

COMPARAÇÃO DA VAZÃO Q95% OBTIDA ATRAVÉS DO ESTUDO DE REGIONIZAÇÃO DE VAZÕES E DE MODELAGEM HIDROLÓGICA COM USO DO MODELO SWAT PARA ESTAÇÕES DA BACIA REPRESENTATIVA DO RIO PIABANHA

Mariana Dias Villas-Boas^{1*}, Filipe Jesus dos Santos¹, Janaina G.Pires da Silva¹, Marcelo Parente Henriques¹, Marcio Junger Ribeiro¹, Rubens Esteves Kenup², Adriana Dantas Medeiros², José Paulo Soares de Azevedo², Francisco Olivera³,

1 Serviço Geológico do Brasil - CPRM

2 Texas A&M University

3 Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE

* mariana.villasboas@cprm.gov.br

Resumo:

O conhecimento da disponibilidade hídrica de uma bacia é fundamental para o gerenciamento dos seus recursos hídricos. Dentre as ferramentas disponíveis para essa finalidade destacam-se: a regionalização de vazões e a modelagem hidrológica. Ambas auxiliam a transferência de informações hidrológicas de locais com série de vazões representativas para outros locais com pouca ou nenhuma informação usando diferentes técnicas. Nesse trabalho apresenta-se a comparação da estimativa da vazão mínima de permanência de noventa e cinco por cento, a chamada Q95%, para dois pontos de interesse inseridos na bacia do rio Piabanha, uma das principais sub-bacias da bacia do rio Paraíba do Sul através dessas duas ferramentas. A partir dos resultados observa-se uma melhor estimativa da Q95% utilizando a modelagem hidrológica quando comparada com o método da regionalização de vazões.

Abstract:

The water availability of a watershed is fundamental for its water resources management. Among the tools available for this purpose, there are, for instance, flow regionalization and hydrological modeling. Both assist in the transfer of hydrological information from sites with series of representative flows to other sites with little or no information using different techniques. This work presents a comparison of the estimation of the minimum flow of ninety-five percent, called Q95%, to two points of interest in the Piabanha basin, one of the main sub-basins of the Paraíba do Sul river watershed based on these two tools. From the results, a better estimate of Q95% is obtained using hydrological modeling when compared to the regionalization method.

INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica superficial de uma bacia hidrográfica é usualmente medida pela vazão mínima de sete dias de duração com tempo de recorrência de 10 anos (Q7,10) ou pela vazão com 95% de permanência no tempo (Q95%), ambas vazões mínimas e de referência para concessão de outorga de direito de uso da água. Essas variáveis são, normalmente, determinadas com base nas séries de vazões naturais ou reais, que são definidas em função da monitoração efetuada nas estações fluviométricas de uma rede hidrometeorológica (CPRM, 2011).

Uma rede hidrometeorológica, ainda que densa, dificilmente atenderá com seus dados às necessidades de informação para a gestão de recursos hídricos, em especial no subsídio à outorga de vazões. Sempre haverá a necessidade de se determinar a disponibilidade hídrica onde se originam as demandas, que muitas vezes são locais sem monitoramento ou com dados constituindo séries de curta duração ou com períodos longos de falhas de observação (CPRM, 2017).

Com a finalidade de se espacializar a informação hidrológica, normalmente pontual (das estações), possibilitando a transferência de informações de uma região para outra, mesmo que não monitorada podem ser utilizadas diversas ferramentas, dentre as quais: a regionalização e os modelos hidrológicos.

Os estudos de regionalização transferem a informação de uma região para outra desde que elas tenham comportamento hidrológico semelhante. Assim, na caracterização da região são reunidas informações que auxiliam a compreensão em termos conceituais dos processos hidrológicos e a identificação das regiões homogêneas, isto é, com comportamento semelhante. Vale ressaltar, que segundo TUCCI (2000) a regionalização não pode ser vista como um método de extrapolação, em razão da variabilidade dos processos hidrológicos, e por isso nenhum estudo poderá substituir uma rede adequada de monitoramento.

Os modelos hidrológicos podem ser definidos como simplificações da realidade traduzidas através de parâmetros e equações (VILLAS-BOAS, 2018). Assim, a grande questão que envolve os modelos é até que ponto eles podem efetivamente representar a realidade, ou seja, como efetivamente estimar a distância entre a representação e realidade (BEVEN, 2001). Segundo TUCCI (1998), a representação dos processos hidrológicos através de modelos é a forma encontrada pelo hidrólogo para estudar os diferentes componentes da parte terrestre do ciclo hidrológico relacionados às interações antrópicas. Os chamados modelos “chuva-vazão” são aqueles que possuem, no mínimo, como variável de entrada a precipitação e como variável de saída a vazão em determinado ponto, ou seja, representam matematicamente a transformação da chuva em vazão. Dependendo da complexidade do modelo, pode haver mais variáveis de entrada (i.e. dados de evapotranspiração) e parâmetros (i.e. parâmetros que descrevem as propriedades do solo) para descrever esse processo de transformação (VILLAS-BOAS, 2018).

OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é comparar os resultados obtidos para estimativa da vazão mínima de permanência de noventa e cinco por cento, a chamada Q95%, através do estudo de regionalização (CPRM, 2017) e da modelagem hidrológica utilizando o modelo SWAT (VILLAS-BOAS, 2018) tendo como referência a Q95% calculado a partir dos dados observados no ponto de interesse.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo selecionada para o trabalho está inserida na bacia do rio Piabanha, uma das principais sub-bacias da bacia do Paraíba do Sul. O rio Piabanha é afluente pela margem direita do rio Paraíba do Sul cuja bacia ocupa uma área de aproximadamente 2.050 km², a maior parte inserida na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro (VILLAS-BOAS *et al.*, 2011).

Nessa bacia funciona projeto Estudos Integrados em Bacias Experimentais e Representativas – Região Serrana/RJ – EIBEX, desde 2007, onde o Serviço Geológico do Brasil – CPRM opera uma rede hidrometeorológica com 13 estações apresentadas no Quadro 1. O projeto tem como objetivo a avaliação do comportamento hidrológico em região com biomanatural Mata Atlântica, e em áreas de ocupação agrícola e urbanizada e visa desenvolver pesquisa e estudos na área de hidrologia, com ênfase em: climatologia, qualidade da água, solos, GIS, e também o uso de diferentes tecnologias de medição de dados com base em uma rede de monitoramento hidrometeorológica (VILLAS-BOAS *et al.*, 2017).

Para essa finalidade foi, então, definida uma bacia representativa, com cerca de 400km², que reunisse as características de uso de solo e vegetação da bacia do rio Piabanha para que os resultados pudessem ser utilizados na gestão de recursos hídricos, tendo como seção de controle a estação Pedro do Rio. Dentro desta área, foram definidas três bacias experimentais, onde predominam os diferentes usos do solo existentes: em área de mata Atlântica preservada, em área predominantemente de uso agrícola e área de ocupação urbana, respectivamente, com as seguintes áreas: 47 km², 30 km² e 13km², representadas na Figura 1.

Atualmente as estações da Rede contam com medições convencionais (pluviômetro (P) e réguas limnimétricas (P)) e com equipamento automático (r). Há duas estações climatológicas na bacia (C) que fazem as seguintes medições: pressão atmosférica, umidade relativa do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade e direção do vento, radiação solar incidente, radiação líquida, evaporação, potencial matricial, fluxo de calor e

umidade do solo, temperatura do solo e precipitação. Há 5 estações que são telemétricas (T). Em todas as estações fluviométricas são realizadas medições de vazão (D) a cada dois meses e medições de qualidade de água (Q) com frequência variável de acordo com o estudo. Os dados de monitoramento ainda não estão sendo disponibilizados *on line* mas podem ser requeridos através do website da CPRM (VILLAS-BOAS *et al.*, 2017).

Quadro 1 - Informações das estações de monitoramento do projeto EIBEX.

ESTAÇÃO	Sigla	Codigo FLU	Codigo PLU	TIPO	CURSO D'AGUA	LATITUDE	LONGITUDE	Data de início da operação - PLU/FLU	Data de início da operação - QA
Pq.Petropolis	PP	58400250	2243286	CFDFrQT	Rio Piabanha	22° 24' 19"	43° 08' 00"	1/8/09	27/8/09
Esperança	E	58400010	2243287	PPRDFrQ	Rio Piabanha	22° 30' 39"	43° 12' 37"	28/4/07	27/8/09
Liceu	L	58400050	2243289	PPRDFrQT	Rio Piabanha	22° 29' 14"	43° 10' 38"	24/4/07	27/8/09
Morin	M	58400030	2243288	PPRDFrQ	Rio Palatinado	22° 31' 00"	43° 10' 08"	22/4/07	27/8/09
Poço Tarzan	PT	58400110	2243303	PPRDFrQT	Rio Bonfim	22° 27' 14"	43° 06' 28"	23/4/07	27/8/09
Poço do Casinho	PC	58400104	****	FDfrQ	Rio Açú	22° 27' 39,6"	43° 05' 40,8"	31/10/07	27/8/09
Joao Christ	JC	58400108	****	FDQ	Rio Alcobaça	22° 27' 37,19"	43° 05' 59,76"	28/10/07	27/8/09
Pedro do Rio	PR	58405000	*****	PPRDFrQT	Rio Piabanha	22° 19' 56"	43° 08' 01"	1/8/30	27/8/09
Vila Açú	VA	****	2243301	PPR	****	22° 27' 45,20"	43° 05' 29,30"	1/11/09	-
Sítio das Nascentes	SN	****	2243291	C	****	22° 28' 7,63"	43° 06' 9,21"	31/10/2007e1	-
Rocio 2 - Ponte	R	58400212	****	FDQ	Rio da Cidade	22° 28' 38,70"	43° 15' 24,60"	28/4/10	27/8/09
Rocio 2 - D	RD	58400210	2243302	FDfr	Rio da Cidade	22° 28' 38,86"	43° 15' 28,95"	1/4/10	-
Rocio 2 - E	RE	58400211	*****	PPRDFrT	Rio da Cidade	22° 28' 37,69"	43° 15' 27,66"	1/4/10	-

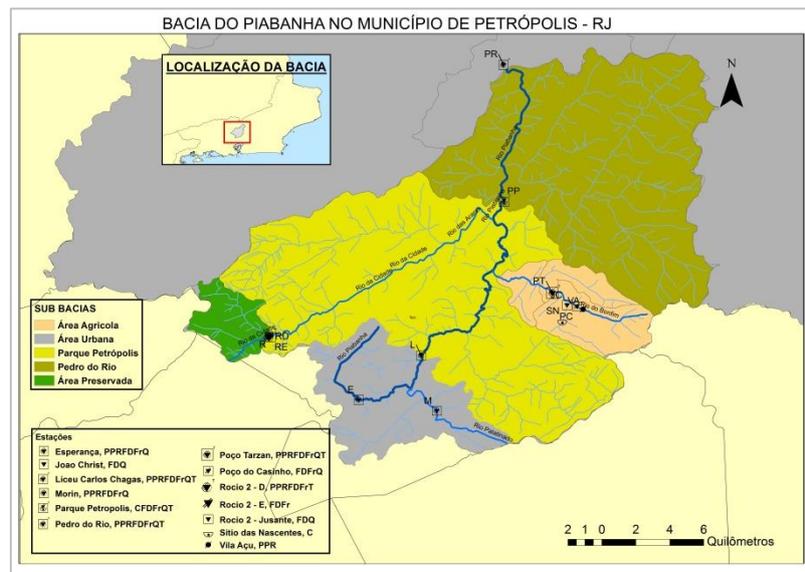


Figura 1: Localização da área de estudo selecionada referente a bacia representativa do projeto EIBEX, as bacias experimentais e a rede hidrometeorológica operada pela CPRM.

A comparação entre as duas metodologias para o cálculo da Q95% será feita para a área da bacia representativa utilizando apenas as estações de Pedro do Rio e Parque Petrópolis devido às restrições de área mínima do estudo de regionalização de vazões.

Métodos

Nesse trabalho foram utilizados dois métodos para cálculo da Q95%: a regionalização de vazões e a modelagem hidrológica através do modelo SWAT.

Regionalização de vazões

Em 2017, Serviço Geológico do Brasil - CPRM lançou uma atualização dos estudos de regionalização para a bacia do Paraíba do Sul (sub-bacia 58). Os estudos tiveram como base a metodologia consolidada pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, reunida e apresentada em TUCCI (2000). A metodologia foi aplicada apenas para a variável dependente Q95% que foi definida através de equações de regressão em função das variáveis independentes, precipitação e/ou área de drenagem com base em métricas estatísticas. Mais informações podem ser encontradas em MELLO *et al.*, 2017.

Os dados fluviométricos utilizados no projeto foram, em sua maioria, da RHN (Rede Hidrometeorológica Nacional), gerenciada pela ANA e operada pela CPRM na região, complementados por dados de outras entidades. Já os dados pluviométricos utilizados foram somente da RHN consistidos pela CPRM para o Projeto Atlas Pluviométrico da CPRM (CPRM, 2010) que produziu as isoietas médias mensais para o Brasil.

Primeiramente foi realizada a regressão para toda área da sub-bacia 58, constatando-se um melhor ajuste utilizando ambas as variáveis, Precipitação Média e Área de Drenagem, com base nas seguintes estatísticas: a raiz quadrada do erro relativo médio (RMS), R² e erro relativo linear para cada estação. Depois de ajustada a equação para as duas variáveis independentes retirou-se a precipitação média verificando se houve melhora no ajuste. As equações de regressão estabelecidas foram lineares ou de potência, simples ou múltiplas.

Os resultados, da análise de regressão, definiram para Q95% vinte regiões homogêneas e uma região indefinida, que abrange a região da sub-bacia do Pirai, responsável pela transposição de vazões que abastece grande parte da cidade do Rio de Janeiro. Após a definição das vinte regiões homogêneas foram ajustadas as equações regionais para cada uma das regiões bem como definidos os limites de validade para a área de drenagem. Para algumas regiões foi possível o uso das equações somente com área, é o caso da região I, X, XIX e XX, que apresentaram valor de R² ajustado e o somatório dos erros quadráticos maior na regressão múltipla. Outra região é a XVIII, com o ajuste do R² mais preciso usando somente uma das variáveis. As equações de regressão regionais são apresentadas na Tabela 1 (MELLO *et al.*, 2017).

Tabela 1 – Equações Regionais Para As Regiões Homogêneas Da Bacia-58 (MELLO *et al.*, 2017)

Região Homogênea	Equação regional sendo: Q(m ³ /s), A (km ²) e P (m)	R ² ajustado	Validade Área (km ²)
I	$Q95\% = 10^{-2,2610} \times A^{0,9795} \times P^{0,9450}$	0,9974	44 a 2.731
	$Q95\% = 10^{-2,1423} \times A^{0,9934}$	0,9933	
II	$Q95\% = 10^{-3,9393} \times A^{1,2873} \times P^{4,6965}$	0,9974	30 a 9.860
III	$Q95\% = 10^{-3,0827} \times A^{1,2270} \times P^{2,3806}$	0,9837	64 a 1396
IV	$Q95\% = 10^{-3,0144} \times A^{1,0873} \times P^{3,6731}$	0,9955	18 a 805
V	$Q95\% = 10^{-3,2421} \times A^{1,0779} \times P^{5,2049}$	0,9984	36 a 5.399
VI	$Q95\% = 10^{-3,5733} \times A^{1,2187} \times P^{4,1909}$	0,9993	157 a 13.617
VII	$Q95\% = 10^{-3,1868} \times A^{1,0469} \times P^{4,6100}$	0,9418	377 a 1.427
VIII	$Q95\% = 10^{-2,4447} \times A^{1,1076} \times P^{0,0172}$	0,9994	37 a 11.583
IX	$Q95\% = 10^{-4,4494} \times A^{1,3799} \times P^{5,3951}$	0,9979	174 a 16.109
X	$Q95\% = 10^{-3,0150} \times A^{1,0767} \times P^{3,1103}$	0,9983	48 a 1.816
	$Q95\% = 10^{-1,8791} \times A^{0,9876}$	0,9936	
XI	$Q95\% = 10^{-2,6831} \times A^{1,0790} \times P^{1,7961}$	0,9989	176 a 3.421
XII	$Q95\% = 10^{-9,7936} \times A^{2,0754} \times P^{16,0225}$	0,9769	17.737 a 55.576
XIII	$Q95\% = 10^{-2,3424} \times A^{1,0055} \times P^{1,4222}$	0,9965	151 a 8.615
XIV	$Q95\% = 10^{-2,0485} \times A^{0,7786} \times P^{2,2228}$	0,9974	52 a 2.063
XV	$Q95\% = 10^{-1,7270} \times A^{0,8509} \times P^{0,2547}$	0,9864	104 a 1.814
XVI	$Q95\% = 10^{-2,7613} \times A^{0,8899} \times P^{6,1243}$	0,9982	290 a 3.118

do programa de domínio público SWAT-CUP. Mais detalhes da calibração do SWAT para a bacia podem ser encontrados em (VILLAS-BOAS, 2018).

Nesse trabalho foram utilizados os resultados da calibração diária de vazões para as estações Pedro do Rio e Parque Petrópolis apresentados, respectivamente, nas Figuras 3 e 4. O Quadro 2 relaciona as características das duas estações extraídas da modelagem hidrológica.

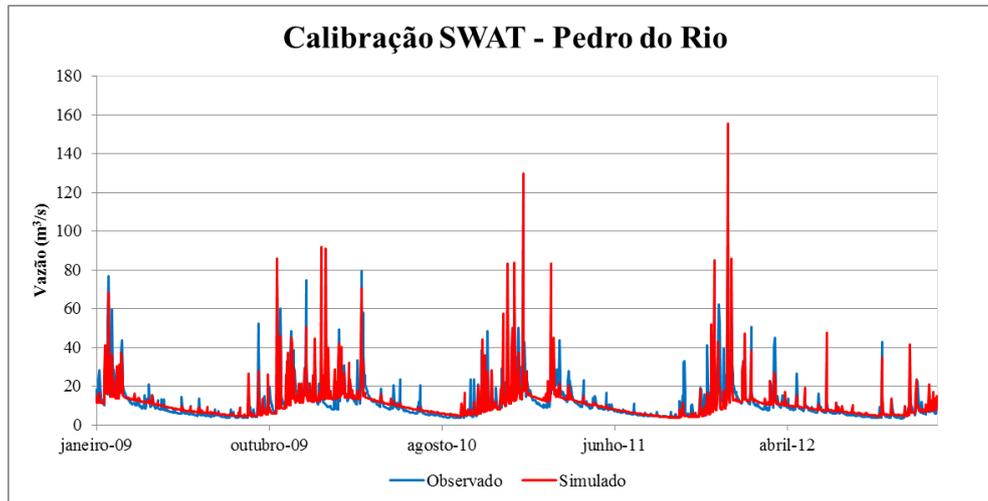


Figura 3: Vazões diárias observadas e simuladas na calibração do modelo SWAT para a estação Pedro do Rio.

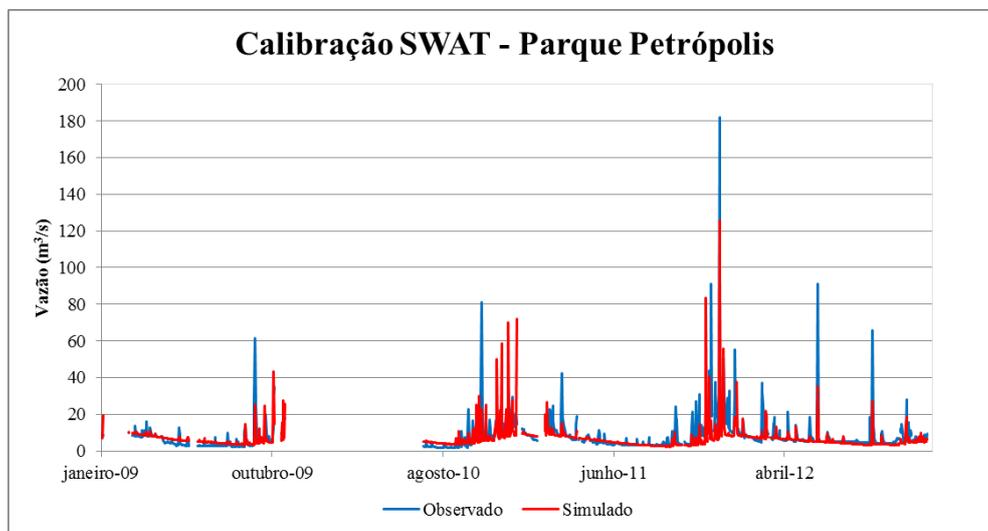


Figura 4: Vazões diárias observadas e simuladas na calibração do modelo SWAT para a estação Parque Petrópolis.

Quadro 2 – Características dos pontos de interesse do estudo, Pedro do Rio e Parque Petrópolis, extraídas da modelagem hidrológica.

Características ESTAÇÃO	ÁREA (km ²)	PTAM (mm)	Métricas Estatísticas - Calibração SWAT			
			NSE	PBIAS	R2	RSR
Pedro do Rio - PR	413	1261	0.55	2	0.62	0.67
Parque Petrópolis - PP	263	1463	0.46	14	0.49	0.73

Metodologia

Para este trabalho a metodologia seguiu as seguintes etapas:

1. Seleção dos pontos de interesse para cálculo da Q95% e comparação dos métodos – os pontos selecionados foram as estações Pedro do Rio e Parque Petrópolis;
2. Seleção dos dados diários de vazão dos pontos de interesse – foram selecionados os dados diários observados e os simulados pelo modelo SWAT no período de 2009-2012 para a estação Pedro do Rio e apenas 2011 e 2012 para Parque Petrópolis devido aos grandes períodos de falhas dos anos 2009 e 2010 (Figuras 3 e 4 respectivamente);
3. Construção da Curva de Permanência de cada estação usando os dados observados e simulados pelo SWAT – a partir do Microsoft Excel - ordenou-se decrescentemente as vazões diárias das estações, sem estabelecimento de intervalos de classe, e então acumulou-se as frequências no sentido da maior vazão para a menor, para obtenção das abscissas da curva. A curva de permanência relaciona a vazão e a frequência com a qual os valores ocorreram ao longo do tempo, maiores ou iguais ao valor da ordenada.
4. Estimativa da Q95% a partir dos dados observados e simulados pelo modelo SWAT - os valores foram obtidos com a função percentil do Excel, aplicada às vazões ordenadas.
5. Cálculo das áreas de drenagem dos pontos de interesse – Foram utilizadas as áreas estimadas na modelagem hidrológica;
6. Cálculo da Precipitação Total Anual média (PTAM) para as áreas das duas estações – foram utilizados os valores de precipitação calculados através do modelo hidrológico SWAT com base nas estações pluviométricas fornecidas;
7. Estimativa da Q95% a partir da equação de regionalização usando as áreas de drenagem e a PTAM;
8. Comparação das estimativas da Q95% pelos diferentes métodos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 5 e 6 apresentam as curvas de permanência das estações Pedro do Rio e Parque Petrópolis, respectivamente, com base nos dados observados e simulados.

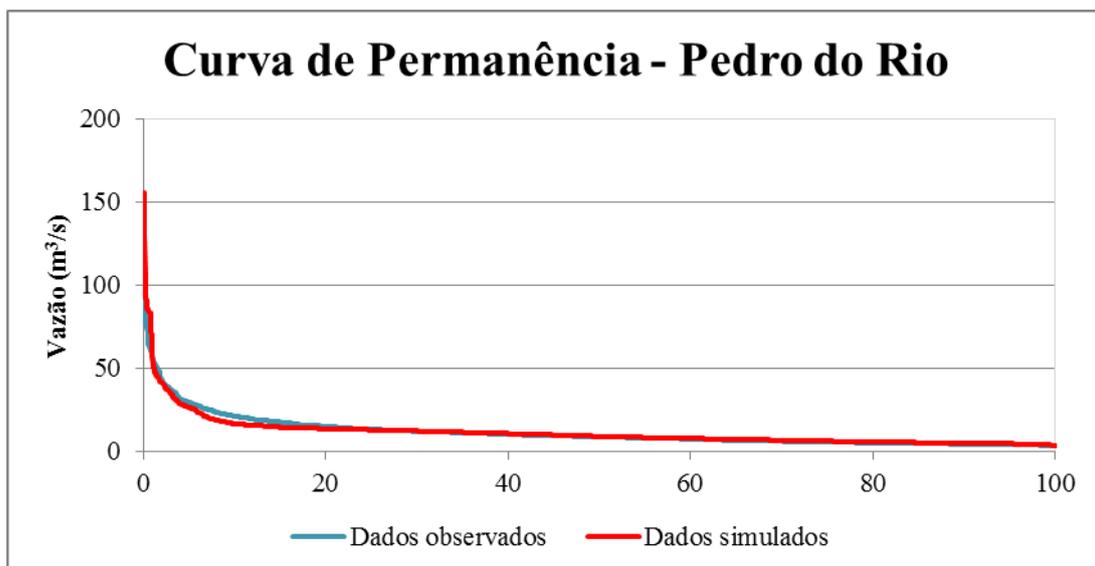


Figura 5 – Curva de permanência de Pedro do Rio com base nos dados observados e simulados no modelo SWAT.

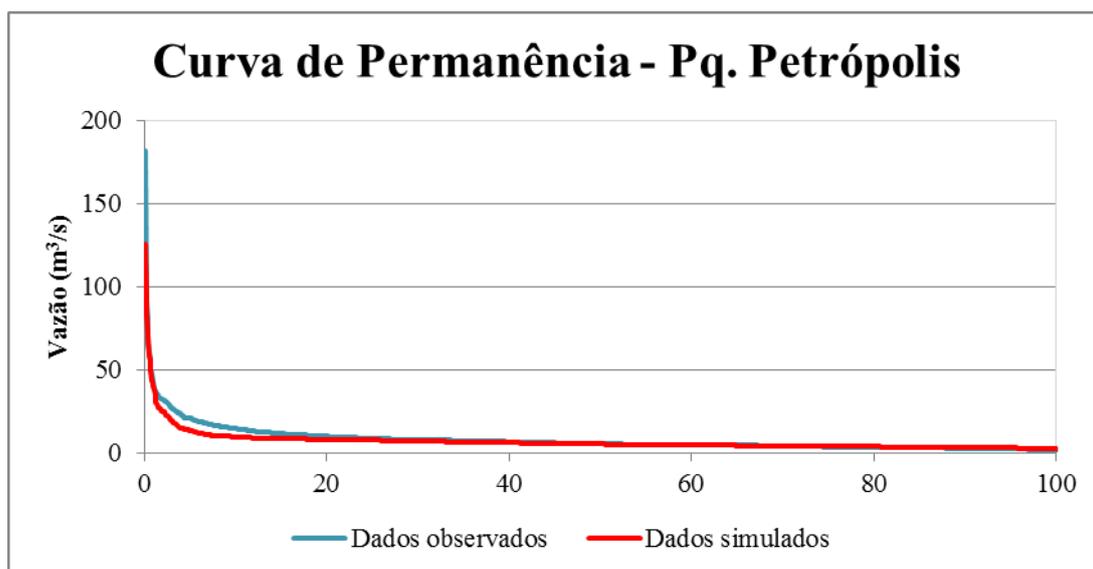


Figura 6 – Curva de permanência de Parque Petrópolis com base nos dados observados e simulados no modelo SWAT.

É possível observar que para ambas as estações a curva a partir dos dados simulados ficou bem similar a dos dados observados. A seguir, foi possível estimar os valores da Q95%, apresentados no Quadro 3. Foi calculado o erro percentual entre os dados observados e os simulados (*Erro (%) – Modelagem*) onde nota-se um erro menor para a estação Pedro do Rio, 16%.

Em seguida, com base na Equação de regionalização da Região Homogênea XIV (Tabela 1), nas áreas e precipitação total anual média (Quadro 2), foi estimada a Q95% para os dois pontos de interesse (Quadro 3). Nesse caso, observa-se um erro maior para a estação Pedro do Rio, 59% do que para Parque Petrópolis, 34%.

Comparando-se os dois métodos utilizados para estimativa da Q95%, Modelagem Hidrológica e regionalização, observam-se erros menores, para ambas estações, usando-se a modelagem hidrológica.

Quadro 3 – Valores de Q95% estimados e erro percentual em relação aos dados observados.

ESTAÇÃO	Q95% (m ³ /s) Dados observados	Q95% (m ³ /s) Dados simulados	Q95% (m ³ /s) Regionalização	Erro (%) - Modelagem	Erro (%) - Regionalização
Pedro do Rio - PR	3.97	4.60	1.63	16	59
Parque Petrópolis - PP	2.43	3.10	1.60	27	34

CONCLUSÕES

A estimativa da vazão mínima de uma bacia hidrográfica é fundamental para o entendimento da sua disponibilidade hídrica e para uma série de ações relacionadas ao gerenciamento de recursos hídricos. Nesse trabalho foram comparados dois métodos de estimativa da vazão de permanência Q95% que normalmente é calculada a partir dos dados observados de uma estação fluviométrica.

Para esse trabalho, foram selecionadas duas estações da bacia representativa do rio Piabanha, afluente do rio Paraíba do Sul, monitorada pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM através do projeto EIBEX. Para ambas as estações, a vazão Q95% estimada através da modelagem hidrológica, com base na calibração do modelo SWAT, apresentou menores erros relativos percentuais do que aquela estimada pela equação de regionalização quando comparada com a calculada através dos dados observados.

Vale ressaltar, quanto maior a série de dados de vazões diárias da estação mais representativo é o valor da Q95%.



AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos colegas Achilles Monteiro (in memoriam) e Lígia Araújo pelo apoio e incentivo e ao MCT / FINEP / CT-HIDRO e Coordenação da Melhoria do Pessoal de Educação Superior - CAPES – Brasil (MEC / MCTI / CAPES / CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CPRM, 2010 – Atlas pluviométrico do Brasil - <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>.

CPRM, 2011 - Disponibilidade Hídrica do Brasil – Estudos de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras - Regionalização da Q95% na sub-bacia 39: CPRM, 2011.

CPRM, 2017 - MELO, J. S., VILLAS-BOAS, M.D., Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras : estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 58: CPRM, 2017.

MELO, J.S., VILLAS-BOAS, M.D., PINTO, E.B.A, VIEIRA, M.S.V., 2017. Regionalização de vazão de 95% de permanência da sub-bacia 58 – bacia do rio Paraíba do Sul. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos 2011, Florianópolis/SC.

TUCCI, C. E. M. *Regionalização das Vazões* - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - IPH – UFRGS. Porto alegre, 2000.

VILLAS-BOAS, M.D., BASTOS, A.O., ARAÚJO, L.M.N., SILVA, F.J., MONTEIRO, A.E.G.C., 2011. Manejo do uso do solo como mecanismo regulatório da gestão da qualidade da água - estudo de caso: a bacia do rio Piabanha. In: XIVth IWRA World Water Congress, Porto de Galinhas/PE.

VILLAS-BOAS, M.D., SANTOS, F.J., SILVA, J.G.P., HENRIQUES, M.P., RIBEIRO, M. J., MEDEIROS, A.D., AZEVEDO, J.P.S., OLIVERA, F.O., 2017. Os 10 anos do projeto institucional da CPRM: Estudos Integrados em Bacias Experimentais e Representativas – Região Serrana/RJ – conquistas e desafios futuros. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos 2011, Florianópolis/SC.

VILLAS-BOAS, M.D., 2018, *Ferramentas para avaliação da rede de monitoramento de qualidade de água da bacia do rio Piabanha – RJ com base em redes neurais e modelagem hidrológica*, 153 p., Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.