

CONTROLE DE QUALIDADE DAS SÉRIES DIÁRIAS DE PRECIPITAÇÃO - ESTUDO DE CASO PARA ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO LOCALIZADAS EM MINAS GERAIS (MG)

*Lucas P. Golia¹; Matheus Filipe da Silva Pereira²; Aline de A. Nunes³; Éber José de A. Pinto⁴;
Denis F. Plec⁵*

Resumo: A disponibilidade de dados pluviométricos confiáveis é fundamental para estudos climáticos, modelagem hidrológica, gestão de recursos hídricos e avaliação de riscos associados a eventos extremos. Nesse contexto, o controle de qualidade de séries diárias de precipitação é essencial para garantir a confiabilidade e a aplicabilidade desses registros. Este estudo aplicou a metodologia de Llabrés-Brustenga et al. (2019) para estimar a qualidade absoluta (Q) e relativa (Wm) de séries pluviométricas de 653 estações no estado de Minas Gerais, com o objetivo de avaliar a consistência dos dados observados. Os índices foram calculados em escala de 0 a 100, adotando-se como critérios de aceitabilidade $Q \geq 80$ e $Wm \geq 50$. Os resultados indicaram elevada qualidade das séries, com valores de Q predominantemente entre 80 e 100 e Wm superiores a 99 em todos os cenários analisados. A ampliação do raio de busca de estações auxiliares de 50 km para 75 km resultou em aumento da cobertura da análise e melhora da qualidade relativa mínima observada (de 99,21 para 99,47), sem comprometer a consistência dos resultados. Os achados evidenciam a aplicabilidade da metodologia no contexto brasileiro e reforçam a importância de dados confiáveis para o suporte à modelagem hidrológica, ao planejamento de sistemas de drenagem urbana e à gestão de eventos hidrológicos extremos.

Palavras-Chave - Controle de qualidade, Séries históricas, Monitoramento hidrológico.

Abstract: The availability of reliable rainfall data is essential for climate studies, hydrological modeling, water resources management, and the assessment of risks associated with extreme events. In this context, quality control of daily precipitation series is fundamental to ensure the reliability and applicability of these records. This study applied the methodology proposed by Llabrés-Brustenga et al. (2019) to estimate absolute (Q) and relative (Wm) quality indices for precipitation series from 653 stations in the state of Minas Gerais, Brazil, aiming to assess data consistency. The indices were calculated on a scale from 0 to 100, adopting $Q \geq 80$ and $Wm \geq 50$ as acceptability criteria. The results indicated high data quality, with Q values predominantly ranging from 80 to 100 and Wm values exceeding 99 in all evaluated scenarios. Expanding the search radius for neighboring stations from 50 km to 75 km increased the analysis coverage and improved the minimum relative quality (from 99.21 to 99.47), without compromising consistency. The findings demonstrate the applicability of the methodology in the Brazilian context and highlight the importance of reliable rainfall data to support hydrological modeling, urban drainage planning, and the management of extreme hydrological events.

Keywords - Quality control, Time series, Hydrological monitoring.

1. Graduando em Eng. Urbana - Depto. Engenharia Urbana, CEP 35400-000 Ouro Preto - MG. Correio eletrônico: lucas.golia@aluno.ufop.edu.br

2. Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (UFOP). CEP 35400-000 Ouro Preto - MG. Correio eletrônico: matheus.filipe@aluno.ufop.edu.br

3. Enga. Agrícola e Ambiental, Profa. Dra. UFOP - Depto. Eng. Urbana, CEP 35400-000 Ouro Preto - MG. Correio eletrônico: aline.nunes@ufop.edu.br

4. Eng. Civil, Pesquisador Dr. SGB, CEP 30140-002 Belo Horizonte - MG. Correio eletrônico: eber.andrade@sgb.gov.br

5. Eng. Ambiental, Prof. Dr. UFOP - Depto. Eng. Urbana, CEP 35400-000 Ouro Preto - MG. Correio eletrônico: denis.plec@ufop.edu.br

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de dados precisos e confiáveis de precipitação é fundamental para aplicações como estudos climáticos, gestão de recursos hídricos e previsão de desastres naturais. As séries diárias de precipitação constituem importante fonte de informação para compreender padrões climáticos, identificar tendências de longo prazo e subsidiar modelos preditivos. Entretanto, a qualidade desses dados pode ser comprometida por erros de medição, problemas instrumentais e falhas na cobertura espacial e temporal.

Nesse contexto, o controle de qualidade das séries diárias de precipitação é essencial para garantir a integridade e a confiabilidade dos registros. Com o avanço da tecnologia e a maior disponibilidade de dados observacionais, diferentes abordagens têm sido propostas para avaliar, corrigir e aprimorar esses registros (Shearman, 1975; Romero et al., 1998; González-Rouco et al., 2001; Abaurrea et al., 2004; Viney; Bates, 2004; Einfalt et al., 2008; Llabrés-Brustenga et al., 2019). Apesar desses avanços, ainda persistem desafios, especialmente pela ausência de um procedimento padronizado específico para dados de precipitação (Branisavljevi et al., 2009). De modo geral, as verificações de qualidade iniciam-se pela identificação de erros mais evidentes, seguidas da análise de inconsistências mais complexas (Einfalt et al., 2008).

Destaca-se que, no contexto das águas urbanas, a qualidade das séries pluviométricas assume papel ainda mais crítico, uma vez que esses dados fundamentam o dimensionamento de sistemas de drenagem, a modelagem hidrológica em bacias urbanizadas e a avaliação de riscos associados a eventos extremos, como alagamentos e inundações. Em ambientes urbanos, caracterizados por elevada impermeabilização e respostas hidrológicas rápidas, inconsistências nos dados de precipitação podem comprometer estimativas de vazão e decisões de planejamento, reforçando a necessidade de aprimoramento contínuo dos procedimentos de controle de qualidade.

Neste estudo, desenvolvido em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (SGB), responsável pelo monitoramento da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), sob gestão da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), foi aplicada a metodologia proposta por Llabrés-Brustenga et al. (2019) para avaliar a qualidade absoluta e relativa de séries diárias de precipitação em Minas Gerais. A abordagem considerou a presença de falhas nos registros, a ocorrência de valores inconsistentes e a coerência espacial entre estações vizinhas, com o objetivo de quantificar a confiabilidade das séries pluviométricas, identificar estações mais consistentes e detectar erros localizados, contribuindo para o aprimoramento do uso desses dados em aplicações hidrológicas e urbanas.

METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo e levantamento dos dados físicos e pluviométricos

O estado de Minas Gerais, localizado na região Sudeste do Brasil (Figura 1), possui, segundo o Censo Demográfico de 2022, uma população de 20.539.989 habitantes distribuídos em uma área de 586.513,984 km², resultando em densidade demográfica aproximada de 35 habitantes por quilômetro quadrado. Trata-se de um dos maiores estados brasileiros em extensão territorial, caracterizado por expressiva diversidade física, climática e ambiental.

A Figura 1 apresenta a localização do estado no território brasileiro, bem como a distribuição espacial das estações pluviométricas utilizadas neste estudo. Para essas estações, foram obtidas, por meio das plataformas HidroWeb e IDE-Sisema, as séries históricas de precipitação e suas informações geográficas - latitude, longitude e altitude, constituindo a base de dados para a aplicação da metodologia proposta.

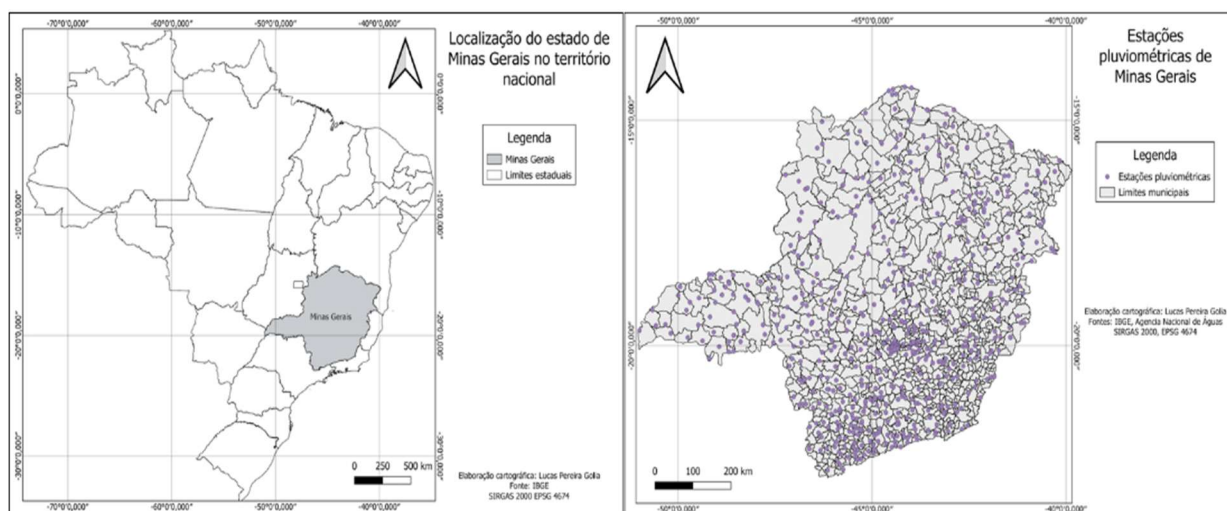


Figura 1 - Localização de Minas Gerais no território brasileiro e de suas estações pluviométricas

Como limitação na coleta de dados, destaca-se que a plataforma HidroWeb disponibiliza informações de altitude para apenas 322 das 653 estações pluviométricas do estado. Dessa forma, foi necessário recorrer ao Modelo Digital de Elevação (MDE) do IDE-Sisema para suprir essa lacuna. Embora apresente menor precisão em relação aos dados oficiais, o MDE mostrou-se fundamental para viabilizar a aplicação da metodologia. Observa-se, ainda, uma maior concentração de estações na porção sul de Minas Gerais, evidenciando a heterogeneidade da rede de monitoramento e resultando em regiões com baixa densidade de estações, onde o potencial de comparação espacial dos dados se torna limitado.

A caracterização física do estado, apresentada na Figura 2, é fundamental para a compreensão dos padrões pluviométricos e da interpretação dos índices de qualidade. Observa-se que a altimetria varia significativamente, com áreas de maior altitude concentradas nas porções sul, sudeste e central, associadas a relevos mais acidentados e maiores declividades. Essas regiões favorecem processos orográficos, intensificando a formação de nuvens e a ocorrência de precipitação. Em contraste, o norte de Minas Gerais apresenta relevo mais suavizado, com menores altitudes e declividades, o que se reflete em menor influência orográfica sobre os padrões de chuva.

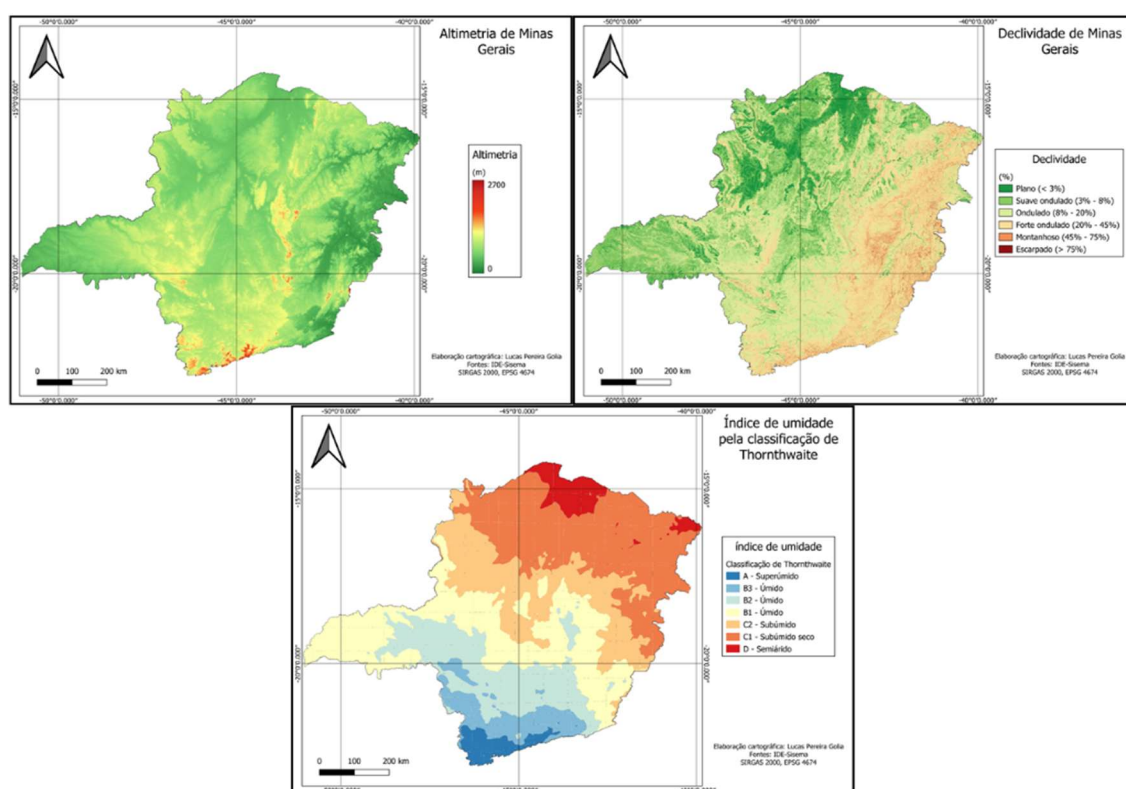


Figura 2 - Características físicas de Minas Gerais

Do ponto de vista climático, a distribuição do índice de umidade, segundo a classificação de Thornthwaite, indica um gradiente bem definido, com condições mais úmidas nas regiões sul e Zona da Mata e predominância de condições subúmidas a semiáridas no norte do estado. Esse padrão evidencia diferenças no balanço entre oferta e demanda hídrica, com implicações diretas na variabilidade e regularidade das séries pluviométricas.

Essa diversidade fisiográfica e climática resulta em forte variabilidade espacial da precipitação, podendo gerar contrastes significativos entre estações relativamente próximas. Tal condição impacta especialmente os índices de qualidade relativa, que dependem da coerência entre

séries vizinhas e da representatividade espacial. Nesse sentido, a consideração desses fatores é fundamental para a adequada interpretação dos resultados, uma vez que Minas Gerais apresenta maior heterogeneidade territorial e climática em comparação à área original de aplicação da metodologia de Llabrés-Brustenga et al. (2019).

Cálculo do índice de qualidade absoluta

O índice de qualidade absoluta Q visa determinar uma pontuação para a confiabilidade dos dados de cada estação, sem compará-los com os de nenhuma outra. O valor de Q varia de 0 a 100, com os valores acima de 80 indicando uma qualidade absoluta dos dados considerada aceitável. Consiste de uma média entre 5 parâmetros diferentes calculados, onde cada um também varia de 0 a 100.

O parâmetro P corresponde à proporção de dados anuais válidos, calculada pela razão entre os dias com medições não nulas e o número total de dias do ano. O componente Q_{gaps} (Equação 1) mede a distribuição das lacunas na série, penalizando de forma mais intensa quando os dias sem registro se encontram intercalados entre dias com medições válidas (padrão “cheio–vazio–cheio”), e de maneira menos rigorosa quando as ausências se concentram em blocos contínuos. Nessa equação, n_{gap} representa o número de dias sem dados, $Lmax_{gap}$ corresponde ao maior intervalo contínuo sem registros, e n indica o total de dias no ano.

$$Q_{gaps} = 100 - 100 \frac{2n_{gap} + Lmax_{gap}}{n} \quad (1)$$

O componente $Q_{m_{zero}}$ (Equação 2) penaliza anos com meses inteiros sem registros de precipitação, situação que pode refletir preenchimento artificial de valores iguais a zero em períodos de baixa pluviosidade ou ausência de medições. Nesse índice, m_0 representa o número de meses totalmente nulos e m o total de meses no ano.

$$Q_{m_{zero}} = 100 - 100 \frac{m_0}{m} \quad (2)$$

O parâmetro $Q_{w_{zero}}$ (Equação 3) avalia a existência de viés semanal nos registros de precipitação. Desvios acentuados dessa uniformidade, como a concentração sistemática de registros em determinados dias, indicam a presença de acumulações multidiárias não registradas corretamente. O índice é calculado a partir do coeficiente de variação CV , definido pela razão entre o desvio-padrão e a média da frequência de dias chuvosos por semana.

$$Q_{w_{zero}} = 100 - 100CV(ni) \quad (3)$$

Por fim, o componente *Qoutliers* avalia a proporção de dias cuja precipitação ultrapassa limites climatológicos superiores definidos para cada mês (Equação 4). O limite é determinado pelo terceiro quartil $Q3$ acrescido de três vezes o intervalo interquartílico IQR , considerando apenas dias com precipitação ≥ 1 mm.

$$Limite = Q3 + 3IQR \quad (4)$$

Cálculo do índice de qualidade relativa

O primeiro parâmetro utilizado nessa etapa é o índice R (Equação 5), que expressa a representatividade espacial entre pares de estações. Nessa equação, da corresponde à distância máxima admitida (50 ou 75 km), d representa a distância real entre as estações, h a diferença de altitude em metros, e $Ccorr$ o coeficiente de correlação de Pearson calculado para os registros diários do par.

$$R = \frac{100}{3} \left(\frac{da - d}{da} + 0,5 \frac{h}{500} + Ccorr \right) \quad (5)$$

É calculada, então, a diferença diária relativa Dif (Equação 6) entre os registros das estações, comparada a um limite de tolerância T (Equação 7), ajustado para cada mês de forma a considerar a variabilidade sazonal da precipitação.

$$Dif = \frac{|PPTc - PPTaux|}{Av(PPTc, PPTaux)} \cdot Max(PPTc, PPTaux) \quad (6)$$

$$T = Cm \ln(101 - R) \quad (7)$$

Nessas equações, $PPTc$ representa a precipitação da estação central, $PPTaux$ a da estação auxiliar, Av a média aritmética dos dois valores, Max o maior entre eles, e Cm um coeficiente de ajuste sazonal dependente da variabilidade espacial típica da precipitação em cada mês. Valores mais altos de Cm são associados a meses chuvosos e convectivos, enquanto valores mais baixos refletem a estação seca, caracterizada por maior homogeneidade espacial.

A qualidade relativa de cada estação será expressa pelo índice Wm (Equação 8), calculado a partir da contribuição ponderada de cada par. Nela, $Rmin$ corresponde ao limiar mínimo de representatividade adotado (70 neste estudo), e L assume valor 1 para comparações entre Dif e T válidas e 0 para inválidas. O índice varia de 0 a 100, com 50 sendo aceitável.

$$Wm = 100 \frac{\sum Aux (R - Rmin)^2 L}{\sum Aux (R - Rmin)^2} \quad (8)$$

Na metodologia original, o índice Wm é calculado diariamente para cada estação, a partir da comparação entre uma estação principal e suas vizinhas. Os dias são classificados como

insuficientes quando há menos de três estações auxiliares disponíveis, inválidos quando $W_m < 20$, dúbios para $20 < W_m < 50$ e válidos quando $W_m > 50$. Entretanto, a aplicação direta desse critério em Minas Gerais mostrou-se inviável, devido à baixa densidade da rede pluviométrica. Aproximadamente 79% dos dias com medições foram classificados como insuficientes, uma vez que não havia o mínimo de três estações auxiliares para a realização das comparações.

Diante dessa limitação, o critério mínimo de três estações auxiliares foi flexibilizado para viabilizar a aplicação da metodologia. Assim, neste estudo, o W_m passou a representar a porcentagem de dias em que os dados de uma estação não ultrapassaram o limite diário estabelecido no cálculo de Dif, quando comparados individualmente com cada estação auxiliar disponível. Posteriormente, os valores de W_m obtidos nas comparações entre a estação principal e cada uma de suas auxiliares foram agregados por meio de uma média ponderada pela representatividade (R), resultando em um único valor de W_m para cada estação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que se refere à qualidade absoluta (Figura 3), a análise das 653 estações pluviométricas de Minas Gerais indica desempenho geral elevado, com a maioria apresentando pontuações entre 80 e 100, sendo valores superiores a 80 considerados aceitáveis. Esse resultado reflete positivamente na qualidade relativa, uma vez que, para todas as estações que apresentaram pares com representatividade $R \geq 70$, os valores de W_m superaram 99, evidenciando consistência entre as avaliações absoluta e relativa. Destaca-se que a qualidade absoluta corresponde à média de cinco índices distintos, cada qual com comportamento próprio. A análise individual desses índices permite identificar fontes específicas de inconsistência nos dados, fornecendo subsídios relevantes para o aprimoramento dos procedimentos de coleta e tratamento das séries pluviométricas.

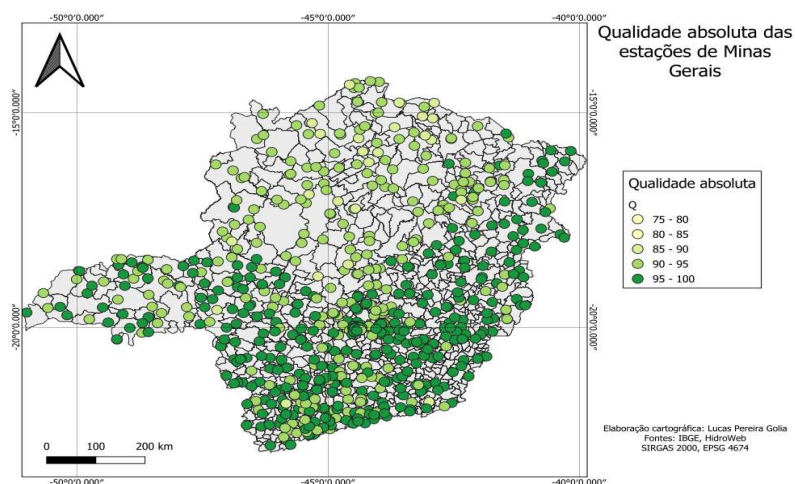


Figura 3 - Mapa da qualidade absoluta das estações de Minas Gerais

A variabilidade espacial da qualidade dos dados pluviométricos em Minas Gerais pode ser parcialmente associada a condicionantes físicos e, principalmente, à distribuição da rede de monitoramento, conforme informações disponíveis no IDE-Sisema (2026). Observa-se melhor desempenho em regiões com maior densidade de estações, como a porção central, sul e sudeste do estado, onde se inserem municípios como Belo Horizonte (região central), e cidades da Zona da Mata, como Juiz de Fora e Ubá. Nessas áreas, a maior proximidade entre estações favorece as análises de consistência espacial, refletindo positivamente nos índices de qualidade, sobretudo nos indicadores relativos.

Esse padrão apresenta implicações relevantes do ponto de vista aplicado. Em regiões frequentemente impactadas por eventos hidrológicos extremos, como alagamentos e inundações urbanas, a maior confiabilidade dos dados pluviométricos contribui para análises mais robustas, subsidiando modelagens hidrológicas, avaliação de riscos e o dimensionamento de sistemas de drenagem com maior consistência.

Por outro lado, regiões com menor densidade de estações, como o norte do estado, apresentam limitações nas análises comparativas, o que pode afetar a confiabilidade dos indicadores de qualidade baseados em coerência espacial. Esse aspecto é particularmente relevante em áreas onde já se observam desafios relacionados à disponibilidade hídrica, uma vez que a menor densidade de monitoramento pode dificultar a caracterização adequada dos regimes de precipitação e, consequentemente, o suporte à gestão dos recursos hídricos.

Dessa forma, os resultados evidenciam que a distribuição espacial da rede de monitoramento não apenas influencia os indicadores de qualidade dos dados, mas também condiciona o potencial de aplicação desses dados em diferentes contextos hidrológicos, reforçando a importância de estratégias de ampliação e densificação da rede em regiões menos monitoradas.

A análise do índice W_m indica qualidade relativa muito elevada das séries pluviométricas, considerando a adoção de um limiar T pouco restritivo. Para uma distância máxima de 50 km, foram obtidos valores de W_m para 292 estações, correspondentes àquelas que apresentaram ao menos um par com representatividade $R \geq 70$. Nessas condições, o menor valor observado foi de 99,21 (Figura 4), sendo que 116 estações ($\approx 39,7\%$) apresentaram W_m igual a 100. Esse resultado é coerente com a comparação diária entre Dif e o limiar T , uma vez que, para diversas estações, os valores de Dif não ultrapassaram T ao longo de todo o período analisado, justificando os valores máximos de W_m .

Ao ampliar o raio máximo considerado no cálculo da representatividade R de 50 km para 75 km, o número de estações com pelo menos uma auxiliar aumentou de 292 para 421, ampliando a

abrangência da análise. Nesse cenário, o menor valor de W_m elevou-se de 99,21 para 99,47 (Figura 4), indicando um aumento na qualidade relativa mínima observada. Por outro lado, a proporção de estações com $W_m = 100$ foi reduzida, uma vez que o incremento no número de comparações por estação aumenta a probabilidade de ocorrência de ao menos um dia em que Dif ultrapasse o limiar T ao longo do período analisado.

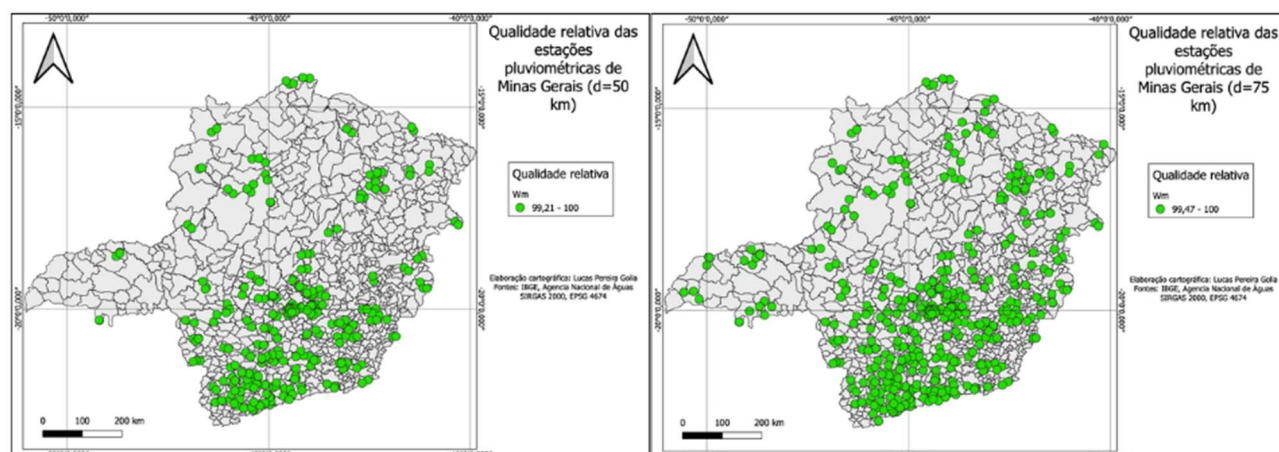


Figura 4 - Mapa da qualidade relativa para distâncias de 50 e 75 km

Em síntese, a metodologia de Llabrés-Brustenga et al. (2019) demonstrou-se tecnicamente consistente e operacionalmente aplicável ao contexto de Minas Gerais. A combinação de elevada qualidade absoluta e qualidade relativa muito alta reforça a robustez do método, ao mesmo tempo em que evidencia a necessidade de ajustes regionais, especialmente na calibração do parâmetro C_m , de modo a representar adequadamente a maior heterogeneidade climática e fisiográfica do estado.

Esses resultados contribuem para o avanço das estratégias de controle de qualidade de dados pluviométricos no Brasil, ao mesmo tempo em que oferecem subsídios para o aprimoramento da rede de monitoramento. Ademais, reforçam a importância da utilização de séries confiáveis como suporte à gestão de recursos hídricos e ao planejamento de ações voltadas à mitigação de eventos hidrológicos extremos.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que a metodologia de Llabrés-Brustenga et al. (2019) é aplicável ao contexto de Minas Gerais, apresentando elevada qualidade absoluta e relativa das séries pluviométricas, mesmo diante da menor densidade da rede de monitoramento. A ampliação do raio de busca de estações auxiliares mostrou-se eficaz para aumentar a cobertura da análise sem comprometer a consistência dos resultados, reforçando a robustez do método.

No contexto das águas urbanas, a confiabilidade dessas séries é fundamental para o dimensionamento de sistemas de drenagem, modelagem hidrológica e avaliação de riscos associados a eventos extremos. Os resultados indicam a necessidade de ajustes regionais, especialmente na calibração do parâmetro C_m , e evidenciam a importância da densificação da rede de monitoramento, contribuindo para o aprimoramento da gestão urbana das águas e para o suporte à tomada de decisão frente a eventos hidrológicos críticos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Serviço Geológico do Brasil (SGB) pela disponibilização dos dados e pela parceria no desenvolvimento deste estudo. Agradecemos ainda à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), por meio da Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação (PROPPI), pelo apoio institucional e infraestrutura, bem como ao CNPq pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABAURREA, et al. (2004). "*Metodología para el control de calidad y homogeneidad de una base de datos de precipitación diaria*", in *El Clima entre el Mar y la Montaña*. Org. por García, J.C., Diego, C., Fernández de Arróyabe, P., Garmendia, C. e Rasilla, D., Asociación Española de Climatología e Universidad de Cantabria, Santander, pp. 431–440.
- BRANISAVLJEVIĆ, N.; PRODANOVIĆ, D.; ARSIĆ, M.; SIMIĆ, Z.; BOROTA, J. (2009). "*Hydro-Meteorological Data Quality Assurance and Improvement*". *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 3(1), pp. 228–249.
- EINFALT, T.; MICHAELIDES, S. (2008). "*Quality control of precipitation data*", in *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction*. Org. por Michaelides, S., Springer, Berlin/Heidelberg, pp. 101–126.
- GONZÁLEZ-ROUCO, J.F.; JIMÉNEZ, J.L.; QUESADA, V.; VALERO, F. (2001). "*Quality control and homogeneity of precipitation data in the southwest of Europe*". *Journal of Climate*, 14(5), pp. 964–978.
- LLABRÉS-BRUSTENGA, A.; RIUS, A.; RODRÍGUEZ-SOLÀ, R.; CASAS-CASTILLO, M.C.; REDAÑO, A. (2019). "*Quality control process of the daily rainfall series available in Catalonia from 1855 to the present*". *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3-4), pp. 2715–2729.
- MINAS GERAIS. SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. (2022). *IDE-Sisema – Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Minas Gerais*. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 29 mar. 2026.
- ROMERO, R.; GUIJARRO, J.A.; RAMIS, C.; ALONSO, S. (1998). "*A 30-year (1964–1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study*". *International Journal of Climatology*, 18(5), pp. 541–560.
- SHEARMAN, R.J. (1975). "*Computer quality control of daily and monthly rainfall data*". *Meteorological Magazine*, 104, pp. 102–108.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. (2020). *Guide to Hydrological Practice. Volume I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information*. World Meteorological Organization, Geneva. (WMO-No. 168).