

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

COMO AS MODIFICAÇÕES DA EQUAÇÃO DE KIRPICH IMPACTAM NAS ESTIMATIVAS DE TEMPO DE CONCENTRAÇÃO?

Brenda Ferreira¹ ; Daniel Detzel² ; Tobias Bleninger³ ; Regina Kishi⁴ ; Tereza Lopes⁵

Abstract: This study analyzes, for the first time, 182 studies available in the ABRHidro repository, focused on modifications of the Kirpich formula, which showed significant impacts on estimates of time of concentration, especially considering different areas of the river basins. The original Kirpich formula from 1940, designed for small rural basins ($\leq 0.45 \text{ km}^2$), has been applied to larger basins, including urban and mixed areas. The diversity of equations identified (12 Kirpich variations in 85 articles) reflects the continuous search for adaptations that best meet the specificities of the basins analyzed. Among the formulas evaluated, Equation 1 (Mine and Tucci, 1999) stands out, as it presented the greatest adherence to the observed data and was the most frequently used (56% of cases), in addition to offering the best accuracy rates. The results indicate that, while the evaluated equations maintain good performance in small basins (up to 10 km^2), there is a significant increase in errors in larger areas, particularly in basins up to $12,000 \text{ km}^2$. Equation 6 (Modified Kirpich) proved to be inadequate for any context outside the original conditions (errors up to 2,076 hours in basins $> 5,000 \text{ km}^2$). Therefore, it was concluded that Equation 1 remains the most reliable alternative, but only within the validated limits. This study establishes the limit of 10 km^2 for the application of Kirpich formulas in rural or urbanized basins. For basins larger than this value, there is a need to use other methodologies to estimate the time of concentration.

Resumo: Este estudo realiza, pela primeira vez, a análise de 182 estudos disponíveis no repositório da ABRHidro, focados em modificações da fórmula de Kirpich, em que, mostrou diferenças relevantes nas estimativas do tempo de concentração, especialmente considerando diferentes áreas das bacias hidrográficas. A fórmula original de Kirpich de 1940, idealizada para bacias rurais de pequeno porte ($\leq 0,45 \text{ km}^2$), tem sido aplicada em bacias de maior extensão, inclusive em áreas urbanas e mistas. A diversidade de equações identificadas (12 variações de Kirpich em 85 artigos) reflete a busca contínua por adaptações que melhor atendam às especificidades das bacias analisadas. Entre as fórmulas avaliadas, destaca-se a Equação 1 (Mine e Tucci, 1999), que apresentou maior aderência aos dados observados e foi a mais frequentemente empregada (56% dos casos), além de oferecer os melhores índices de precisão. Os resultados indicam que, enquanto as equações avaliadas mantêm bom desempenho em bacias pequenas (até 10 km^2), há um aumento expressivo nos erros em áreas maiores, particularmente em bacias até 12.000 km^2 . A Equação 6 (Kirpich Modificada) mostrou-se inadequada para qualquer contexto fora das condições originais (erros até 2.076 horas em bacias $> 5.000 \text{ km}^2$). Portanto, concluiu-se que, a Equação 1 (Mine e Tucci, 1999) permanece como alternativa mais confiável, porém apenas dentro dos limites validados. Este estudo estabelece o limite de 10 km^2 para a aplicação das fórmulas de Kirpich em bacias rurais ou urbanizadas. Para bacias

1) Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, brendacamila@ufpr.br

2) Universidade Federal do Paraná, Departamento de Hidráulica e Saneamento, detzel@ufpr.br

3) Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Ambiental, bleninger@ufpr.br

4) Universidade Federal do Paraná, Departamento de Hidráulica e Saneamento, kishi@ufpr.br

5) Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, terezamelo@alu.ufc.br

maiores que esse valor, há a necessidade da utilização de outras metodologias para estimativa do tempo de concentração.

Palavras-Chave – Hidrologia aplicada. Fisiografia. Fórmula de Kirpich.

INTRODUÇÃO

O tempo de concentração é uma variável importante em estudos hidrológicos, influenciando diretamente diversas análises, como a previsão de vazões afluentes em reservatórios (Mine e Tucci, 1999), a modelagem da qualidade da água em rios (Silva e Dziedzic, 1999) e as simulações hidrossedimentológicas em bacias urbanas (Figueiredo e Sousa, 2007). Entre os métodos empíricos desenvolvidos, destaca-se a equação de Kirpich (1940), originalmente desenvolvida para bacias rurais ($\leq 0,45 \text{ km}^2$) nos Estados Unidos da América (Mota e Kobiyama, 2014).

Apesar das limitações iniciais, com o passar dos anos, a fórmula foi adaptada para bacias de diferentes escalas e níveis de urbanização (Silveira, 2005), incluindo a versão modificada pelo DNER (1990) para áreas $> 0,80 \text{ km}^2$ (Cunha *et al.*, 2015). Diante da diversidade de adaptações do uso da equação original (Kirpich, 1940), há o questionamento se as modificações na fórmula de Kirpich impactam significativamente as estimativas de tempo de concentração.

Para responder a essa pergunta, este estudo compila variações da fórmula de Kirpich disponíveis no banco de dados da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro) e realiza uma análise comparativa experimental. Portanto, busca-se preencher duas lacunas principais: a sistematização histórica das adaptações da equação de Kirpich e a avaliação quantitativa de seus impactos nas estimativas de tempo de concentração.

METODOLOGIA

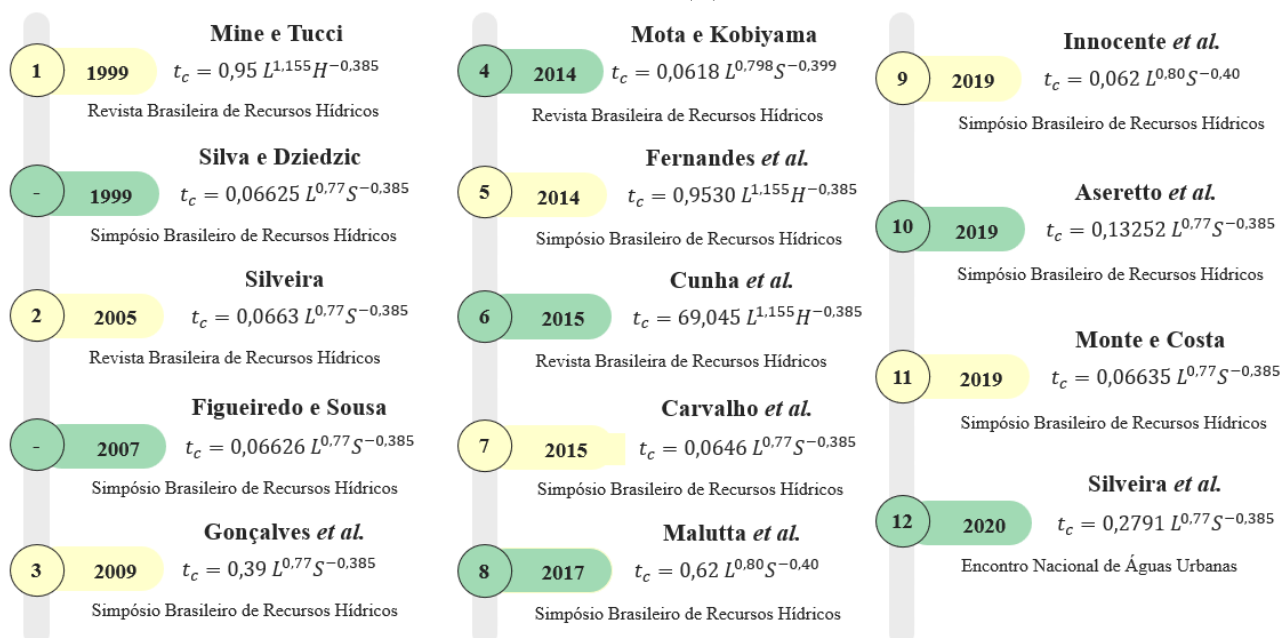
A revisão sistemática foi conduzida no repositório digital da ABRHidro, abrangendo os 45 simpósios disponíveis (<https://anais.abrhidro.org.br/events.php>), a Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH) e a Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA) (dados de 1998 a 2024). Os artigos foram triados manualmente com base no termo "Kirpich", resultando em 182¹ estudos que mencionavam a equação de Kirpich (1940).

Dos 182 artigos analisados, 85 destes apresentavam formulações explícitas da equação de Kirpich, das quais foram identificadas 14 formulações distintas (Figura 1). Três delas (Silva e Dziedzic, 1999; Silveira, 2005; Figueiredo e Sousa, 2007) diferem apenas a partir da terceira casa decimal, sendo consolidadas como uma única representação (Silveira, 2005), a Equação 2 (Figura 1). Dessa maneira, para esse estudo considerou-se 12 formulações para análise comparativa com dados experimentais.

A Figura 1 mostra que, em anos como 1999, 2014 e 2015, diferentes variações da fórmula foram publicadas, ainda que em eventos distintos. Todavia, foi possível verificar que, por exemplo, em 2019, três versões diferentes da chamada “Equação de Kirpich” foram identificadas no mesmo evento, Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), assim, evidenciando a diversidade de variações na aplicação da fórmula original.

¹<https://docs.google.com/spreadsheets/d/107nTAVJdUltLsJsLj2wIK0H2kOZvai96/edit?usp=sharing&ouid=115236903073850862559&rtfpof=true&sd=true>

Figura 1 – Linha do tempo representando a evolução das fórmulas de tempo de concentração com as respectivas equações selecionadas (de 1 a 12). Fórmulas padronizadas para unidades consistentes: tempo de concentração (t_c) em horas, comprimento do talvegue (L) em quilômetros (km), declividade (S) em metros por metro (m/m) e desnível (H) em metros (m).



Vale mencionar que, a equação de Aseretto *et al.* (2019) inverte L e S (Equação 10), por isso, assumiu-se como erro tipográfico. Cinco artigos citam "Kirpich Modificada" sem apresentar a fórmula, exceto Cunha *et al.* (2015), que define a Equação 6 (para bacias > 0,80 km²). A Equação 4 (Mota e Kobiyama, 2014) representa a fórmula original (Kirpich, 1940), enquanto a Equação 2 (Silveira, 2005) deriva de Rowe e Thomas (1942). A Equação 1 (Tabela 1), apresentada por Mine e Tucci (1999) é conhecida como a equação de *California Culverts Practice*, apresentada no livro de Chow *et al.* (1988). As demais equações da Figura 1 não foram amplamente adotadas ou replicadas em estudos independentes.

Foram utilizados três bancos de dados com medições diretas de tempo de concentração: bacias rurais (Kirpich, 1940, EUA): 6 bacias (Áreas: 0,005–0,45 km²; S: 0,02–0,09 m/m; L: 0,10–1,19 km); bacias urbanas/rurais (Silveira, 2005, EUA): 32 urbanas (Áreas: 0,005–50,10 km²; S: 0,0001–0,06 m/m; L: 0,05–17,86 km) e 29 rurais (Áreas: 0,11–11,162 km²; S: 0,01–0,19 m/m; L: 0,24–257 km); e, bacias rurais (Nem *et al.*, 2024, Coreia do Sul): 39 bacias (Áreas: 0,02–9,69 km²; S: 0,10–0,50 m/m; L: 0,30–5,30 km).

Kirpich (1940) cita que, usou dados experimentais de Ramser (1927), e não detalha a metodologia utilizada dos métodos experimentais. Silveira (2005) explica que para obtenção do tempo de concentração, usou-se um fator multiplicador de 1,417 para tempo de retardo, baseado em McCuen *et al.* (1984). Enquanto, Nem *et al.* (2024) calculou tempo de concentração a partir de eventos específicos, considerando dinâmicas de precipitação e resposta hidrológica.

Para quantificar o desempenho de cada equação, calculou-se erro percentual médio, o erro absoluto médio (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2). Com o objetivo de verificar se as diferenças entre as equações eram estatisticamente significativas, foi utilizado o teste de Wilcoxon para amostras pareadas. Também foi analisada a influência do tamanho da bacia hidrográfica sobre o erro de estimativa.

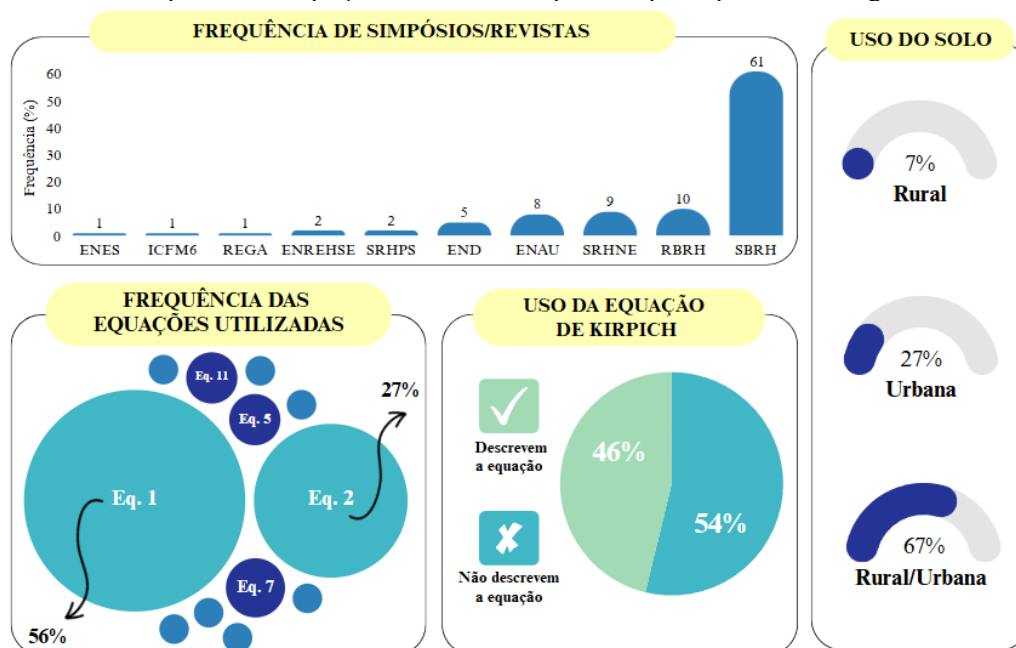
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Revisão Sistemática dos Artigos Científicos

A análise dos 182 artigos apresentada na Figura 2 mostra que, 54% citam a fórmula de Kirpich de forma implícita, tratando-a como conhecimento consolidado, enquanto 46% (85 artigos) apresentam a equação explicitamente. Dentre estes, a Equação 1 (*California Culverts Practice*), apresentada em Mine e Tucci (1999), foi a mais frequente utilizada (56% dos casos), seguida pela Equação 3 (Silveira, 2005) com 27% e pela Equação 7 (Carvalho *et al.*, 2015) com 4% de ocorrência.

A distribuição por evento ou periódico indicou que o SBRH concentrou 61% das menções à fórmula de Kirpich, destacando-se como principal fórum de discussão no tema. Periódicos como a RBRH (10%) e eventos como o SRHNE (9%) apareceram em seguida, com o ENAU (8%) chamando atenção pelo uso em contextos urbanos, sendo a aplicação distinta da recomendação original para bacias rurais. Quanto à tipologia das bacias estudadas, identificou-se predominância de aplicações em bacias mistas (67%), seguidas por bacias urbanas (27%) e rurais (apenas 7%).

Figura 2 – Distribuição percentual dos 182 artigos analisados que utilizaram a fórmula de Kirpich, sendo que a frequência das equações utilizadas foi aplicada apenas para os 85 artigos.

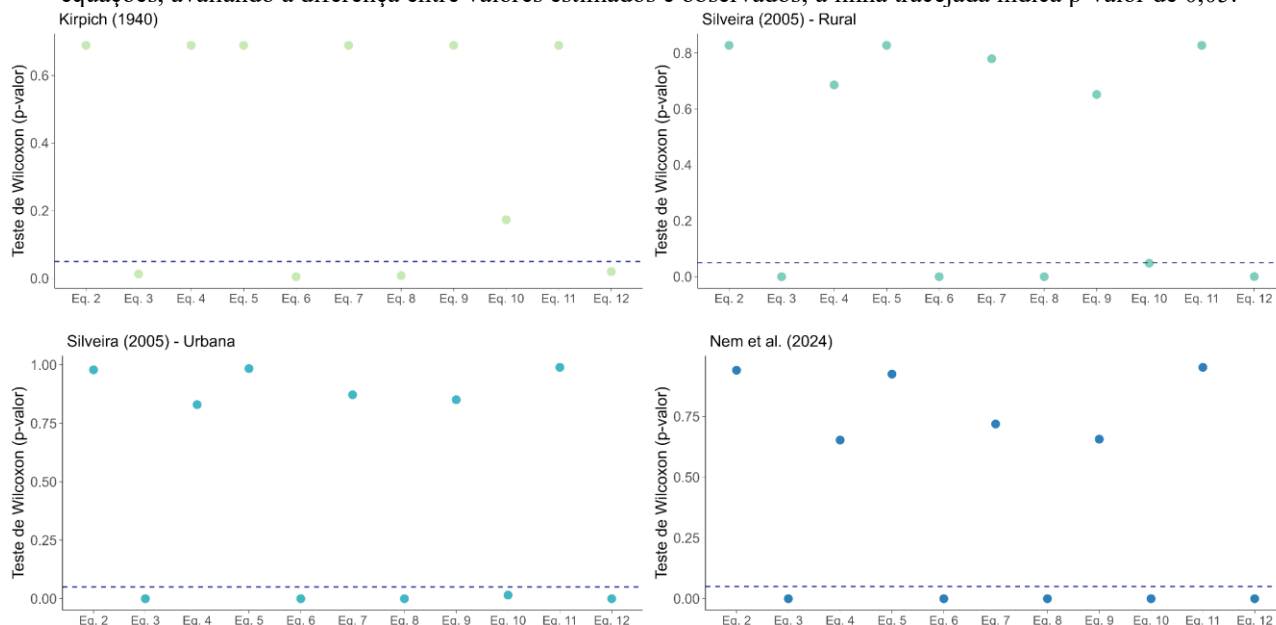


Análise das Equações Empíricas e Dados Experimentais

Os resultados do teste de Wilcoxon (Figura 3) indicam padrões distintos no desempenho das equações quando comparadas à Equação 1 (Mine e Tucci, 1999). Foi possível verificar que, embora a Equação 1 seja amplamente referenciada na literatura (Figura 2), seis outras formulações (Equações 2, 4, 5, 7, 9 e 11) apresentam equivalência estatística.

Por outro lado, as Equações 3, 6, 8 e 12 mostraram diferenças significativas ($p\text{-valor} < 0,05$) em todos os conjuntos de dados. A Equação 10 indicou $p\text{-valor}$ acima de 0,05 para dados de Kirpich (1940) mas, inadequada para bacias maiores ou urbanas ($p\text{-valor} \leq 0,015$). Por isso, as equações com $p\text{-valores}$ consistentemente baixos (3, 6, 8, 10 e 12) devem ser evitadas já que se distanciam da Equação 1 (amplamente difundida na literatura científica), especialmente em estudos com diferentes tipologias de bacias.

Figura 3 – Resultados do teste estatístico de Wilcoxon aplicado à Equação 1 (Mine e Tucci, 1999) e em todas as equações, avaliando a diferença entre valores estimados e observados, a linha tracejada indica p-valor de 0,05.

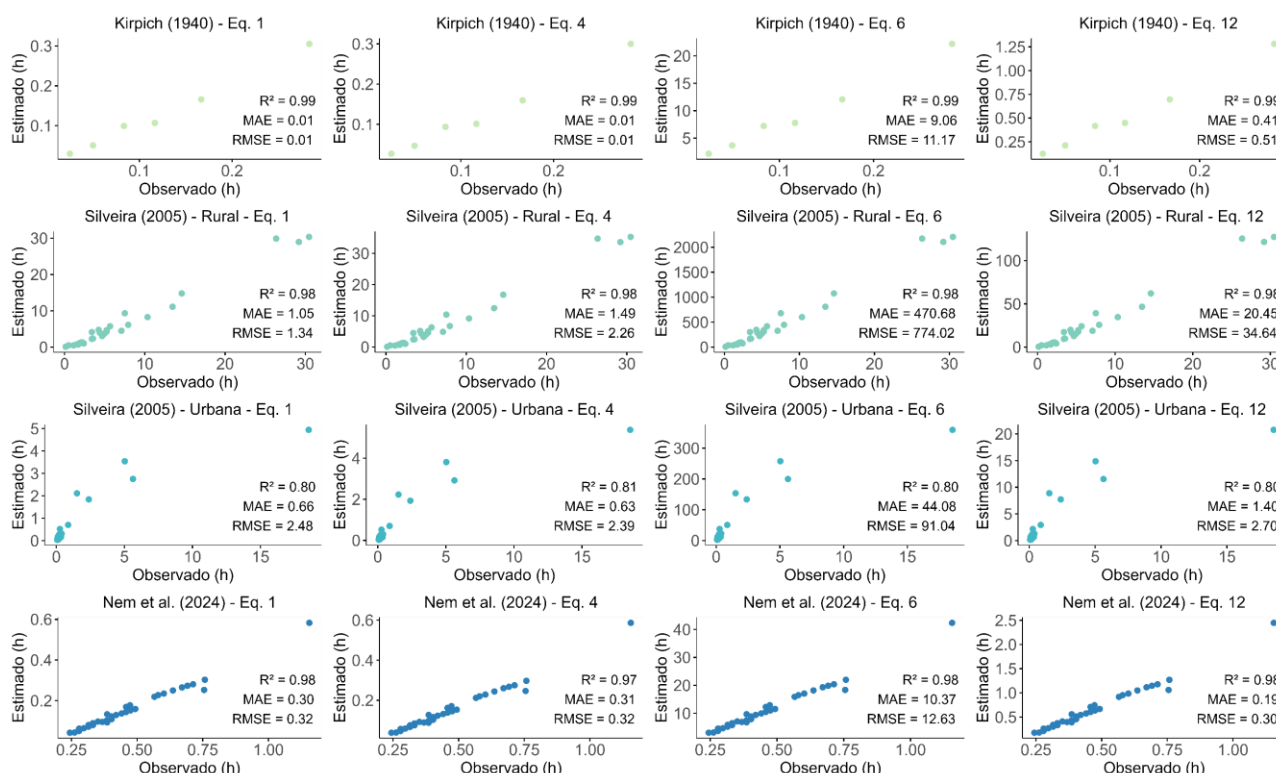


A Figura 4 mostra a análise de correlação linear entre as Equações 1, 4, 6 e 8 com os dados experimentais de todos os conjuntos de dados utilizados nesse estudo. Foi possível observar que, as Equações 1 (Mine e Tucci, 1999) e 4 (Mota e Kobiyama, 2014 - *Kirpich Original*) apresentaram equivalência estatística em bacias rurais, com valores de R^2 acima de 0,98 e erros relativamente baixos (por exemplo, RMSE de 0,32 horas para Nem *et al.*, 2024). Esta similaridade ocorre porque ambas derivam de relações lineares entre comprimento do talvegue e declividade, adequadas para bacias pequenas ($<0,45 \text{ km}^2$) em condições rurais.

No entanto, mesmo nestes casos, observa-se que os erros absolutos aumentam progressivamente conforme a área da bacia aumenta, indicando limitações mesmo no contexto rural (por exemplo, RMSE de 2,26 horas para dados de Silveira (2005)). Enquanto, a Equação 6 (*Kirpich Modificada*) apresentou erros significativos (RMSE de 774,02 horas em Silveira (2005) para bacia rural). Estes resultados comprovam que modificações lineares nos coeficientes da equação original são insuficientes para adequá-la a bacias com características distintas das estudadas por Kirpich. O MAE de 44,084 horas para bacias urbanas da Equação 6 demonstra inadequação para contextos urbanizados também.

A Figura 4 mostra que, nas bacias rurais predominou-se uma relação linear entre parâmetros físicos e tempo de concentração, com bom ajuste das equações 1, 4, 6 e 12 ($R^2 > 0,97$). Já nas urbanas, a não-linearidade desse relacionamento ficou evidente, com queda significativa nos valores de R^2 (para cerca de 0,80-0,81) mesmo para as equações de melhor desempenho. A Equação 12, utilizada no ENAU (2020), mostrou um comportamento intermediário, comparado com Equação 1 e Equação 6. O fato de ter obtido p-valores $<0,05$ nos 4 testes de Wilcoxon sugere que, apesar de incorporar possíveis ajustes não-lineares, não consegue ser uma solução confiável.

Figura 4 – Regressão linear das equações 1, 4, 6 e 12, contendo informações do R^2 , MAE e RMSE.

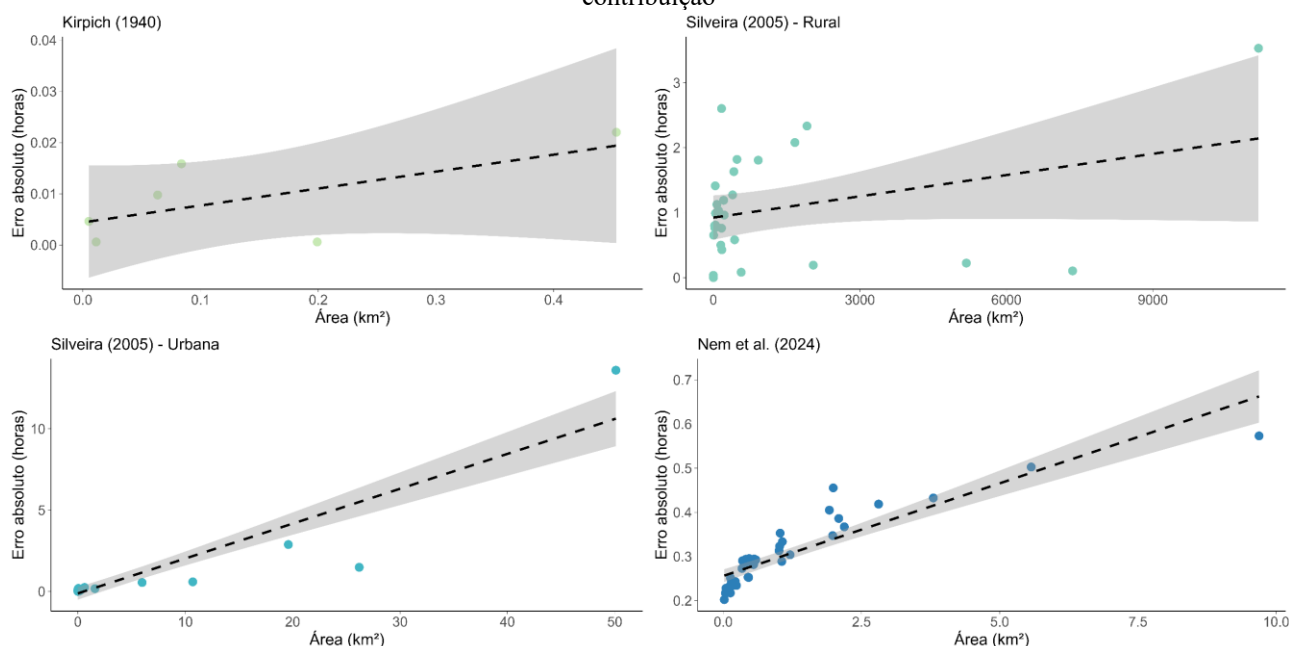


Análise das Equações Empíricas e Dados Fisiográficos das Bacias

A Equação 1 (Mine e Tucci, 1999), conforme Figura 5, apresenta erros moderados ($MAE < 1$ hora) em bacias pequenas ($< 10 \text{ km}^2$), todavia, seu desempenho degrada-se progressivamente em áreas maiores, como por exemplo, atingindo MAE de 13,6 horas em uma bacia urbana de $50,1 \text{ km}^2$. Ainda, em bacias rurais pequenas ($< 0,5 \text{ km}^2$) os erros da Equação 1 se mantêm abaixo de 0,5 hora, em bacias urbanas de 1 a 50 km^2 , o MAE salta para 0,2 a 13,6 horas.

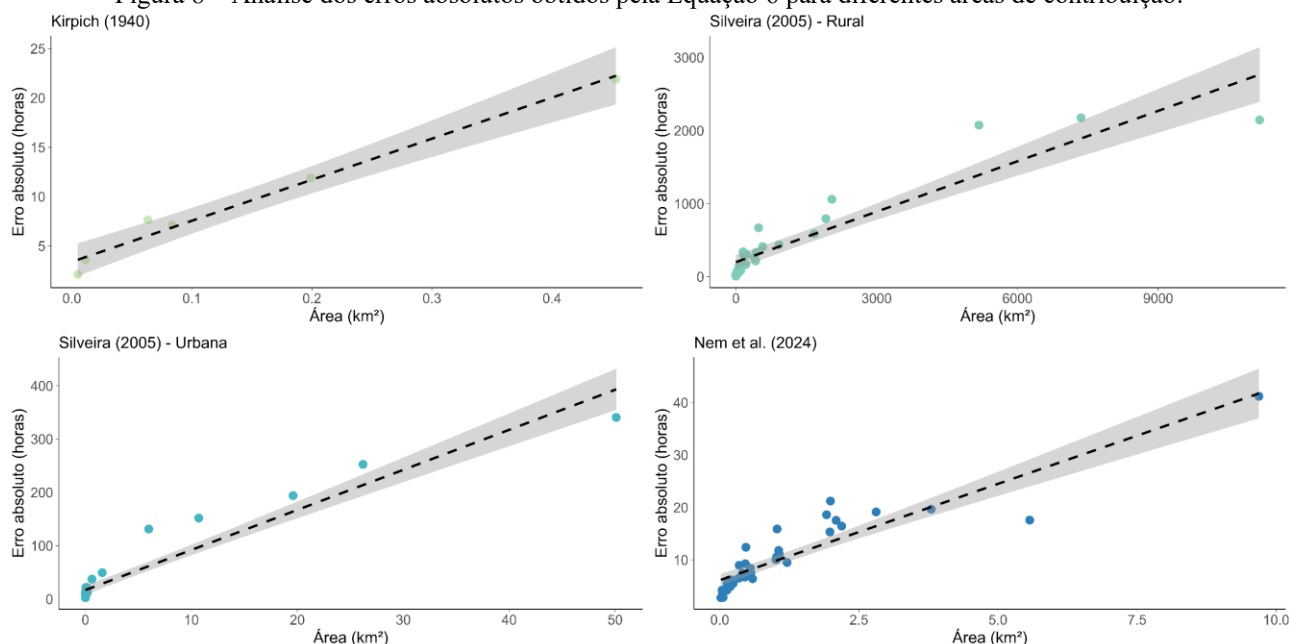
Esse comportamento sugere que fatores como impermeabilização e complexidade da rede de drenagem urbana introduzem não-linearidades não capturadas pelas fórmulas empíricas tradicionais. Quando os erros ultrapassam 10 horas (como ocorre frequentemente com a Equação 6), as equações empíricas podem levar a projetos superdimensionados (aumentando custos) ou subdimensionados (elevando riscos de inundação).

Figura 7 – Análise dos erros absolutos obtidos pela Equação 1 (Mine e Tucci, 1999) para diferentes áreas de contribuição



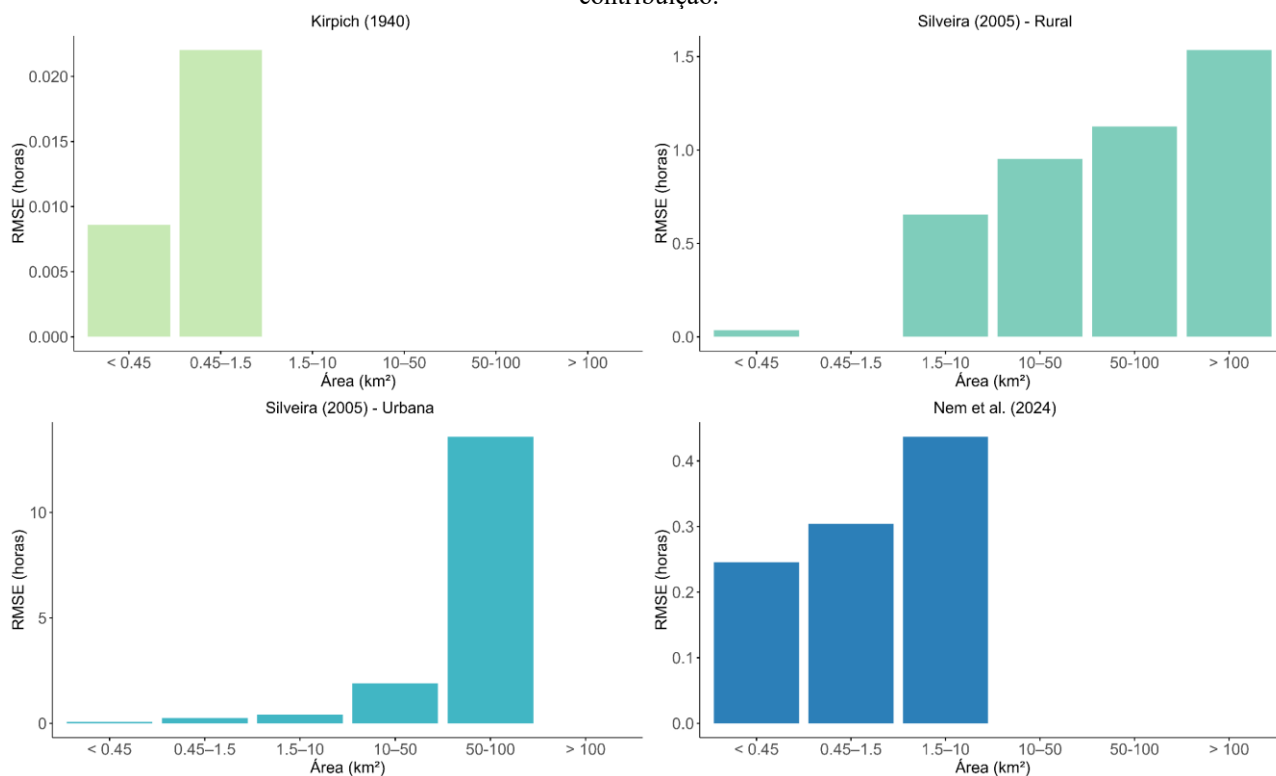
Já a Equação 6 (*Kirpich Modificada*), conforme Figura 8, apesar de desenvolvida para bacias > 0,8 km², mostrou-se inadequada, com erros muito altos (MAE > 100 horas em bacias rurais > 100 km² e MAE > 300 horas em bacias urbanas > 50 km²). Esses valores indicam que o método empírico, quando aplicado fora de sua escala original, pode levar a erros superiores a 10 dias na estimativa do tempo de concentração. Por exemplo, essa equação chega a subestimar o tempo de concentração em 2.076 horas (86 dias) em uma bacia rural de 5.180 km², evidenciando sua inadequação para grandes áreas.

Figura 8 – Análise dos erros absolutos obtidos pela Equação 6 para diferentes áreas de contribuição.



Os resultados da Equação 1 (Mine e Tucci, 1999) demonstram na Figura 9 que, para bacias rurais de Silveira (2005), o RMSE mantém-se abaixo de 0,65 horas (39 minutos) em áreas até 10 km². Já em bacias urbanas (Silveira, 2005), mesmo áreas pequenas (0,45 a 1,5 km²) apresentam RMSE de 0,25 a 0,30 horas, e acima de 1,5 km², os erros disparam, chegando a 13,6 horas em bacias de 50 a 100 km².

Figura 9 – Análise do RMSE obtidos pela Equação 1 (Mine e Tucci, 1999) para diferentes faixas de áreas de contribuição.



A análise da Figura 9 mostra que, diferenças significativas no desempenho da Equação 1 (Mine e Tucci, 1999) entre ambientes rurais e urbanos. Em bacias rurais, a Equação 1 mantém precisão aceitável (RMSE < 0,65 horas) para áreas ≤ 10 km², com erro crescente para 0,95 horas em bacias de 10 a 50 km². Em contextos urbanos, sua aplicabilidade é limitada a bacias < 10 km² (RMSE < 0,41 horas), sendo que em bacias coreanas rurais (Nem *et al.*, 2024) os erros foram 39 a 48% menores (RMSE: 0,25 a 0,44 horas), sugerindo que mesmo em regiões rurais, características locais como relevo e cobertura vegetal podem exigir ajustes.

CONCLUSÃO

Os resultados indicam que as modificações da equação de Kirpich impactam de forma significativa nas estimativas do tempo de concentração, comprometendo sua coerência metodológica em diferentes contextos. A análise de 182 artigos mostrou que 54% citam a equação de forma implícita, e que a versão de Mine e Tucci (1999) é a mais utilizada (56%), mesmo em bacias urbanas. Testes estatísticos mostraram que apenas sete das 12 equações analisadas apresentaram equivalência com essa versão, enquanto outras (3, 6, 8, 10 e 12) apresentaram divergências significativas. Esses achados reforçam a importância da seleção criteriosa de equações empíricas, especialmente fora das condições para as quais foram originalmente desenvolvidas.

A Equação 1 (Mine e Tucci, 1999) destacou-se como a mais robusta, com 56% de adoção na literatura (ABRHidro) e os menores erros ($MAE \leq 0,65$ horas em bacias rurais $\leq 10 \text{ km}^2$ e $\leq 0,3$ horas em urbanas $\leq 10 \text{ km}^2$). No entanto, o uso disseminado de fórmulas como a de Kirpich (originalmente desenvolvida para bacias rurais $\leq 0,45 \text{ km}^2$) em contextos urbanos e de grande escala (até 12.000 km^2) indicou limitações críticas, com erros que atingiram 13,6 horas em bacias urbanas de 50 km^2 e 2.076 horas em bacias rurais extensas ($> 5.000 \text{ km}^2$).

Os testes estatísticos (Wilcoxon) e análises de erro (RMSE/MAE) confirmaram que, bacias pequenas ($\leq 10 \text{ km}^2$ rurais, $\leq 10 \text{ km}^2$ urbanas) podem utilizar equações empíricas lineares (como a Equação 1). Enquanto, para bacias médias e grandes ($> 10 \text{ km}^2$ rurais, $> 10 \text{ km}^2$ urbanas), os métodos empíricos não são recomendados devido a erros exponenciais ($RMSE > 1$ hora para rural, $RMSE > 0,5$ horas para urbano).

Ainda, foi possível verificar que a Equação 6 (Kirpich Modificada) mostrou-se inviável em qualquer contexto fora das condições originais, com erros que podem comprometer projetos de engenharia. Assim, recomenda-se a priorização da Equação 1 apenas quando atendidos os limites de área (até 10 km^2 para bacias rurais e/ou urbanas). Além disso, recomenda-se evitar adaptações lineares de fórmulas clássicas (como a Equação 6), que não resolvem as não-linearidades hidrológicas em bacias urbanas ou extensas.

Por fim, este estudo forneceu critérios quantitativos para a seleção de métodos de estimativa do tempo de concentração, com foco nas variações da equação de Kirpich. Os resultados alertam para os riscos da aplicação indiscriminada de equações empíricas fora de suas escalas originais de desenvolvimento, comprometendo a precisão hidrológica. Destaca-se ainda a crescente fragmentação metodológica, em que, apenas no repositório da ABRHidro foram identificadas 12 fórmulas distintas autodenominadas "Kirpich", evidenciando a necessidade de maior rigor na adoção e adaptação dessas expressões no contexto técnico-científico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASERETTO, R. et al. (2019). “*Modelación hidrológica de las cuencas de los ríos: Ypané y Jejuí, utilizando HEC-HMS con fines de pronósticos hidrológicos en el Río Paraguay*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), Fortaleza, Nov. 2019, 1, pp. 205-220.
- CARVALHO, M. Â. C. C. de et al. (2015). “*Situação hidrológica da obra de implantação da Avenida Parque do Barbado utilizando o SWMM, em Cuiabá/MT*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), Curitiba, Nov. 2015, 1, pp. 250-265.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 572 p.
- CUNHA, S. F. et al. (2015). “*Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia*” in Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), 20, pp. 135-150.
- FERNANDES, R. de O. et al. (2014). “*Simulação de vazões máximas em uma microbacia urbana em Juazeiro do Norte, Ceará*” in Anais do Seminário de Recursos Hídricos do Nordeste (SRHNE), Fortaleza, Nov. 2014, 1, pp. 58-72.
- FIGUEIREDO, E. E. de; SOUSA, G. de (2007). “*Teste e validação do modelo MODFIPE de simulação hidrossedimentológica no semiárido paraibano*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), Belo Horizonte, Nov. 2007, 1, pp. 225-238.

- GONÇALVES, R. C.; XAVIER, L. N. R.; ROTUNNO FILHO, O. C. (2009). “*Modelagem hidrológica via SMAP e TOPMODEL na bacia de Pedro do Rio - Rio Piabanha*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), São Paulo, Nov. 2009, 1, pp. 345-358.
- INNOCENTE, C. et al. (2019). “*Combinando geomorfologia e padrões hidrodinâmicos do escoamento de base para melhorar a estimativa do tempo de concentração*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), Goiânia, Nov. 2019, 1, pp. 100-115.
- KIRPICH, T.P. “*Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds.*” J. of Civ. Eng., v.10, n.6, p. 362, 1940.
- MALUTTA, S. et al. (2017). “*Estimativa do tempo de concentração na bacia hidrográfica do campus da UFSC em Joinville*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), Porto Alegre, Nov. 2017, 1, pp. 200-215.
- MINE, M R. M.; TUCCI, C. E. M. (1999). “*Previsão em tempo real de vazões afluentes a reservatórios de usinas hidrelétricas*” in Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), 1, pp. 45-58.
- MONTE, K. R. do; COSTA, I. O. (2019). “*Análise de equações para a determinação do tempo de concentração em diferentes tipos de bacias hidrográficas*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), Belo Horizonte, Nov. 2019, 1, pp. 122-135.
- MOTA, A. de A.; KOBIYAMA, M. (2014). “*Reconsiderações sobre a fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração*” in Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), 19, pp. 105-120.
- NAM, S.; LIM, H.; CHOI, B.; LI, Q.; MOON, H.; CHOI, H. T. (2024). “*Characteristics and Estimation of the Time of Concentration for Small Forested Catchments in Steep Mountainous Terrain*”. Forests, 15, 186.
- SAMPAIO, A. S. et al. (2016). “*Análise do tempo de concentração em função das características fisiográficas em bacias rurais*” in Anais do Seminário de Recursos Hídricos do Nordeste (SRHNE), Recife, Nov. 2016, 1, pp. 150-164.
- SILVA, M. H. N. de L. e; DZIEDZIC, M. (1999). “*Análise e modelagem da qualidade da água em rios*” in Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), Natal, Nov. 1999, 1, pp. 132-145.
- SILVEIRA, A. L. L. da (2005). “*Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais*” in Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), 10, pp. 75-89.
- SILVEIRA, B. G.; CORRÊA, F. V.; THEBALDI, M. S. (2020). “*Uso do software CDREN® para dimensionamento de redes de microdrenagem pluvial*” in Anais do Encontro Nacional de Águas Urbanas (ENAU), Rio de Janeiro, Mai. 2020, 1, pp. 85-99.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Prof. Dra. Aline Mota da Universidade Federal da Fronteira Sul pelo fornecimento da cópia original de Kirpich, publicado em 1940.

Tobias Bleninger agradece o apoio da bolsa de produtividade do Conselho Nacional de Pesquisa, CNPq, processo: 313491/2023-2, edital: no. 09/2023