XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

DETERMINAÇÃO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO GEOMORFOLÓGICO EM UMA SUB-BACIA DO ITAJAÍ

Leonardo Vilela Steiner [1] *; Camyla Innocente dos Santos* [2]*; Paula Cunha David* [3] *& Pedro Luiz Borges Chaffe* [4]

RESUMO – O hidrograma unitário (HU) é uma ferramenta muito utilizada para o cálculo de hidrogramas em regiões com poucos dados hidrológicos. Por conta da sua facilidade de utilização, diversos modelos sintéticos de HU foram criados para simular o comportamento de bacias hidrográficas a partir de dados hidrológicos, geomorfológicos ou de uma combinação de ambos. O objetivo deste trabalho foi determinar o HU geomorfológico para uma sub-bacia do rio Itajaí. Utilizou-se o método de Rosso (1984) com base em dados hidrológicos diários de 1991-2004 disponibilizados pela ANA. Selecionaram-se 15 eventos máximos anuais de chuva-vazão, com discretização temporal de um dia. O número de reservatórios (n) calculado foi de 5,41 e o fator de decaimento (k) variou entre 0,22 e 0,37, respectivamente, o que implica em hidrogramas de altura de pico acentuada e um tempo de pico mais distante da origem. O tempo de base do HU médio foi de aproximadamente cinco dias.

ABSTRACT– The unit hydrograph (UH) is a common tool for calculating hydrographs in regions with few hydrologic data. Due to its simplicity, a wide range of synthetic UH models have been created to simulate catchment responses using hydrological, geomorphological data or a combination of both. The objective of this study was to determine the geomorphologic unit hydrograph for a subbasin of the Iajaí River. The UH proposed by Rosso (1984) were used with daily data for the period of 1991-2014 and 15 maximum annual rainfal-runoff events with one day temporal discretization. The calculated number of linear reservoirs (n) were 5,41 and storage coefficient (k) varied between 0,22 e 0,37, wich generated hydrographs with higher peak time and sharper discharge wave. Furthermore, the HU base time was approximately five days.

Palavras-Chave – hidrograma unitário, inundações, Nash

1) Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, leonardosteiner02@gmail.com
2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, camyla.innocente@gmail.com
3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, paulacunhadavid@gmail.com
4) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, pedro.chaffe@ufsc.br

INTRODUÇÃO

A região do Vale do Itajaí localizada no estado de Santa Catarina é composta pelas bacias hidrográficas dos rios Itajaí-Açú e Camboriú, onde se localizam 60 municípios catarinenses (SDS/SC, 2017), dentre eles Blumenau, conhecido pela ocorrência de enchentes de grande magnitude (Marcelino *et al.*, 2006). Além de ser um importante polo econômico e de concentrar aproximadamente 22,9% da população do estado (IBGE, 2010), o Vale do Itajaí também é caracterizado pela ocorrência de inundações, respondendo por 23% dos 449 registros de desastres naturais no estado entre 1991 e 2012 (CEPED/UFSC, 2013).

Devido aos impactos ambientais, sociais e econômicos relacionados às inundações faz-se necessário o estudo hidrológico dos eventos de chuva-vazão para minimização dos riscos associados a esse fenômeno (Casagrande *et al.*, 2017). Ao longo dos anos, diversos modelos hidrológicos foram propostos com o objetivo de prever o comportamento de bacias hidrográficas frente às variações de precipitação e, consequentemente, de escoamento (Costa *et al.*, 2019; Devia *et al.*, 2015; Pechlivanidis *et al.*, 2011; Steinmetz *et al.*, 2019). No entanto, por conta das particularidades de cada bacia e do número elevado de parâmetros a serem considerados nesse tipo de análise, métodos simplificados como do Hidrograma Unitário (HU) podem ser uma alternativa, principalmente em bacias com pouca disponibilidade de dados (Bhuyan *et al.*, 2015; Cleveland *et al.*, 2008).

A teoria do HU, primeiramente proposta por Sherman (1932) e fundamentada por Dooge (1959) considera que existe uma relação linear entra a unidade de precipitação efetiva que cai uniformemente na bacia e o hidrograma por ela gerado. Idealizado primeiramente para grandes bacias, o modelo foi largamente difundido e aplicado em bacias de diferentes dimensões devido à sua simplicidade de utilização, possibilitando a criação de modelos sintéticos de HU para bacias de características hidrológicas e/ou geomorfológicas semelhantes (Chow *et al.*, 1989; Collischonn; Dornelles, 2013).

Tendo em vista esses aspectos, o presente trabalho tem como objetivo determinar o HU geomorfológico de uma sub-bacia do Itajaí, considerando eventos máximos anuais de chuva-vazão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia selecionada corresponde à área de contribuição da estação fluviométrica 83677000 abrangendo 1435 km² (Figura 1).

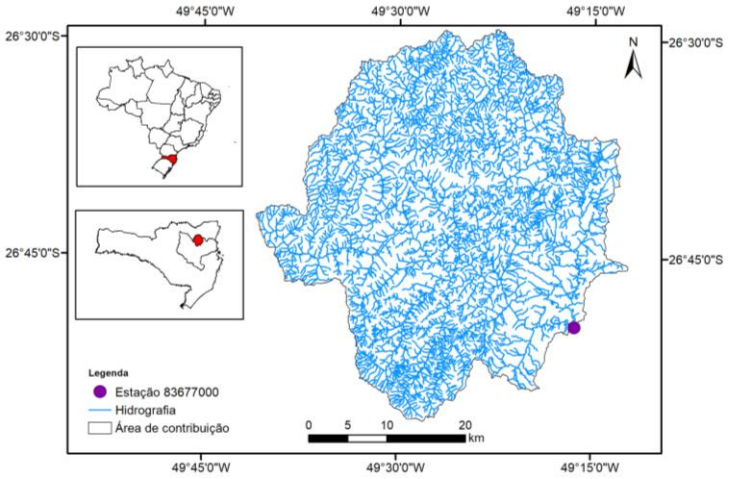

Figura 1 – Localização da bacia de estudo.

Os dados fluviométricos foram obtidos através da ferramenta *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA) enquanto os dados pluviométricos utilizados tiveram como base os valores interpolados por Xavier, King e Scanlon (2016), entre os anos 1991 e 2004. A Figura 2 ilustra a série de dados considerada, sendo os círculos vermelhos as vazões máximas anuais.

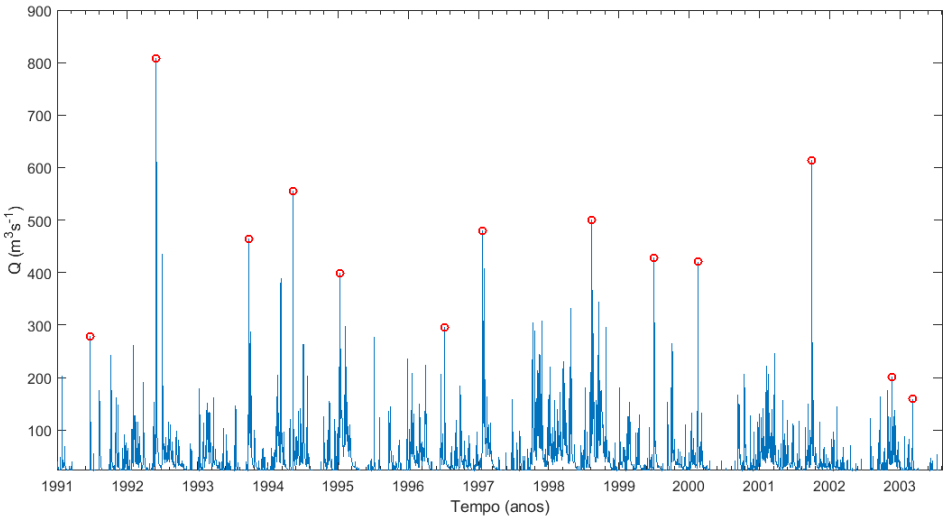

Figura 2 – Série de histórica de vazões da estação 83677000.

Determinação do hidrograma unitário

O modelo de HU utilizado no estudo foi proposto por Rosso (1984), o qual relaciona as leis de Horton aos parâmetros determinados pelo HU formulado por Nash (1957):

$$q(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)}\left(\frac{t}{n}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad (1)$$

$$n = 3{,}29\left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0{,}78} {R_L}^{0{,}07} \quad (2)$$

$$k = 0{,}70\left(\frac{R_A}{R_B R_L}\right)^{0{,}48} \frac{L}{V} \quad (3)$$

Onde: q é a vazão [L/T]; k é o decaimento dos reservatórios; n é o número de reservatórios; L é o comprimento médio dos canais de maior ordem; e V é a velocidade.

O algoritmo de calibração utilizado foi o *Simplex Search Method* de Lagarias *et al.* (1998), com a função objetivo Nash-Sutcliffe. Para calibrar o k variou-se a velocidade até que se chegasse à condição de Nash-Sutcliffe maior que 0,5.

Seleção dos eventos

Os eventos foram selecionados visualmente conforme a disponibilidade de série histórica com discretização temporal de um dia, tomando-se como referência a vazão máxima de cada ano e chuva correspondente a cinco dias anteriores e posteriores ao pico. No total, selecionaram-se 14 eventos, correspondentes aos anos pares para a calibração (esq.) e os ímpares para a validação (dir.), como mostra a Figura 3.

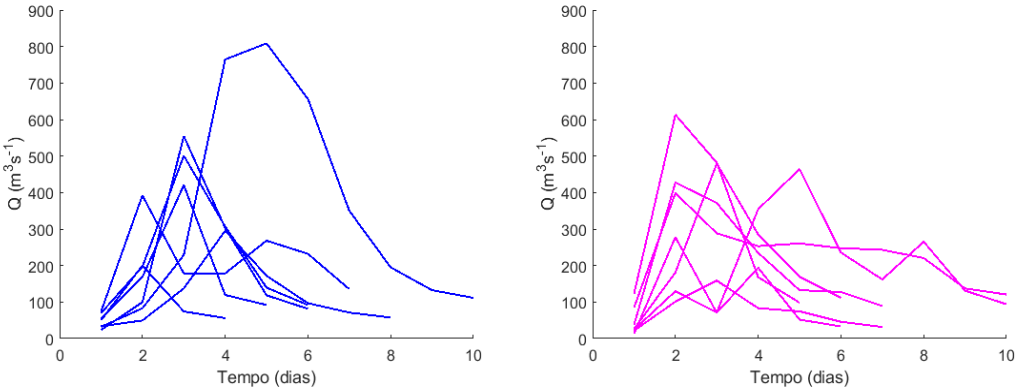

Figura 3 – Eventos utilizados nas fases de calibração (esq.) e validação (dir.).

Distribuição da chuva efetiva

A definição de chuva efetiva utilizada nesse trabalho é a parte da chuva que escoa da bacia na forma de escoamento rápido:

$$Pef = \frac{V_{Qq}}{A} \quad (4)$$

Onde *Pef* [L] é a chuva efetiva e A [L2] é a área da bacia.

A chuva efetiva foi determinada pelo método *Curve Number* (CN):

$$Pefacu = \begin{cases} 0 \rightarrow Pacu <= Ia \\ \dfrac{(Pacu - Ia)^2}{Pacu - Ia + \left(\dfrac{25400}{CN} - 254\right)} \rightarrow Pacu \end{cases} \quad (5)$$

Onde: *Ia* [L] é abstração inicial, na qual toda chuva evapora, intercepta ou infiltra, não contribuindo para o escoamento rápido; *Pacu* [L] é a chuva acumulada no tempo; *Pefacu* [L] é a chuva efetiva acumulada no tempo; e *CN* é um parâmetro adimensional.

Cálculo das leis de Horton

Os parâmetros necessários ao cálculo das leis de Horton foram extraídos por meio do programa *ArcGIS* e da extensão *ArcHydro*, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI/SC), com resolução espacial de 30 m e limiar de área de 0,45 km². A hierarquização dos rios se deu seguindo o método de Strahler (1952), conforme ilustrado na Figura 3.

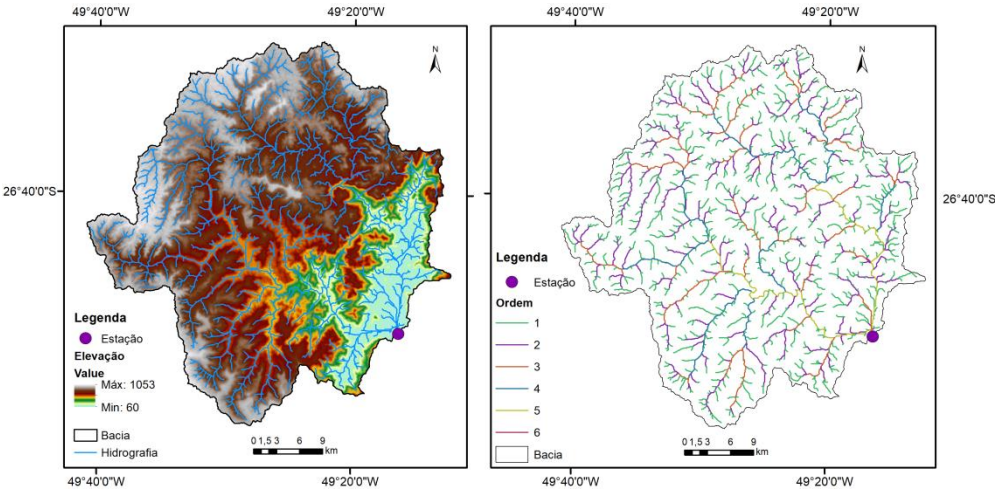

Figura 4 – Modelo de digital do terreno (esq.) e hierarquização dos rios da bacia considerada (dir.).

As leis de Horton (1945) relacionam a ordem dos rios a características geomorfológicas da bacia a qual estão inseridos, permitindo o agrupamento de bacias conforme suas similaridades físicas e hidrográficas, sendo elas:

$$R_B = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad ; \quad R_L = \frac{\overline{L_{i+1}}}{\overline{L_i}} \quad ; \quad R_A = \frac{\overline{A_{i+1}}}{\overline{A_i}} \qquad (6)$$

Onde: R_B é a taxa de bifurcação; R_L é a taxa de comprimento; R_A é a taxa de área; i é a ordem do canal; N é o número de canais; L é o comprimento do canal [L]; e A é a área de contribuição [L²].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A bacia possui altitude máxima de 1053 metros e mínima de 60 metros, representando uma difença altimétrica de 993 metros e é classificada como de ordem 6, considerando-se a exultória como o ponto onde se localiza a estação fluviométrica. A média de R_B foi de 4,04, enquanto R_L e R_A apresentaram médias de 2,05 e 2,10, respectivamente, como demonstrado na Tabela 1. O valor de RB encontra-se próxima da faixa entre 3 e 4, sendo característico de regiões montanhosas ou de hidrografia altamente ramificada (Horton, 1945).

Tabela 1- Resultado do cálculo das leis de Horton para a bacia do estudo.

Ordem	N	$LOG_{10}N$	R_B	L_M (km)	$LOG_{10}L_M$	R_L	A_M (km)	$LOG_{10}A_M$	R_A
1	828	2,92	3,85	0,81	-0,09	2,03	0,88	-0,05	2,84
2	215	2,33	4,48	1,65	0,22	2,13	2,50	0,40	2,28
3	48	1,68	4,36	3,51	0,55	2,75	5,70	0,76	2,70
4	11	1,04	5,50	9,66	0,99	3,30	15,38	1,19	2,65
5	2	0,30	2,00	31,87	1,50	0,02	40,81	1,61	0,02
6	1	0,00		0,69			0,69		
Média			**4,04**			**2,05**			**2,10**

O resultado da calibração e validação dos parâmetros do HU encontra-se na Tabela 2. A calibração dos parâmetros dos eventos pares resultou num n de 5,41 e k variando entre 0,22 e 0,37, onde k está relacionado à altura do pico do HU, enquanto que n está ligado ao tempo de pico, apesar de esses parâmetros serem dependentes entre si. Os valores encontrados indicam que o formato do hidrograma tende a possuir altura de pico acentuada e um tempo de pico mais distante da origem (Figura 5).

Tabela 2 - Resultado dos parâmetros do HU obtidos na calibração e validação.

Parâmetros		Nash	
k	**n**	**Calibração**	**Validação**
0,24	5,41	0,50	0,78
0,37	5,41	0,95	0,84

0,27	5,41	0,94	0,07
0,31	5,41	0,65	0,88
0,30	5,41	0,90	0,89
0,23	5,41	0,92	0,90
0,22	5,41	0,73	0,54

A partir dos dados da calibração, gerou-se HUs para cada evento e posteriormente calculou-se o HU geormorfológico médio da bacia. O HU médio calculado aponta que, para os eventos máximos considerados, o tempo de duração do escoamento superficial na bacia é de aproximadamente cinco dias.

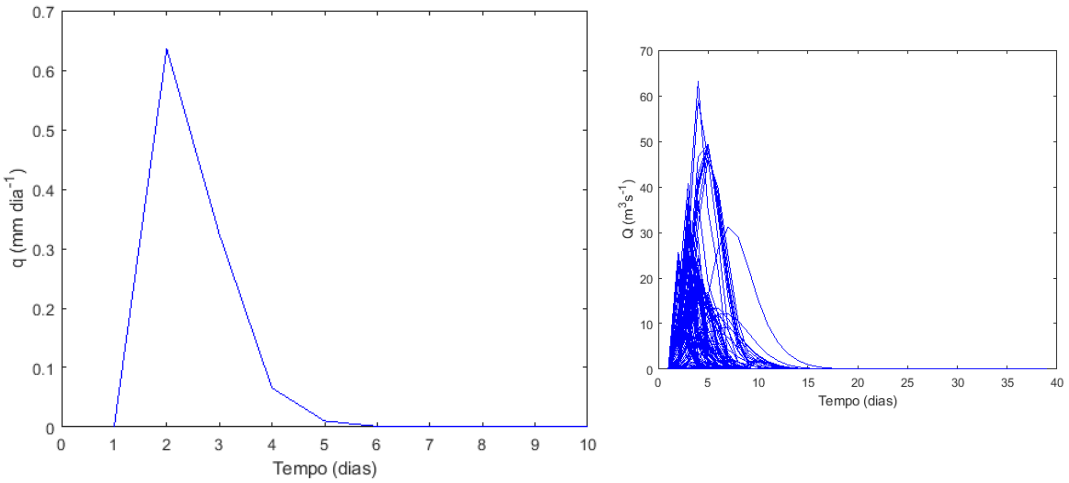

Figura 5 – Hidrograma unitário médio calculado (esq.) e resultado da calibração dos parâmetros (dir.).

CONCLUSÕES

A avaliação dos parâmetros dos hidrogramas unitários calculados com base nos dados observados e na geomorfologia da bacia estudada indica que o padrão de chuvas exerceu influência no processo de determinação das vazões de cheia, assim como a hidrografia. Além disso, o HU médio revelou parâmetros de forma condizentes com tempos de pico maiores. Levando-se em consideração que a região em que a bacia se insere possui importantes centros urbanos e que apresenta histórico de ocorrência de inundações, a análise do comportamento da bacia frente a eventos extremos torna-se importante sob o ponto de vista hidrológico, econômico e social.

AGRADECIMENTOS

A segunda e terceira autoras agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por concessão de bolsa de mestrado e doutorado, respectivamente.

REFERÊNCIAS

BHUYAN, M. K., KUMAR, S., JENA, J., & BHUNYA, P. K. (2015). Flood Hydrograph with Synthetic Unit Hydrograph Routing. *Water Resources Management*, *29*(15), 5765–5782. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1145-1

CASAGRANDE, L., TOMASELLA, J., DOS SANTOS , R. C., BOTTINO, M. J., & DE OLIVEIRA, C. R. (2017). Early flood warning in the Itajaí-Açu River basin using numerical weather forecasting and hydrological modeling. *Natural Hazards*, *88*(2), 741–757. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2889-0

CEPED/UFSC. (2013). *Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012*. *Secretaria Nacional de Defesa Civil* (2nd ed.). Florianópolis: Editora UFSC. https://doi.org/978-85-64695-18-4

CHOW, V., MAIDMENT, D., & MAYS, L. (1989). Applied Hydrology. Cingapura: Mcgraw-hill.

CLEVELAND, T. G., THOMPSON, D. B., FANG, X., & HE, X. (2008). Synthesis of Unit Hydrographs from a Digital Elevation Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:2(212)

COLLISCHONN, W., & DORNELLES, F. (2013). *Hidrologia para engenharias e ciências ambientais*. Porto Alegre: ABRH.

COSTA, F. F. DA, PAZ, A. R. DA, & PICCILLI, D. G. A. (2019). Modified NRCS-CN-TUH methods for distributed rainfall-runoff modeling. *RBRH*, *24*. https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180104

DEVIA, G. K., GANASRI, B. P., & DWARAKISH, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, *4*, 1001–1007. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126

DOOGE, J. C. I. (1959). A general theory of the unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research*, *64*(2), 241–256. https://doi.org/10.1029/JZ064i002p00241

HORTON, R. E. (1945). Erosinal development of streams and their drainage basins; hydrological approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, *56*, 275–370. https://doi.org/https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

IBGE. (2010). Sinopse do Censo Demográfico 2010. Retrieved April 13, 2019, from https://www.ibge.gov.br/censo2010/apps/sinopse/

LAGARIAS, J. C., REEDS, J. A., WRIGHT, M. H., & WRIGHT, P. E. (1998). Convergence Properties of the Nelder--Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal on Optimization*, *9*(1), 112–147. https://doi.org/10.1137/S1052623496303470

MARCELINO, E. V., NUNES, L. H., & KOBIYAMA, M. (2006). Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina. *Caminhos de Geografia*, *8*(17), 72–84.

NASH, J. E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. *International Association of Scientific Hydrology*, *3*, 114–121.

PECHLIVANIDIS, I. G., JACKSON, B. M., MCINTYRE, N. R., & WHEATER, H. S. (2011). Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*, *13*(3), 193–214.

ROSSO, R. (1984). Nash Model Relation to Horton Order Ratios. *Water Resources Research*, *20*(7), 914–920. https://doi.org/10.1029/WR020i007p00914

SDS/SC. (2017). Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina (PERH-SC): Caracterização Geral das Regiões Hidrográficas de Santa Catarina - RH7 Vale do Itajaí. Florianópolis: Fundação CERTI.

SHERMAN, L. K. (1932). Stream Flow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Engineering News-Record*, *108*, 501–505.

STEINMETZ, A. A., BESKOW, S., TERRA, F. DA S., NUNES, M. C. M., VARGAS, M. M., & HORN, J. F. C. (2019). Spatial discretization influence on flood modeling using unit hydrograph theory. *RBRH*, *24*. https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180143

STRAHLER, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, *63*(11), 1117–1142.

XAVIER, A. C., KING, C. W., & SCANLON, B. R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). *International Journal of Climatology*, *36*(6), 2644–2659. https://doi.org/10.1002/joc.4518