. 122, n. 1, p. 11–19, jan./feb. 1996.
- FANTOZZI, M.; LAMBERT, A. Residential Night Consumption – Assessment, Choice of Scaling Units and Calculation of Variability. In: IWA WATER LOSS CONFERENCE, 2012, Manila, Philippines. Proceedings... Manila: IWA, 2012.
- MAZAHERI, R.; MOTIEE, H.; GHAZIZADEH, M. J. O efeito da construção de tanques de armazenamento na variação diurna do fluxo em redes de distribuição de água. *Ciência Aplicada da Água*, 2025. v. 15, n. 140. DOI: 10.1007/s13201-025-02490-6.
- MELLO, T. M. P. de et al. Estudo de Perfil de Consumo de Água em Área Urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS (SBRH), 22., 2017, Florianópolis/SC. Anais... Florianópolis, SC: ABRH, 2017.
- ONEDA, T. M. S.; KALBUSCH, A. Estudo de caso: usos finais da água em uma Residência em Joinville-SC. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2018.
- POLEBITSKI, A. S.; PALMER, R. N. Seasonal residential water demand forecasting for census tracts. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Reston, VA, v. 136, n. 1, p. 1-10, jan. 2010. DOI: 10.1061/ASCEWR.1943-5452.0000003.
- SILVA, M. A. et al. Análise de dados de telemedidação de consumos domésticos para apoio na avaliação de perdas aparentes e reais em sistemas de distribuição de água. *Ingeniería del agua*, Valênciia, v. 25, n. 1, p. 37-47, 2021. DOI: 10.4995/Ia.2021.13641.
- WAGNER, J. M.; SHAMIR, U.; MARKS, D. H. Water Distribution Reliability: Simulation Methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Reston, VA, v. 114, n. 3, p. 276-291, may 1988.

WANG, R. et al. Uncovering urban water consumption patterns through time series clustering and entropy analysis. *Water Research*, v. 262, n. 122085, 2024. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122085.

WILLIS, R. M. et al. End use water consumption in households: impact of socio-demographic factors and efficient devices. *Journal of Cleaner Production*, v. 60, p. 107–115, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.08.006.