
Reconsiderações sobre a Fórmula de Kirpich para o cálculo de tempo de concentração

Revisiting Kirpich's Formula for calculating time of concentration

Aline de Almeida Mota¹ e Masato Kobiyama²

¹Bolsista do CNPq, Doutoranda do PPG - Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH/UFRGS,

Professora assistente-A, Engenharia Ambiental – Campus Chapecó/UFFS

aline.mota@uffs.edu.br

²Bolsista do CNPq, Professor titular, IPH/UFRGS

masato.kobiyama@ufrgs.br

Recebido: 28/01/14 - Revisado: 01/10/14 - Aceito: 22/10/14

RESUMO

O presente trabalho apresenta a história sobre a origem e desenvolvimento da fórmula de Kirpich para calcular o tempo de concentração (t_c) e a partir disso demonstra um equívoco que existe nesta fórmula. Por fim analisou-se o erro relativo causado a este equívoco considerando duas situações: (i) valores de comprimento da bacia (L) medido ao longo do curso d'água, e de declividade do curso d'água (S) dentro do intervalo correspondente ao das bacias componentes do banco de dados utilizado na elaboração da fórmula; e (ii) valores de L e S em um intervalo mais amplo, porém possível em bacias reais. Na situação (i) o erro relativo nos valores de t_c , estimados com a fórmula de Kirpich varia de 2 a 9%, e na situação (ii) o erro relativo pode chegar a 30%. A fórmula de Kirpich, na verdade não foi publicada por ele, e nem se originou somente do banco de dados que ele utilizou. Demonstrou-se a importância de ainda hoje se buscar a fonte original de publicação antes de citar, e/ou aplicar teorias, técnicas, métodos e inclusive fórmulas.

Palavras Chave: Fórmula de Kirpich. Tempo de concentração.

ABSTRACT

The present work describes the history of Kirpich's Formula which can be used to calculate the time of concentration (t_c) and the misconception that exists regarding its well-known version. Finally, the relative error due to this misconception was evaluated considering two situations: (i) the interval of values of watershed length (L) measured along the water course, and the water course slope (S) corresponding to that of the data base used to elaborate the formula; (ii) more extensive interval of values of L and S, which could occur in real basins. The relative error of the t_c values in the situation (i) varies between 2 and 9%, and in situation (ii) it can be 30%. Kirpich's Formula was actually not published by him, and was not even elaborated only from the data base he used. The importance of looking for the original publication before citing and/or applying theories, techniques, methods, and formulas was demonstrated.

Keywords: Kirpich's Formula. Time of concentration.

INTRODUÇÃO

O conceito de tempo de concentração (t_c) foi claramente exposto pela primeira vez em 1851, pelo engenheiro civil Thomas James Mulvany, criador do tão conhecido e aplicado Método Racional (BISWAS, 1970; SINGH, 1976). Em seu trabalho para a Instituição de Engenheiros Civis da Irlanda, Mulvany (1851) estudou uma maneira para aprimorar a estimativa da produção de escoamento superficial de uma bacia hidrográfica, ou de uma determinada área de drenagem, resultante de um evento de chuva. Então, este autor definiu t_c como o tempo necessário para a chuva que cai no ponto mais remoto da bacia chegar à exutória, ou ainda, até que toda a área da bacia contribua para a vazão na exutória. Entende-se que neste momento acontece a vazão máxima, e por isso, segundo Brutsaert (2005), o conceito de t_c é a base do Método Racional.

A partir de então, o t_c passou a ser amplamente pesquisado e utilizado. Em geral, praticamente qualquer análise ou projeto hidrológico precisa de pelo menos um parâmetro de tempo de resposta da bacia, e na maioria das vezes esse parâmetro é o t_c (McCuen et al., 1984). As aplicações do t_c são diversas. Por exemplo: implementação de sistemas de alerta contra inundações, projetos de drenagem urbana, separação do hidrograma, e definição do intervalo de monitoramento hidrológico.

Além disso, o t_c tem relevância científica, pois revela a interação entre diversas características da bacia hidrográfica, do evento de chuva, das condições climáticas da região, e outros que influenciam no t_c (MOTA, 2012). Portanto pode ser útil também em estudos sobre mecanismos de geração de vazão.

Até o presente momento, diversas fórmulas foram desenvolvidas para o cálculo de t_c , por exemplo: fórmula de Pasini (1914) e de Giandotti (GREPPI, 2005), fórmula de Izzard (KIBLER, 1982), fórmula de Johnstone e fórmula de Dooge (DOOGE, 1973), fórmula de Kerby-Hathaway (HATHAWAY, 1945; KERBY, 1959); fórmula de Chow (1962); fórmula de Morgali, Linsley, Woolhiser e Liggett (WOOLHISER e LIGGETT, 1967); fórmula de SCS lag (KENT, 1973); fórmula de McCuen et al. (1984); fórmula de Loukas e Quick (1996); e fórmula Simas e Hawkins (1996).

Percebe-se que vários artigos que trataram do assunto de t_c e/ou propuseram fórmulas de t_c são antigos, e na maioria das vezes, é difícil ter acesso aos artigos originais. Então, o que acaba acontecendo na prática é a citação de outra citação, sem a verificação dos originais, como também observou Silveira (2005). Um exemplo disso é a fórmula de Kirpich (1940), uma das mais conhecidas e aplicadas tanto no meio técnico como acadêmico.

Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi apresentar a história sobre a fórmula de Kirpich (1940) e a partir disso demonstrar o equívoco que existe na fórmula, e por fim avaliar o erro relativo devido a este equívoco.

Por conta da natureza da análise histórica, o presente trabalho respeitou as unidades do artigo original, assim utilizando unidades do sistema inglês: pés, milhas, acres.

MONITORAMENTO DE RAMSER (1927)

Kirpich (1940) fundamentou sua fórmula nos dados coletados em campo, pelo então engenheiro de drenagem Charles Ernest Ramser do Departamento de Agricultura dos EUA (*United States Department of Agriculture*) para seu trabalho publicado em 1927. A seguir será discutido brevemente sobre a parte experimental do trabalho de Ramser (1927).

Seu objetivo principal era determinar as taxas de escoamento de pequenas áreas agrícolas. A coleta de dados foi realizada entre 1917 e 1918 com um sistema de monitoramento automático de nível d'água em 6 canais, sendo 2 equipados também com *Weir box*, um dispositivo desenvolvido por Cone (1916) para medição de vazão próprio para canais onde existe propensão para acúmulo de sedimento argiloso e/ou siltoso no leito. Este dispositivo depois de aprimorado em Cone (1917), foi denominado calha Venturi, que por sua vez foi modificado por Parshall (1928) e resultou na calha Parshall (KILPATRICK, 1965).

Ramser (1927) também realizou monitoramento pluviométrico automático em um local. No total foram monitoradas 7 bacias hidrográficas, numeradas de 1 a 7, porém a bacia 2 foi excluída da análise. Todas as bacias são embutidas na 5, sendo que 1 e 2 são embutidas na bacia 3. As bacias são rurais, utilizadas principalmente para agricultura, e suas porcentagens de cobertura florestal variam de 0 a 55,5 %. O relevo foi caracterizado como ondulado a declivoso. Algumas apresentam sérios problemas de erosão, e outras ainda estão em bom estado de conservação. Ramser (1927) mediu t_c calculando o intervalo de tempo necessário para o nível d'água em cada canal monitorado ir do menor até o maior valor em cada evento pluviométrico. Os valores calculados de t_c variaram de acordo com as características da chuva, o grau de saturação da bacia, etc., porém a média para cada bacia foi representativa (RAMSER, 1927).

DESENVOLVIMENTO DA FÓRMULA DE KIRPICH (1940)

Com base nos dados de Ramser (1927), o engenheiro civil Phillip Zalman Kirpich, contratado como engenheiro hidráulico assistente no Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (*U.S. Army Corps of Engineers*) publicou o artigo de apenas uma página: "KIRPICH, Z.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. *J. of Civ. Eng.*, v.10, n.6, p. 362, 1940.". Normalmente, os trabalhos que aplicam ou mencionam a fórmula de Kirpich citam este artigo como fonte, porém, neste trabalho sua fórmula não foi apresentada explicitamente, e sim apenas na forma de gráfico e curva de regressão. Aqui nota-se que, como os resultados obtidos em Kirpich (1940) se baseiam do trabalho de Ramser (1927), vários autores chamam a fórmula Kirpich-Ramser, por exemplo Bell e Om Kar (1969) e Hadadin et al. (2013).

Rowe e Thomas (1942) apresentaram uma fórmula (Equação 1) para cálculo de t_c que foi desenvolvida utilizando também os dados de Ramser (1927) e de outras fontes que não foram especificadas (CHOW, 1962; WATT; CHOW, 1985).

$$t_c = \left(\frac{11,9 \cdot L^3}{H} \right)^{0,385} \tag{1}$$

onde t_c é o tempo de concentração, em horas; L é o comprimento da bacia medido ao longo do curso d'água a partir da exutória até o ponto mais elevado da bacia, em milhas; e H é o desnível entre estes mesmos 2 pontos, em pés.

Kirpich (1940) correlacionou o tempo de concentração com o que ele denominou fator, que é a divisão $L/\sqrt{S_1}$, em que ($S_1 = H/L$).

Então, obtém-se:

$$\frac{L^3}{H} = \left(\frac{L}{\sqrt{S_1}} \right)^2 \tag{2}$$

Então, convertendo L da Equação 1 de milhas para pés, e substituindo a Equação 2 na Equação 1, tem-se:

$$t_c = \left[\left(\frac{11,9}{5280^3} \right) \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_1}} \right)^2 \right]^{0,385} \tag{3}$$

que resulta em:

$$t_c = 1,30 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_1}} \right)^{0,77} \tag{4}$$

onde t_c é o tempo de concentração, em horas; L é o comprimento da bacia medido ao longo do curso d'água a partir da exutória até o ponto mais elevado da bacia, em milhas; e S_1 é a declividade do curso d'água, calculado como H/L , em pé/pé.

Assim, foram Rowe e Thomas (1942) que primeiramente na história divulgaram a Equação 4, que é amplamente conhecida como Fórmula de Kirpich. Tal fórmula é resultado da regressão não apenas dos dados de Ramser (1927), mas também de outros dados (WATT; CHOW, 1985). Provavelmente por esse motivo, quando é realizado o ajuste dos dados apresentados por Kirpich (1940) (Tabela 1), a equação obtida para a curva de regressão (Figura 1) é diferente, isto é:

$$t_c = 9,67 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_1}} \right)^{0,798} \tag{5}$$

onde t_c , L e S_1 são as mesmas variáveis e têm as mesmas unidades da Equação 4. Em 2006, a primeira reimpressão de Brutsaert (2005), também apresenta esta versão corrigida (Equação 5) como fórmula de Kirpich.

Além disso, a proposta de Kirpich (1940) era pela utilização em conjunto das duas curvas de regressão apresentadas em seu trabalho, uma com o fator K_1 e outra com o fator K_2 . A diferença entre os fatores é a declividade utilizada. Enquanto S_1 é a declividade do curso d'água, S_2 é a declividade média da bacia toda. Isso significa que S_1 é simplesmente H_1/L ; e $S_2 = H_2/A$, em que H_2 é a altura média da bacia acima da cota da exutória, em pés e A é a área da bacia, em milhas terrestres. A equação com o fator K_2 não se difundiu, provavelmente pela maior dificuldade em se estimar H_2 , necessária para o cálculo do fator K_2 .
(a)

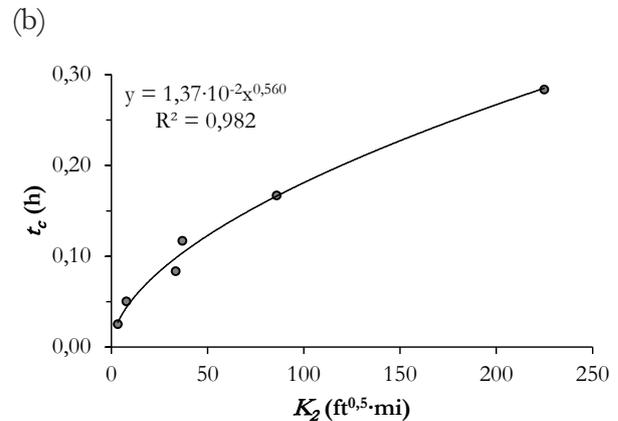
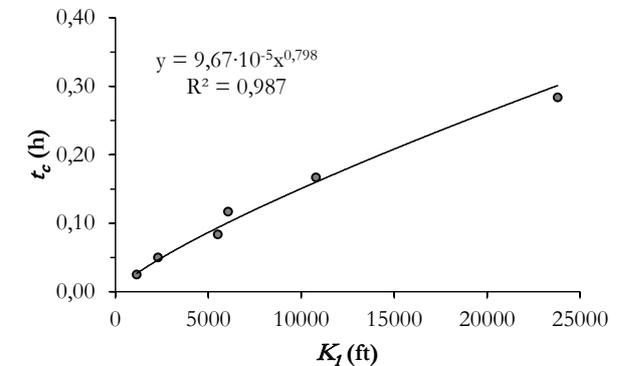


Figura 1 – Equações das curvas de ajuste propostas por Kirpich (1940). (a) Fator K_1 ; e (b) Fator K_2

Tabela 1 – Dados utilizados por Kirpich (1940)

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Bacia	t_c (min)	A (acres)	% de floresta	L (ft)	S_1 (ft·ft ⁻¹)	H_2 (ft)	S_2 (ft·mi ⁻²)	K_1 (ft)	K_2 (ft ^{0,5} ·mi)
1	5,0	20,70	14,0	1220	0,0489	43,0	1330	5520	33,5
3	10,0	49,20	24,7	2152	0,0399	48,0	627	10800	86,0
4	7,0	15,70	38,9	1418	0,0544	36,0	1468	6080	37,0
5	17,0	112,00	23,9	3933	0,0274	54,0	308	23800	225,0
6	1,5	1,25	0,0	359	0,0978	17,6	11300	1150	3,4
7	3,0	2,79	55,5	672	0,0853	32,0	7340	2300	7,9

AVALIAÇÃO DO ERRO

Esta correção na fórmula acarreta em valores diferentes para t_c . Esta diferença será considerada neste trabalho como sendo um erro relativo. O erro relativo claramente depende do valor dos parâmetros L e S . Assim, a primeira avaliação do erro relativo foi feita considerando apenas a mesma faixa de valores de L e S das bacias do banco de dados utilizado para gerar a fórmula, já que este intervalo deve ser o ideal para a aplicação da fórmula de Kirpich. Isso significa adotar L entre 350 e 4000 pés, e S de 0,025 a 0,1. Nesta situação o erro relativo varia de 2 a 9%, sendo que o resultado é mais sensível a variações de L (Figura 2).

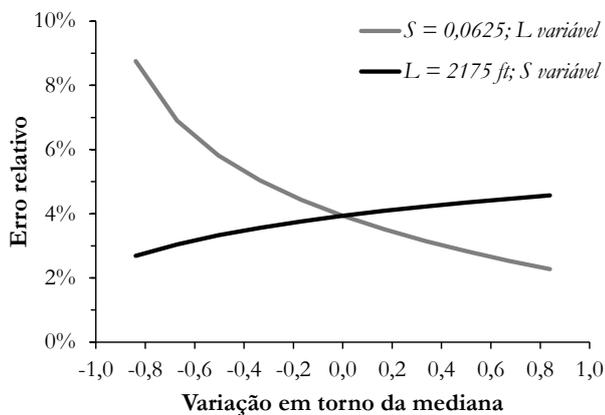


Figura 2 – Erro relativo entre os resultados obtidos com as Equações 4 e 5 para valores de S e L dentro do intervalo que foi obtida a fórmula de Kirpich

Muitas vezes este intervalo de aplicação não é observado, e o próprio Kirpich (1940) limita a aplicação da fórmula apenas segundo a faixa de valores de área das bacias (de 1 a 200 acres) e não se refere a valores de L e S . Por isso, também foi avaliado o erro relativo para aplicações dentro de um intervalo maior, e possível na natureza. Os intervalos adotados foram: $10^2 \leq L \leq 10^7$ (em pés); e $10^{-4} \leq S \leq 10^{-1}$. Neste caso o erro relativo pode chegar a 30% se for aplicada a fórmula comumente usada (Figura 3), isso é muito maior do que se for respeitado o intervalo de desenvolvimento da fórmula.

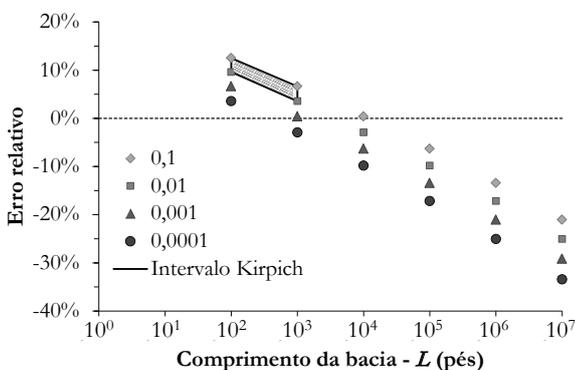


Figura 3 – Erro relativo entre os resultados obtidos com as Equações 4 e 5 para valores de S e L dentro de uma faixa coerente, porém maior do que o intervalo que foi obtida a fórmula de Kirpich

CONCLUSÕES

O avanço da ciência está vinculado às publicações científicas. Teorias, técnicas, métodos e inclusive fórmulas aplicadas atualmente foram desenvolvidas em uma época em que a informação não estava disponível em meios tão acessíveis como a internet. Justamente por isso, hoje ainda é importante buscar a fonte original de publicação antes de citar, e/ou aplicar qualquer uma destas ferramentas.

A principal conclusão diz respeito à importância de se verificar o artigo original por diversos motivos: confirmar as informações descritas em outros trabalhos que citam o artigo original; reconhecer o contexto e peculiaridades que ainda não foram notadas por outros autores sobre a teoria, técnica, método, ou fórmula que se pretende aplicar.

A fórmula de Kirpich, na verdade não foi publicada por ele em 1940, e nem se originou do mesmo banco de dados que ele utilizou.

O erro relativo entre o t_c calculado com a versão corrigida e a disseminada da fórmula de Kirpich pode chegar a 30% dependendo dos valores de L e S . Portanto, antes de aplicar a fórmula é recomendável verificar se os valores de L e S se encaixam no intervalo adequado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro (bolsas) concedido pelo Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq). Além disso, somos especialmente gratos ao Prof. Fernando Grison (atualmente professor no Curso de Engenharia Ambiental – Campus Chapecó/UFES) que cumpriu a difícil tarefa de encontrar na internet o artigo original de Kirpich (1940).

REFERÊNCIAS

- BELL, F.C.; OM KAR, S. Characteristic response times in design flood estimation. *J. Hydrol.*, v.8, n.2, p. 173-196, 1969.
- BISWAS, A.K. History of hydrology. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1970, 336 p.
- BRUTSAERT, W. Hydrology: an introduction. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 605 p.
- CHOW, V.T. Hydrologic determination of waterway areas for the design of drainage structures in small drainage basins. *Engineering Experiment Station Bulletin n.462*. Urbana, Ill.: University of Illinois College of Engineering, 1962. 104 p.
- CONE, V.M. A new irrigation weir. *Jour. Agr. Research.*, v.5, n.24, p. 1127-1143, 1916.
- CONE, V.M. The venturi flume. *Jour. Agr. Research.*, v.9, n.4, p. 115-129, 1917.

- DOOGE, J.C.I., The linear theory of hydrologic systems. USDA, Tech. Bull. n. 1468, U.S. Gov. Print. Off, Washington, D.C., 1973. 327p.
- GREPPI, M. Idrologia. 4a ed. Milano: Ed. Ulrico Hoepli, 2005. 371p. Reimpressão.
- HADADIN, N.; TARAWNEH, Z.; SHATANAWI, K.; BANIHANI, Q.; HAMDI, M.R. Hydrological Analysis for Floodplain Hazard of Jeddah's Drainage Basin, Saudi Arabia. Arab. J. Sci. Eng., v.38, n.12, p. 3275-3287, 2013.
- HATHAWAY, G.A. Design of drainage facilities. ASCE transactions, v.110, p. 697-730, 1945.
- KENT, K.M. A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds. SCS-TP-149, USDA, Soil Conservation Service, Washington: D.C., 1973, 21 p.
- KERBY, W.S. Time of concentration for overland flow. Engineers notebook, v.174, p. 60, 1959.
- KIBLER, D.F. Desk-top methods for urban stormwater calculation, In: KIBLER, D.F. (ed.), Urban stormwater hydrology. American Geophysical Union, v.3, p. 87-135, 1982.
- KILPATRICK, F. A. Book 1: Hydraulic measurement and computation: Use of flumes in measuring discharge at gaging stations. U.S. Geological Survey , 1965. Chapter 16, 27p.
- KIRPICH, T.P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. J. of Civ. Eng., v.10, n.6, p. 362, 1940.
- LOUKAS, A.; QUICK, M.C. Physically-based estimation of lag time for forested mountainous watersheds. Hydrol. Sci. J., v.41, n.1, p.1-19, 1996.
- McCUEN, R.H.; WONG, S.L.; RAWLS, W.J. Estimating urban time of concentration. J. Hydraul. Eng., v.110, n.7, p. 887-904, 1984.
- MOTA, A.A. Tempo de concentração em pequena bacia experimental. 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – PPGEA, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- MULVANY, T.J. On the use of self-registering rain and flood gauges, in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment. Proc. Inst. Civ. Eng. (Irel.), v.4, pt.2, p. 18-33, 1851.
- PARSHALL, R.L. The improved venture flume. The Colorado Agricultural College. Bulletin n.336, 1928. 87 p.
- RAMSER, C.E. Runoff from small agricultural areas. Jour. Agr. Research., v.34, n.9, 1927
- ROWE, R.R.; THOMAS, R.L. Comparative hydrology pertinent to California culvert practice. California Highways and Public Works, v.20, n.9, p. 6-11, 1942.
- SILVEIRA, A.L.L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Rev. Bras. Recur. Hídri., v.10, n.1, p.5-23, 2005.
- SIMAS, M.J.; HAWKINS, R.H. Lag time characteristics for small watersheds in the U.S., 1996. p. 1-7.
- SINGH, V.P. Derivation of time of concentration. J. Hydrol., v.30, n.1-2, p. 147-165, 1976.
- WATT, W.E.; CHOW, K.C.A. A general expression for basin lag time. Can. J. Civ. Eng., v.12, n.2, p. 294-300, 1985.
- WOOLHISER, D.A.; LIGGETT, J.A. Unsteady, One-Dimensional Flow over a Plane the Rising Hydrograph. Water Resour. Res., v.3, n.3, p. 753-771, 1967.