



Ambiente & Água - An Interdisciplinary
Journal of Applied Science

ISSN: 1980-993X

ambi-agua@agro.unitau.br

Universidade de Taubaté
Brasil

Regina Bazzo, Kássia; Soares Guedes, Hugo Alexandre; Souza Castro, Andréa; Moreira
Siqueira, Tirzah; Almeida Teixeira-Gandra, Claudia Fernanda

Regionalização da vazão Q95: comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio
Taquari-Antas, RS

Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol. 12, núm. 5,
septiembre-octubre, 2017, pp. 855-870

Universidade de Taubaté
Taubaté, Brasil

Disponibile en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92852595013>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



Regionalização da vazão Q_{95} : comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS

doi:10.4136/ambi-agua.2032

Received: 21 Oct. 2016; Accepted: 05 Jul. 2017

**Kássia Regina Bazzo* ; Hugo Alexandre Soares Guedes;
Andréa Souza Castro; Tirzah Moreira Siqueira;
Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra**

Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, RS, Brasil
Centro de Engenharias (CENG)

*Autor correspondente: e-mail: bazzokassia@gmail.com,
hugo.guedes@ufpel.edu.br, andreascastr@gmail.com,
tirzahmelo@hotmail.com, cfteixeira@ig.com.br

RESUMO

A baixa densidade espacial da rede hidrométrica nacional tem resultado em grandes limitações para a representação do comportamento dos recursos hídricos. Dessa forma, a regionalização de vazões é uma alternativa para melhor explorar os dados já existentes, transferindo informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar as estimativas da vazão mínima de permanência Q_{95} obtidas através dos métodos Tradicional e Conservação de Massas na bacia do Rio Taquari-Antas, pertencente ao Estado do Rio Grande do Sul, visando auxiliar o planejamento dos recursos hídricos, além de facilitar as tomadas de decisão em relação aos processos de outorga do direito de uso das águas. Como variável explicativa para a regressão matemática foi utilizada a área de drenagem proveniente do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC). Foram obtidas as equações de regionalização da vazão de referência Q_{95} e as respectivas regiões hidrologicamente homogêneas para os dois métodos testados, sendo a magnitude dos erros relativos inerente às metodologias empregadas. Consideradas as particularidades deste trabalho, ambos os métodos avaliados apresentaram resultados satisfatórios na obtenção de modelos para estimativa da vazão Q_{95} , entretanto destaca-se que as técnicas aplicadas não substituem as informações hidrológicas obtidas com uma rede hidrométrica suficientemente densa.

Palavras-chave: recursos hídricos, regressão, siscorv.

Streamflow regionalization of Q_{95} : comparison of methods for the Taquari-Antas River Basin

ABSTRACT

The low density of the national hydrometeorological network has greatly limited the representation of the behavior of water resources. Thus, stream regionalization is an alternative to better exploit existing data, allowing the transfer of information from one location to another with similar hydrological behavior. The aim of this study was therefore to assess the estimates of the minimum Q_{95} flowrate obtained through the Traditional and Mass

Conservation methods in the basins of the Taquari-Antas River, in state of Rio Grande do Sul, with the aim of assisting water-resource management and facilitating decision-making in relation to the process of granting water-use permits. As an independent variable for the mathematical regression, we used the drainage area, extracted from a MDEHC. The regionalization equations of the reference flow Q_{95} and the respective hydrologically homogeneous regions were obtained for the two methods tested, being the magnitude of the relative errors inherent in the methodologies employed. Considering the peculiarities of this work, both assessed methods have shown satisfactory results in obtaining models to estimate the Q_{95} flowrate; however, it should be noted that the applied techniques do not replace hydrological information obtained with a sufficiently dense hydrometric network.

Keywords: regression, siscorv, water resources.

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento de recursos hídricos tem como objetivo solucionar os conflitos resultantes do uso intensivo da água, consequência do crescimento econômico e populacional, e preservar as funções hidrológicas, biológicas e químicas dos ecossistemas, assim como garantir que esse recurso se mantenha com oferta adequada (Cruz e Tucci, 2008). Para isso, a outorga do direito de uso da água, instrumento da Lei Federal nº 9.433 de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso (Brasil, 1997).

No Rio Grande do Sul, segundo o Decreto nº 37.033/1996, os valores referentes aos parâmetros técnicos necessários para orientar as outorgas devem ser estabelecidos pelos Planos de Bacias Hidrográficas (Rio Grande do Sul, 1996). Para a bacia hidrográfica do Rio Taquari – Antas, a vazão mínima de referência é a Q_{95} , vazão de permanência que é igualada ou superada em 95% do tempo.

Em países como o Brasil, cujas dimensões são continentais, o monitoramento dos rios muitas vezes acaba não abrangendo todas as áreas de interesse (Melati, 2016), tendo como consequências desafios preponderantes na estimativa da disponibilidade de água superficial nas bacias hidrográficas. Desta maneira, preliminarmente, deve-se desenvolver estudos hidrológicos que maximizem as informações fluviométricas existentes e, em paralelo ao procedimento de outorga, desenvolver ações técnicas que mitiguem o efeito da carência de dados, ou, na situação ideal, que as eliminem (Silveira et al., 1998).

Dada esta necessidade, a técnica de regionalização surge como uma alternativa para a obtenção de informações hidrológicas em locais sem ou com poucos dados, baseando-se na similaridade espacial de algumas funções, variáveis e parâmetros que permitem essa transferência (Tucci, 2001). Wolff et al. (2014) agruparam em duas categorias as metodologias mais utilizadas para regionalizar vazões: a) metodologias que têm como princípio básico a utilização de equações de regressão aplicadas a regiões hidrológicamente homogêneas e; b) metodologias que utilizam técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistema de informações geográficas. Novaes et al. (2009), Costa et al. (2012) e Elesbon et al. (2015) desenvolveram estudos referentes à primeira categoria. Já Chaves et al. (2002) e Pruski et al. (2016) apresentaram resultados de regionalização que levaram em consideração o uso de sistemas de informações geográficas.

No tocante ao primeiro conjunto de metodologias estabelecido por Wolff et al. (2014), é fundamental relacionar a variável a ser regionalizada (dependente) com variáveis explicativas (independentes). As variáveis explicativas, as quais caracterizam as bacias hidrográficas, devem ser facilmente obtidas para não tornar a metodologia de regionalização complicada (Sousa, 2009). Sendo assim, os trabalhos de Chaves et al. (2002), Novaes et al. (2009),

Moreira e Silva (2014) e Beskow et al. (2016) utilizaram somente a área de drenagem como variável explicativa.

Frente aos diversos métodos de regionalização existentes e a necessidade da obtenção das informações hidrológicas de forma facilitada, é imperativo o estudo comparativo de metodologias de regionalização de vazões a fim de se obter a mais adequada às características regionais de cada bacia hidrográfica (Moreira e Silva, 2014). O método Tradicional (MT) é um dos mais difundidos para regionalização de vazões, e consiste no ajuste das regressões múltiplas entre a vazão e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem para cada região hidrologicamente homogênea (Baena et al., 2004; Lisboa et al., 2008; Silva et al., 2009; Melati, 2016). Já o método da Conservação de Massas (MCM) trabalha com ajustes de regressões de equações não lineares que representam as vazões em função das variáveis explicativas para o rio principal e para cada afluente do rio principal (Novaes, 2005; Moreira e Silva, 2014). Esse método se diferencia do método Tradicional por induzir as equações a passarem pelo ponto de origem e pelo valor da vazão no ponto de deságue dos afluentes no rio principal. O método é fundamentado no pressuposto de que essa vazão, obtida pela equação de ajuste, a qual considera as informações de todas as estações fluviométricas situadas no rio, é mais representativa que a vazão obtida pontualmente para a seção considerada (Novaes, 2005).

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar as estimativas da vazão mínima de permanência Q_{95} obtidas pela técnica de regionalização através dos métodos Tradicional e Conservação de Massas na bacia do Rio Taquari-Antas, pertencente ao Estado do Rio Grande do Sul, visando auxiliar o planejamento dos recursos hídricos, além de facilitar as tomadas de decisão em relação aos processos de outorga do direito de uso das águas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas localiza-se no nordeste do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), tendo como principal curso de água o Rio Taquari-Antas. O Rio Taquari-Antas nasce no extremo leste da bacia e recebe o nome de Antas até a foz do Rio Carreiro, onde passa a se chamar Taquari até a sua foz no Rio Jacuí, apresentando uma extensão total de 546 km (STE, 2012). Estão contidos na bacia, parcial ou totalmente, 118 municípios, totalizando uma população de 1.281.866 habitantes em uma área de 26.415 km² (IBGE, 2010).

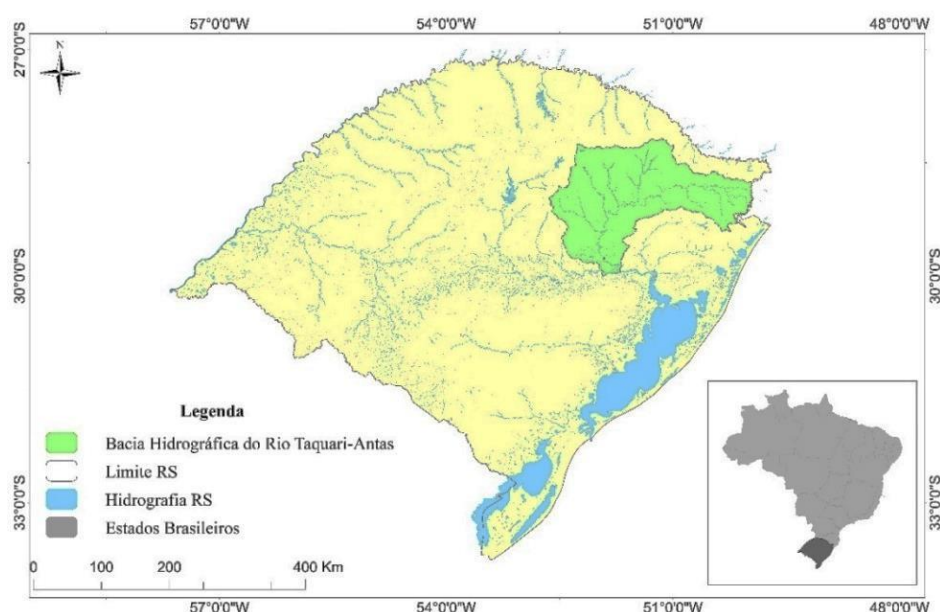


Figura 1. Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas.

Segundo o Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, elaborado em 2012 (STE, 2012), os setores que apresentam maiores demandas de água são a irrigação (48%), seguido de uso urbano (24%) e pecuária (18%), sendo que a demanda total da bacia é de $12,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Os meses de dezembro a março são os mais críticos em se tratando de uso dos recursos hídricos.

As informações das estações fluviométricas foram obtidas no Sistema de Informações Hidrológicas – HidroWeb e no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH, ambos pertencentes às plataformas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2015). O software SisCAH 1.0, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa (Sousa et al., 2009), foi utilizado para a triagem e processamento inicial dos dados consistidos, assim como para a obtenção das curvas de permanência e da vazão Q_{95} observada. Para o pré-processamento dos dados foi necessário determinar o ano hidrológico da região em estudo. De acordo com Tucci (2001), o ano hidrológico na área de estudo possui início no mês de maio e término no mês de abril.

Visando abranger uma maior extensão territorial, foram selecionadas as estações com séries históricas consistidas com no mínimo 5 anos, conforme indicado por Tucci (2001), limite de falhas de 10% para cada ano hidrológico e independentemente de um período comum de dados. No total, 18 estações fluviométricas foram selecionadas (Tabela 1; Figura 2). A curva de permanência para obtenção da vazão Q_{95} foi calculada pelo método da série completa de dados, a qual utiliza todos os anos disponíveis na série de dados, que, segundo Cruz e Tucci (2008), possibilita a obtenção da curva de permanência empírica total. Para isso, foi utilizado o software SisCAH 1.0, que segue a metodologia descrita por Vogel e Fennessey (1994), onde as vazões são ordenadas de forma decrescentes em classes de acordo com a sua magnitude e associadas às frequências empíricas de não superação. Essas frequências são acumuladas e assim, com a obtenção da curva de permanência, é extraído o valor da vazão com 95% de permanência.

Tabela 1. Estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Código	Nome da estação	Nome do rio	Latitude	Longitude
86100000	Passo do Gabriel	Rio Taquari-Antas	-28,8056	-50,495
86160000	Passo Tainhas	Rio Tainhas	-28,8681	-50,4561
86250000	Passo São Bernardo	Rio Taquari-Antas	-28,8667	-51,1167
86300000	Nova Roma	Rio Taquari-Antas	-28,9667	-51,35
86340000	Ponte Santa Rita	Rio Santa Rita	-28,2833	-51,2833
86360000	Rincão do Castelhanao	Rio Santa Rita	-28,5000	-51,3507
86410000	Passo Barra do Guaiaveira	Rio Turvo	-28,7392	-51,425
86420000	Ponte do Prata	Rio Prata	-28,6776	-51,6081
86440000	Passo do Prata	Rio Turvo	-28,8676	-51,4456
86470000	Ponte do Rio das Antas	Rio Taquari-Antas	-29,0456	-51,5669
86480000	Passo Migliavaca	Rio Carreiro	-28,6189	-51,8558
86500000	Passo Carreiro	Rio Carreiro	-28,8488	-51,8325
86510000	Muçum	Rio Taquari-Antas	-29,1672	-51,8686
86560000	Linha Colombo	Rio Guaporé	-28,9122	-51,9531
86580000	Santa Lúcia	Rio Guaporé	-29,1197	-51,9119
86700000	Ponte Jacaré	Arroio Jacaré	-29,1886	-51,9219
86720000	Encantado	Rio Taquari-Antas	-29,2344	-51,855
86745000	Passo do Coimbra	Rio Forqueta	-29,2161	-52,1456

No presente estudo optou-se por utilizar a área de drenagem como variável explicativa relacionada a vazão Q_{95} com intuito de obter um modelo de regressão simples e de fácil utilização (Silva et al., 2006; Melati, 2016). Para a determinação da área de contribuição de cada estação fluviométrica foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) com resolução espacial de 90 m, devido a fácil obtenção da imagem e por ser uma alternativa viável e prática na caracterização morfométrica de bacias hidrográficas (Guedes e Silva, 2012).

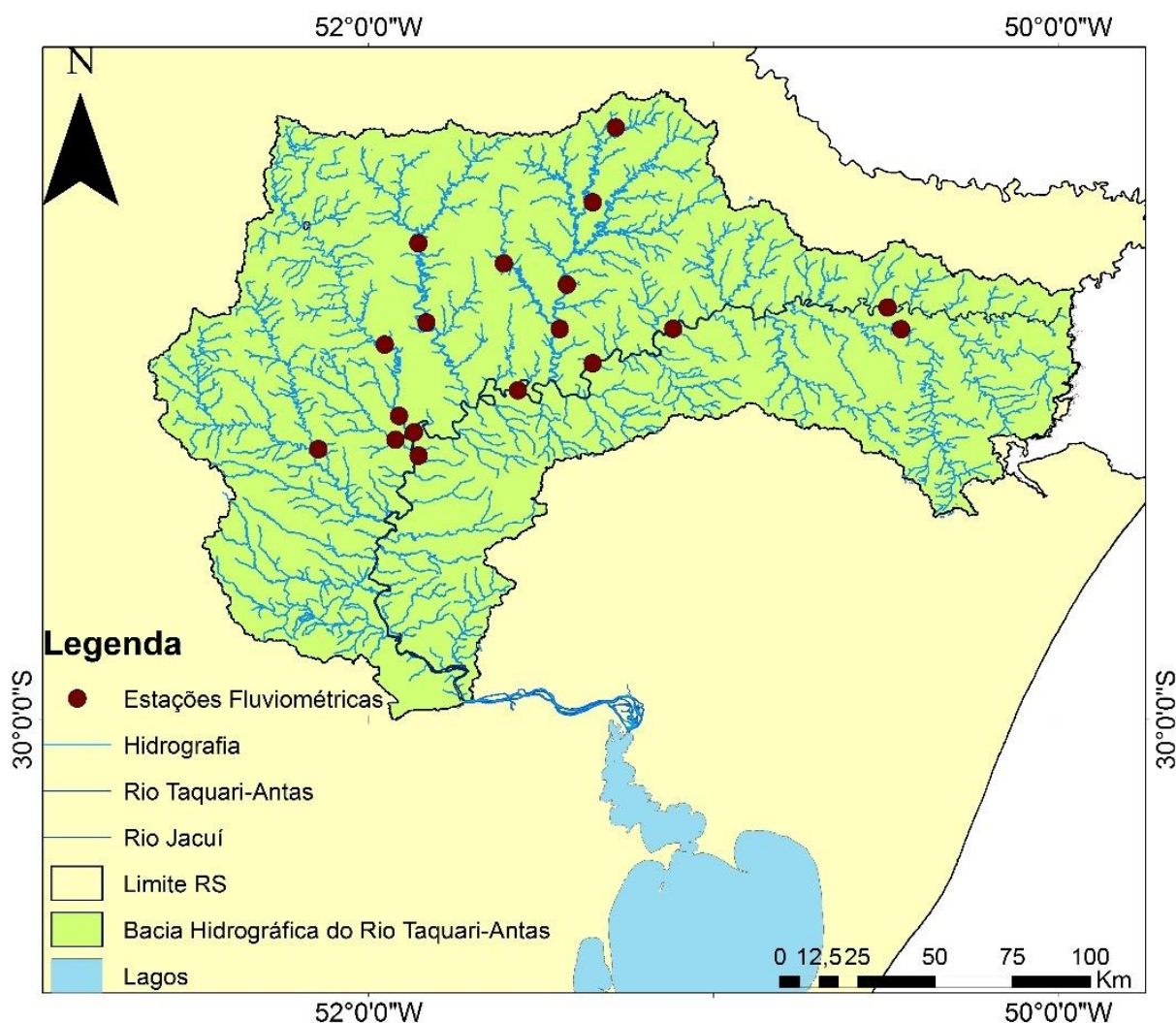


Figura 2. Distribuição espacial das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

O MDE deve representar o relevo de forma fidedigna e assegurar a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada, garantindo, assim, a sua consistência hidrológica (Baena et al., 2004). Dessa forma, deve ser obtido um Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Condicionado (MDEHC), a partir do recondicionamento do MDE (Elesbon et al., 2011). Neste estudo adotou-se a metodologia descrita por Elesbon et al. (2011), sendo apresentada de forma esquemática na Figura 3.

Utilizou-se o software ArcGIS Desktop 10.0 (ESRI, 2016), por meio do módulo ArcHydro, em todas as etapas do recondicionamento. Esse processo envolve a utilização de uma base hidrográfica verdadeira, visando indicar ao modelo qual o caminho preferencial do escoamento. Neste estudo, utilizou-se a hidrografia mapeada pelas cartas do exército disponibilizada na escala 1:50.000 (Hasenak e Weber, 2010).



Figura 3. Organograma indicativo dos processos utilizados para o recondicionamento do MDE e determinação da área de drenagem no software ArcGIS por meio da extensão ArcHydro.

As vazões Q_{95} observadas em cada estação fluviométrica foram extraídas das curvas de permanência. Para a estimativa das regiões hidrologicamente homogêneas e das equações de regionalização da vazão Q_{95} para ambos os métodos avaliados foi utilizado o software SisCORV 1.0, também desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa (Sousa, 2009). Foram utilizados dois métodos de regionalização de vazões: i) método tradicional; e ii) método da Conservação de Massas.

2.1. Método Tradicional

O método Tradicional (Eletrobrás, 1985; Tucci, 2001) é um dos mais difundidos para regionalização de vazões. Este método consiste no ajuste de regressões múltiplas entre a vazão e as características físicas e climáticas de cada região hidrologicamente homogênea (RHH), previamente determinada a partir da avaliação dos coeficientes estatísticos. O software SisCORV 1.0 realiza a regressão múltipla entre as variáveis através da relação linear, potencial, exponencial, logarítmica e recíproca, apresentando diversos parâmetros estatísticos para cada uma.

Dessa maneira, para a definição das RHH, as estações fluviométricas e suas áreas de drenagem foram agrupadas com base na distribuição geográfica e foram avaliados os diferentes modelos de regressão obtidos para cada agrupamento. As regiões foram consideradas homogêneas e foram estabelecidos os modelos de regressão quando atingidos os padrões estatísticos definidos, isto é, coeficiente de determinação (R^2) maiores que 0,90 e valores do erro padrão fatorial (σ_F) menores que 1. Esse processo foi realizado de forma iterativa, refazendo-se a combinação das áreas quando não alcançados esses parâmetros. Com as RHH e os modelos mais adequados de regressão para a bacia hidrográfica determinados, foram estabelecidas, portanto, as equações de regionalização e calculadas as vazões estimadas (Q_{est}).

2.2. Método da Conservação de Massas

O método da Conservação de Massas, desenvolvido por Pereira (2004) e aperfeiçoado por Novaes (2005), fundamenta-se no pressuposto de que a vazão na foz dos afluentes da bacia hidrográfica, estimada a partir do modelo de regressão para o rio principal, é mais

representativa do que a vazão obtida pontualmente para a seção considerada (Novaes, 2005). Nesse sentido, diferencia-se do método Tradicional por induzir as equações de regressão a passarem pelas vazões tanto nos pontos cujas estações estão localizadas, quanto nos pontos de deságue. No software SisCORV 1.0 são apresentados os modelos obtidos através da relação entre as variáveis potencial e exponencial, e os respectivos parâmetros estatísticos relacionados.

Para isso, esse procedimento deve iniciar nos afluentes de maior ordem e seguir para os de menor ordem. Primeiramente, com as variáveis explicativas definidas, foi obtido o modelo de regressão não linear para o rio principal. A partir deste modelo foram estimadas as vazões na foz dos afluentes que contenham ao menos uma estação fluviométrica, e foram determinadas as equações de regressão destes afluentes levando-se em consideração as vazões das estações fluviométricas e as estimadas nos pontos de deságue (Pereira, 2004; Novaes, 2005). Este método permitiu definir uma região hidrologicamente homogênea para cada afluente e outra para o rio principal, que no contexto do software SisCORV 1.0 são chamados de trechos.

A avaliação dos resultados foi realizada através da comparação das vazões Q_{95} estimadas pelos diferentes métodos (Q_{est}) com as vazões extraídas das séries históricas das estações fluviométricas (Q_{obs}). Os índices estatísticos utilizados foram o Erro Relativo (ER), Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (CNS) (Nash e Sutcliffe, 1970) e Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ). Moriasi et al. (2007) apresentaram uma classificação para esse coeficiente, sendo: $CNS > 0,65$, o modelo é considerado muito bom; $0,54 < CNS < 0,65$, o modelo é considerado bom e; $0,5 < CNS < 0,54$, satisfatório.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão apresentados os valores das vazões de permanência Q_{95} observadas, as áreas de drenagem estimadas para cada estação fluviométrica a partir do MDEHC, e a comparação com os valores das áreas de drenagem fornecidos pela ANA a partir do Erro Relativo Absoluto (ERA).

Tabela 2. Vazão Q_{95} e áreas de drenagem para cada estação fluviométrica utilizada no estudo.

Código	Q_{95} obs ($m^3 s^{-1}$)	Área MDEHC (km^2)	Área ANA (km^2)	ERA (%)
86100000	5,41	1652,60	1725	4,38
86160000	1,88	1030,55	1107	7,42
86250000	6,5	5990,51	6450	7,67
86300000	8,95	7118,43	7528	5,75
86340000	0,82	147,86	314	112,36
86360000	1,35	482,75	504	4,40
86410000	5,94	2563,23	2839	10,76
86420000	0,87	287,83	319	10,83
86440000	7,26	3317,44	3622	9,18
86470000	36,32	11544,38	12500	8,28
86480000	2,21	1180,08	1250	5,93
86500000	2,67	1676,52	1829	9,10
86510000	27,98	14824,93	15826	6,75
86560000	4,12	1853,32	1980	6,84
86580000	6,79	2266,86	2382	5,08
86700000	0,54	403,55	432	7,05
86720000	34,10	17672,63	19200	8,64
86745000	1,15	1184,30	780	34,14

Observa-se na Tabela 2 que as áreas de drenagem apresentaram ERA que variaram de 4,38 a 112,36%. O maior erro encontrado (112,36%) correspondeu à estação fluviométrica com a menor área de drenagem (86340000). A magnitude deste erro é justificada pela resolução da imagem de satélite utilizada, que foi de 90 metros. Conforme Baena et al. (2004), a obtenção das características morfométricas das bacias hidrográficas através de MDEHC é altamente influenciável pela escala das imagens utilizadas. Sugere-se para trabalhos com áreas menores a utilização de imagens de satélite com melhor resolução espacial.

De posse da base de dados condicionada, foram estabelecidas as equações de regressão utilizando-se como variável explicativa a área de drenagem obtida através do MDEHC. Dessa forma, no método Tradicional foram identificadas duas regiões hidrologicamente homogêneas (RHH 1 e RHH 2) para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, conforme apresentado na Figura 4.

As equações de regionalização para cada RHH estabelecida estão apresentadas na Tabela 3, juntamente com os respectivos coeficientes de determinação (R^2) e erro padrão fatorial (σF), sendo a vazão calculada em $m^3 s^{-1}$ e a área de drenagem em km^2 . Para ambas as regiões homogêneas, o modelo de regressão que melhor representou a vazão Q_{95} estimada foi o potencial, assim como encontrado nos trabalhos de Lisboa et al. (2008) e Baena et al. (2004). Com essas equações é possível calcular a vazão de permanência Q_{95} para os diferentes rios de interesse contidos na respectiva região homogênea, e que não possuem monitoramento, desde que o ponto de interesse possua área de contribuição dentro da faixa de validade de aplicação das equações.

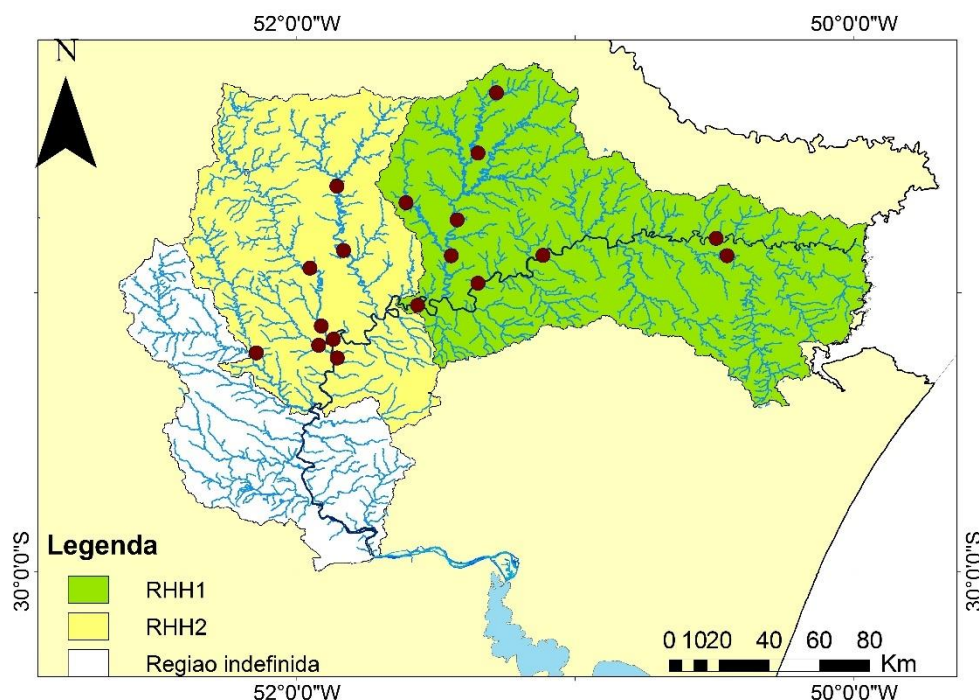


Figura 4. Regiões hidrologicamente homogêneas geradas pelo método Tradicional.

Tabela 3. Equações de regionalização para a vazão Q_{95} pelo método Tradicional.

RHH	Equação de Regionalização	Validade (km^2)	R^2	Erro Padrão
1	$Q_{95} = 0,0115.A^{0,7878}$	$147 < A < 11544$	0,90	0,3924
2	$Q_{95} = 0,00082.A^{1,097}$	$403 < A < 17672$	0,95	0,3382

Melati (2016) avaliou diferentes simulações de regressões para a obtenção de equações de regionalização da Q_{95} para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas. Em um dos seus resultados foi identificada uma região hidrologicamente homogênea a partir de nove estações fluviométricas e a área de drenagem como variável independente, e foi obtida uma equação de regressão com igual coeficiente angular e pequena variação no coeficiente exponencial em comparação com o obtido no presente estudo para a RHH 1, com área de abrangência aproximada e dez estações. Essa conformidade já era esperada, uma vez que foi utilizada a mesma metodologia para o presente trabalho. Em outra simulação, Melati (2016) identificou duas RHH, porém, diferentes das identificadas no presente estudo.

O resultado da utilização de diferentes estações fluviométricas para o agrupamento das regiões hidrologicamente homogêneas é observado nas áreas de validade de aplicação das equações, de modo que no trabalho de Melati (2016) foi de 790 km² a 19.043 km², e no presente estudo foi de 147,86 km² a 11.544,38 km² para a RHH 1, sendo, deste modo, diferentes. Em ambos os trabalhos foi identificada aproximadamente a mesma região indefinida, próximo ao exutório do Rio Taquari-Antas, conforme apresentado na Figura 4.

Lisboa et al. (2008), no estudo de regionalização da Q_{95} pelo método Tradicional para a bacia hidrográfica do Rio Paracatu, encontraram variações de 0,98 a 0,99, para os coeficientes de determinação, e 1,0733 a 1,2335 para o erro padrão fatorial. Já Baena et al. (2004) obtiveram erros padrões variando de 1,10 a 1,87 e R^2 de 0,96 a 0,99. Comparando com os valores de R^2 e σF observados no presente estudo para ambas as regiões homogêneas, é possível verificar a adequação das equações obtidas para modelar a vazão mínima de referência Q_{95} na bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas.

Na Tabela 4 são apresentados os modelos obtidos pelo método de Conservação de Massas. Foi estabelecida uma equação de regressão para cada curso d'água que continha ao menos uma estação fluviométrica. Verificou-se que, para todos os trechos, o modelo de regressão que melhor se ajustou foi o potencial, assim como no trabalho realizado por Moreira e Silva (2014) na regionalização da vazão $Q_{7,10}$ para a bacia do Rio Paraopeba.

Tabela 4. Equações de regionalização pelo método da Conservação de Massas.

Trecho	Estações Fluviométricas	Equação	Área de Validade (km ²)	R^2
Rio Taquari	6	$Q_{95} = 0,0016.A^{1,0191}$	$1652 < A < 17672$	0,77
Rio Tainhas	1	$Q_{95} = 0,9719.A^{0,1409}$	$1030 < A < 2113$	0,99
Rio Turvo	2	$Q_{95} = 0,9990.A^{0,2411}$	$3317 < A < 8442$	0,90
Rio Carreiro	2	$Q_{95} = 0,0004.A^{1,2016}$	$1676 < A < 2640$	0,97
Rio Guaporé	2	$Q_{95} = 0,9990.A^{0,1969}$	$2266 < A < 2344$	0,28
Rio Jacaré	1	$Q_{95} = 0,9975.A^{0,0279}$	$402 < A < 605$	0,99
Rio Forqueta	1	$Q_{95} = 0,9719.A^{0,2217}$	$1184 < A < 2880$	0,99
Rio da Prata	1	-	-	-
Rio Santa Rita	2	$Q_{95} = 0,0004.A^{1,3560}$	$147 < A < 1150$	0,98

A vazão no ponto de deságue dos afluentes foi calculada a partir da equação obtida para o rio principal. Quando há somente uma estação fluviométrica no afluente, e a vazão estimada no ponto de deságue é inferior a esta, a regressão pelo MCM é inviabilizada no software SisCORV, como observado na Tabela 4 referente ao Rio da Prata. Este fato é aceitável dado que, no geral, dista da realidade do comportamento dos rios.

Nos casos em que o rio apresenta duas ou mais estações fluviométricas e a vazão em uma delas é inferior à vazão a montante, o software SisCORV permite a obtenção das equações de

regressão, porém evidentemente com valores baixos de R^2 . Isso ocorreu no Rio Guaporé, cujo coeficiente de determinação obtido foi de 0,28. Nos demais rios, os coeficientes de determinação variaram de 0,77 a 0,99. Moreira e Silva (2014) obtiveram R^2 entre 0,82 a 0,99, indicando que os modelos obtidos no presente estudo são adequados para modelar as vazões mínimas nos referentes rios da bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas.

Os valores de vazão decrescentes ao longo dos afluentes estão relacionados a diversas incertezas no processo de regressão e obtenção das vazões mínimas. Uma destas incertezas são os erros envolvidos no modelo de regressão obtidos para o rio principal e utilizados para estimar a vazão na foz dos afluentes.

Da mesma forma, é preciso considerar as incertezas associadas no traçado da curva-chave ao se trabalhar com vazões mínimas. Segundo Santos et al. (2001), o traçado da curva, cujo objetivo é determinar a relação do nível de água e da vazão para as diferentes situações que podem ser encontradas no rio, é realizado a partir das medições diretas de vazões. Entretanto, para as vazões mínimas e máximas, há a necessidade de extrapolar a curva devido às poucas medições existentes nessas situações. As extrapolações, de acordo com os mesmos autores, são sempre de caráter duvidoso, cuja consequência é a propagação das incertezas nas estimativas dos quantis extremos, como a Q_{95} .

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados comparativos entre os valores da Q_{95} observados e estimados pelos métodos Tradicional e Conservação de Massas para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas.

Tabela 5. Vazões de permanência Q_{95} observadas e estimadas pelos métodos utilizados no estudo.

Código	Método Tradicional				Método da Conservação de Massas		
	Q observada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Q estimada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Diferença absoluta ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Erro Relativo (%)	Q estimada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Diferença absoluta ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Erro Relativo (%)
86100000	5,41	3,95	1,46	27,00	3,05	2,36	43,65
86160000	1,88	2,72	0,84	-45,00	2,58	0,71	-37,70
86250000	6,50	10,89	4,39	-67,46	11,32	4,82	-74,11
86300000	8,95	12,47	3,52	-39,33	13,49	4,54	-50,75
86340000	0,82	0,59	0,23	28,14	0,35	0,47	57,29
86360000	1,35	1,50	0,15	-10,87	1,74	0,39	-29,06
86410000	5,94	5,58	0,36	6,12	6,63	0,69	-11,59
86420000	0,87	1,00	0,13	-14,47	-	-	-
86440000	7,26	6,83	0,43	5,88	7,05	0,21	2,84
86470000	36,32	18,25	18,07	49,75	22,08	14,24	39,20
86480000	2,21	1,94	0,27	12,06	1,96	0,25	11,11
86500000	2,67	2,86	0,19	-6,99	3,00	0,33	-12,20
86510000	27,98	31,21	3,23	-11,54	28,50	0,52	-1,84
86560000	4,12	3,19	0,93	22,60	4,40	0,28	-6,69
86580000	6,79	3,98	2,81	41,43	4,57	2,22	32,64
86700000	0,54	0,60	0,06	-11,73	1,18	0,64	-120,04
86720000	34,10	37,84	3,74	-10,98	34,08	0,02	0,05
86745000	1,15	1,95	0,80	-69,51	4,67	3,52	-305,45
Erro relativo absoluto médio (%)				26,71	49,18		

Para o método Tradicional, verificou-se que as diferenças absolutas entre a vazão observada e a vazão calculada variaram de 0,06 a 18,06 m³ s⁻¹ nas estações fluviométricas de código 86700000 e 86470000, respectivamente. Já os valores dos erros relativos variaram de 5,89 a -69,51%. A estação 86745000 apresentou o maior erro relativo, entretanto a diferença absoluta observada foi de 0,80 m³ s⁻¹, indicando que a magnitude da vazão observada exerce maior influência sobre a magnitude do valor do erro relativo, em comparação com a diferença absoluta.

As maiores diferenças absolutas foram constatadas na estação 86470000. A estação apresenta a maior vazão observada (36,32 m³ s⁻¹), entretanto a sua localização no Rio Taquari-Antas é a jusante das estações 86510000 e 86720000, cujas vazões são menores. Esta discordância possivelmente está relacionada ao período base das séries históricas das referidas estações.

Tucci (2012), ao analisar uma série histórica de precipitação de 84 anos (1922–2006), observou que a menor média móvel foi na década de 40, indicando que foram anos muito secos, seguidos da década de 60. As séries históricas das estações 86510000 e 86720000 iniciam na década de 40, enquanto a série histórica da estação 86470000 inicia na década de 70, não abrangendo as duas maiores secas históricas registradas. A não inclusão dos eventos históricos de seca nessas estações podem ter influenciado o valor da Q_{95} observada.

Os valores da Q_{95} estimados pelas metodologias aplicadas, embora tenham apresentado grande dispersão em relação ao valor observado, podem ser considerados mais adequados para representar a Q_{95} da estação fluviométrica 86470000, uma vez que foi considerado na regressão as vazões extraídas das séries históricas das demais estações na mesma RHH que abrangeram esses eventos extremos.

No estudo de regionalização da vazão de permanência Q_{95} através do método Tradicional na bacia hidrográfica do Rio Paracatu realizado por Novaes et al. (2007), foram encontrados erros relativos que variaram de 0,6 a -175,6%, sendo os valores altos justificados em função da metodologia aplicada. O erro relativo absoluto (ERA) médio no presente estudo foi igual a 26,71%. Novaes et al. (2007) obtiveram ERA médio de 24,5%, e Silva et al. (2009), na regionalização de vazões mínimas para a bacia do São Francisco através do método Tradicional, obtiveram ERA médio de 26,8%, demonstrando que os resultados médios encontrados para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas são adequados.

Já para o método da Conservação de Massas, o ERA médio encontrado foi de 49,18%. Os erros relativos variaram de 2,84 a -305,45%. Os menores e maiores erros foram encontrados para as mesmas estações em ambos os métodos: 86440000 e 86745000, respectivamente. A estação 86745000, que apresentou maior erro, se localiza no Rio Forqueta, afluente a jusante da última estação fluviométrica utilizada na regressão do Rio Taquari. A equação de regressão do rio principal no método da Conservação de Massas, não passou pelo ponto de deságue do Rio Forqueta, justificando a alta magnitude do erro encontrado.

A estação fluviométrica 86440000, localizada no Rio Turvo e inserida na RHH1, apresentou os menores erros relativos para ambos os métodos. O coeficiente de determinação das equações de regionalização referentes a essa estação foi igual a 0,9 para o MT e para o MCM, contrastando com os coeficientes obtidos para a estação cujos erros relativos foram os maiores (86745000).

A Figura 5 apresenta a dispersão das vazões Q_{95} estimadas pelos diferentes métodos em relação à vazão observada. Para as menores magnitudes, observa-se que o método Tradicional apresentou maior precisão e menor dispersão em relação aos valores observados, entretanto para as maiores vazões o método da Conservação das Massas apresentou menor dispersão. As três estações fluviométricas com as maiores vazões encontram-se no Rio Taquari-Antas.

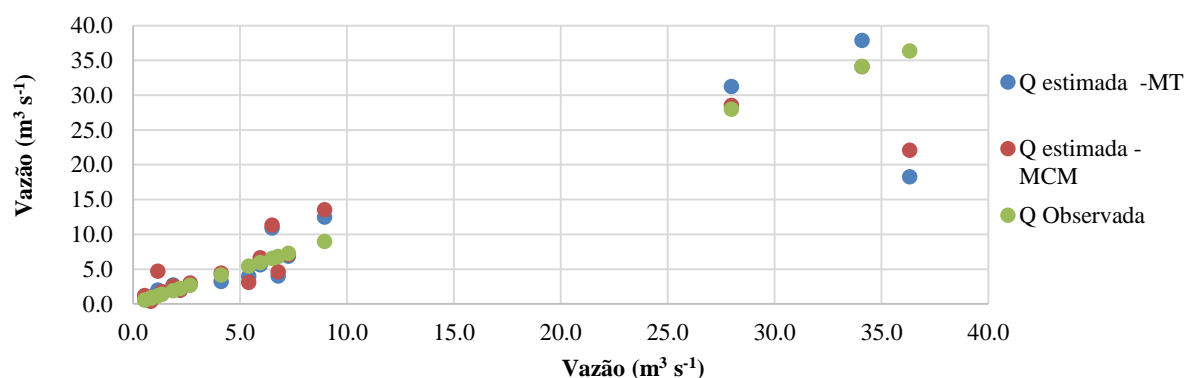


Figura 5. Dispersão das vazões estimadas pelos métodos Tradicional (MT) e Conservação de Massas (MCM).

Diversos estudos, como os de Novaes et al. (2007), Silva et al. (2009) e Moreira e Silva (2014), vem utilizando os índices estatísticos ERA e coeficiente de determinação para a avaliação dos modelos de regressão obtidos para a regionalização, contudo, há a necessidade da inclusão de mais índices estatísticos para a avaliação desses modelos visando garantir a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. Sendo assim, a Tabela 6 apresenta os índices Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) e o coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970) (CNS), obtidos a partir da comparação entre a Q_{95} observada e estimada.

Tabela 6. Comparação dos MT e MCM pelos índices estatísticos Raiz do Erro Médio Quadrático (REMQ) e Coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS).

Método Tradicional		Método da Conservação de massas	
REMQ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	CNS	REMQ ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	CNS
4,69	0,824	4,00	0,876

O REMQ tem objetivo de mostrar a dimensão do erro da estimativa, sendo o valor nulo indicando uma previsão perfeita. Observa-se na Tabela 6 que os valores encontrados de REMQ para os métodos Tradicional e Conservação de Massas foram iguais a 4,69 e 4,00 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, respectivamente. Os CNSs encontrados foram iguais a 0,824 e 0,876 para os métodos Tradicional e Conservação de Massas, respectivamente. Segundo a classificação de Moriasi et al. (2007), estes valores são considerados muito bons para representação das vazões, contudo, devido à sua proximidade, não são condicionais para a diferenciação da precisão entre as metodologias. Chaves et al. (2002), na comparação de uma metodologia proposta para regionalização de vazões com o método Tradicional para a bacia do Rio Itapicuru, na Bahia, encontraram Coeficiente de Nash e Sutcliffe igual a 0,725. Silva et al. (2009) encontraram, para os maiores erros relativos, valores de CNS próximos a unidade, demonstrando que essas formas de avaliação não estão necessariamente correlacionadas.

4. CONCLUSÃO

As equações de regressão obtidas pelos métodos Tradicional e Conservação de Massas para a regionalização da vazão de permanência Q_{95} para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas apresentaram-se adequadas em suas respectivas regiões hidrologicamente homogêneas, sendo indicado o seu uso. A magnitude dos erros relativos encontrados é inerente aos métodos aplicados, e as diferenças absolutas entre as vazões de cada estação fluviométrica demonstram a baixa dispersão dos valores.

Embora o método da Conservação de Massas tenha sido desenvolvido com o pressuposto de obter vazões mais representativas em comparação ao método Tradicional, por induzir a regressão a passar pelo ponto de deságue dos afluentes no rio principal, em afluentes sem estações fluviométricas não é possível obter equações de regionalização, limitando a utilização desse método.

Para o método Tradicional, foram identificadas duas regiões hidrologicamente homogêneas e suas respectivas equações de regionalização, além de uma região indefinida devido à extensa área com a ausência de estações fluviométricas próximo à foz do Rio Taquari. Esse método tende a ser mais utilizado devido a facilidade de aplicação das equações de regressão e maior área de abrangência em relação ao método da Conservação das Massas, além de permitir a obtenção da vazão de referência em qualquer ponto com área de drenagem conhecida dentro da respectiva RHH.

Embora os métodos aplicados tenham sido satisfatórios para a obtenção das vazões de referência em pontos sem dados históricos, cabe ressaltar que nenhuma metodologia é capaz de substituir dados consistidos provenientes de monitoramento. Dessa forma, salienta-se a necessidade de ampliar a rede hidrometeorológica no Brasil, no tocante às estações fluviométricas, visando subsidiar e aumentar a confiabilidade dos estudos relacionados à gestão de recursos hídricos.

5. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA (Brasil). **Hidroweb – Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>. Acesso em: jul. 2015.
- BAENA, L. G. N.; SILVA, D. D. da; PRUSKI, F. F.; CALIJURI, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do Rio Paraíba Do Sul. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 612–624, 2004.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R. de; VARGAS, M. M.; CORRÊA, L. de L.; CALDEIRA, T. L.; DURÃES, M. S. F. et al. Artificial intelligence techniques coupled with seasonality measures for hydrological regionalization of Q_{90} under Brazilian conditions. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1406–1419, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.046>
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, 09 jan. 1997.
- CHAVES, H. M. L.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 3, p. 43–51, 2002. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v7n3.p43-51>
- COSTA, A. S.; CARIELLO, B. L.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. Regionalização de curvas de permanência de vazão de regiões hidrográficas do estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 413–422, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862012000400005>
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, p. 111–124, 2008.

- ELESBON, A. A. A.; SOARES GUEDES, H. A.; SILVA, D. M. da; CASTRO E OLIVEIRA, I. de. Uso de dados SRTM e plataforma SIG na caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Braço Norte do Rio São Mateus - Brasil. **Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 3, p. 281-288, 2011.
- ELESBON, A. A. A.; SILVA, D. D. da; SEDIYAMA, G. C.; GUEDES, H. A. S.; RIBEIRO, C. A. A. S.; RIBEIRO, C. B. de M. Multivariate statistical analysis to support the minimum streamflow regionalization. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 838-851, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n5p838-851/2015>
- ELETRORBRÁS. **Centrais Elétricas Brasileiras**: metodologia para regionalização de vazões. Rio de Janeiro, 1985. 2v.
- ESRI. **Help on line**. Disponível em: <http://resources.esri.com/arcgisdesktop/>. Acesso em: mar. 2016.
- HASENAK, H.; WEBER, E. **Base Cartográfica Vetorial Contínua do Rio Grande do Sul**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia, Laboratório de Geoprocessamento, 2010. 21 p. Escala 1:50.000.
- GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D. da. Comparison between hydrographically conditioned digital elevation models in the morphometric characterization of watersheds. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 932-943, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000500012>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Demográfico**. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: mar. 2016.
- LISBOA, L.; MICHEL, C. M.; SILVA, D. D. da; PRUSKI, F. F. et al. Estimativa e regionalização das vazões mínimas e média na bacia do Rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, v. 16, p. 471-479, 2008. <http://dx.doi.org/10.13083/1414-3984.v16n04a11>
- MELATI, M. D. Regressões simples e robusta na regionalização da vazão Q95 na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas. **Ciencia e Natura**, v. 38, p. 722-739, 2016. <http://dx.doi.org/10.5902/2179-460X19116>
- MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. da. Análise de Métodos para Estimativa das Vazões da Bacia do Rio Paraopeba. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 313-324, 2014.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282-290, 1970. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- NOVAES, L. F. de et al. Gestão de recursos hídricos: uma nova metodologia para a estimativa das vazões mínimas. **Engenharia na agricultura**, v. 17, n. 1, p. 62-74, 2009.
- NOVAES, L. F. de. **Modelo para a Quantificação da Disponibilidade Hídrica na Bacia do Paracatu**. 2005. 104 f. Tese (Magister Scientiae) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

- NOVAES, L. F. de; PRUSKI, F. F.; QUEIROZ, D. O. de; RODRIGUEZ, R. del G.; SILVA, D. D. da; RAMOS, M. M. Avaliação do desempenho de cinco metodologias de regionalização de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 51-61, 2007.
- PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. 2004. 104 f. Tese (Doctor Scientiae) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- PRUSKI, F. F.; RODRIGUEZ, R. D. G.; PRUSKI, P. L.; NUNES, A. de A.; REGO, F. S. Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 830-838, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p830-838/2016>
- RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 37.033, de 21 de novembro de 1996. Regulamenta a outorga do direito de uso da água no Estado do Rio Grande do Sul, prevista nos arts. 29, 30 e 31 da Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, 22 nov. 1996. Disponível em: <http://www.legislacao.sefaz.rs.gov.br/>. Acesso em: abr. 2016.
- SANTOS, I. I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R.; VON B. BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E. et al. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Pesquisas para o Desenvolvimento, 2001. 372 p.
- SERVIÇO TÉCNICO DE ENGENHARIA S. A. – STE. **Plano de bacia do rio Taquari-Antas**. Brasília: Comitê de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, 2012.
- SILVA, A. M. da; OLIVEIRA, P. M. de; MELLO, C. R. de; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 374-380, 2006.
- SILVA, D. D. da; MARQUES, F. de A.; LEMOS, A. F. Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para bacia do Rio São Francisco. **Engenharia na agricultura**, v. 17, p. 392-403, 2009.
- SILVEIRA, G. L. da; ROBAINA, A. D.; GIOTTO, E.; DEWES, R. Outorga para uso dos recursos hídricos: aspectos práticos e conceituais para o estabelecimento de um sistema informatizado. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, p. 5-16, 1998. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v3n3.p5-16>
- SOUSA, H. T. **Sistema computacional para regionalização de vazões**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001.
- TUCCI, C. E. M. **Secas no Rio Grande do Sul**. 2012. Blog do Tucci. Publicação online. Disponível em: <http://rhama.net/wordpress/?p=293>. Acesso em: 05 out. 2016.
- VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow duration curves I: new interpretation and confidence intervals. **Water Resources Planning Management**, v. 120, n. 4, p. 485-504, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485))

WOLFF, W.; DUARTE, S.; MINGOTI, R. Nova metodologia de regionalizaÇão de vazões, estudo de caso para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, p. 21–33, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p21-33>