

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

INCERTEZA NAS ASSINATURAS HIDROLÓGICAS

Debora Yumi de Oliveira¹ & Jasper Alexander Vrugt^{2,3}

RESUMO – O uso de assinaturas hidrológicas ainda é pouco explorado e pode ser uma importante ferramenta na avaliação do realismo de modelos hidrológicos e na classificação das bacias hidrográficas. Tanto para uso na modelagem quanto na classificação de bacias, é importante que se tenha informação sobre a incerteza associada aos valores das assinaturas hidrológicas. O conhecimento sobre a incerteza nas assinaturas evita que modelos hidrológicos sejam indevidamente considerados inadequados em representar os processos hidrológicos dominantes e possibilita a determinação de valores de assinaturas significativamente diferente entre as bacias hidrográficas. O objetivo deste trabalho foi estimar a incerteza associada aos valores das assinaturas hidrológicas resultante do erro de medição da vazão. Foram utilizadas 13 assinaturas hidrológicas, estimadas para 328 bacias hidrográficas localizadas nos Estados Unidos. Elevados valores de erro de medição na vazão foram obtidos para bacias hidrográficas com baixa vazão média, baixo coeficiente de escoamento e baixo índice de escoamento de base. O índice de resposta da bacia, os parâmetros da análise de recessão de Brutsaert e Nieber e a elasticidade vazão-precipitação resultaram em valores elevados de incerteza. Para algumas assinaturas hidrológicas, a incerteza foi proporcional ao erro de medição. Outras assinaturas não apresentaram o mesmo comportamento.

ABSTRACT – The use of hydrological signatures is still poorly explored and can be a valuable tool in the evaluation of the realism of hydrological models and for catchment classification. In both cases, information about the uncertainties associated with the hydrological signatures values are important to prevent models being wrongly deemed inappropriate in the representation of the dominant hydrological processes and to better distinguish catchments with significantly different hydrological behavior. The aim of this paper was to quantify the uncertainty in hydrological signatures due to discharge measurement errors. We evaluated 13 hydrological signatures applied to 328 catchments from the CAMELS data set. Catchments with low mean discharge, low rainfall-runoff ratio and low baseflow index resulted in a large measurement error. The flashiness index, the parameters of the Brutsaert and Nieber recession analysis and the streamflow-precipitation elasticity presented a wide uncertainty. Some hydrological signatures were linearly related with the measurement error. Other hydrological signatures did not present the same behavior.

Palavras-Chave – Assinaturas hidrológicas, incerteza

1) Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Irvine, Irvine, California, USA. debora.ydo@gmail.com

2) Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Irvine, Irvine, California, USA. jasper@uci.edu

3) Department of Earth System Science, Joint Appointment, University of California Irvine, Irvine, California, USA.

INTRODUÇÃO

O uso de assinaturas hidrológicas ainda é pouco explorado e pode ser uma importante ferramenta na avaliação do realismo de modelos hidrológicos e na classificação das bacias hidrográficas. Estudos de comparação do desempenho de modelos hidrológicos mostraram a habilidade de diferentes modelos em reproduzir o hidrograma. O uso de assinaturas hidrológicas como uma ferramenta para avaliação dos modelos permitem que estes sejam testados mais rigorosamente, podendo ser verificado se bons resultados estão sendo obtidos pelos motivos certos. Além disso, a utilização de assinaturas hidrológicas permite que sejam identificados quais processos não estão sendo corretamente representados pelos modelos. Desta maneira, o uso de assinaturas na calibração e avaliação dos modelos hidrológicos pode guiar o refinamento do modelo, contribuindo para um aprimoramento na teoria, entendimento e previsão de sistemas hidrológicos. Além disso, assinaturas hidrológicas servem como base para a classificação das bacias hidrográficas, permitindo que sejam identificados conjuntos de bacias com comportamento hidrológico semelhante. Tanto para uso na modelagem quanto na classificação de bacias hidrográficas, é importante que se tenha informação sobre a incerteza dessas assinaturas hidrológicas. O conhecimento sobre a incerteza associada aos valores das assinaturas evita que modelos hidrológicos sejam indevidamente considerados inadequados em representar os processos hidrológicos dominantes e possibilita a determinação de valores de assinaturas significativamente diferentes entre as bacias hidrográficas.

O objetivo deste trabalho foi estimar a incerteza associada aos valores das assinaturas hidrológicas resultante do erro de medição da vazão. Foi utilizado um método que se baseia apenas em dados observados de vazão, não necessitando portanto do uso de modelos para propagação do erro da vazão para as assinaturas hidrológicas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

Neste trabalho foram consideradas as estações fluviométricas pertencentes à base de dados *Catchment Attributes and MEteorology for Large-sample Studies* – CAMELS (Newman *et al.*, 2015; Addor *et al.*, 2017). Nesta base de dados, são disponibilizados dados de 671 bacias minimamente impactadas por atividades humanas localizadas nos Estados Unidos. As séries de dados hidrometeorológicos são apresentadas em Newman *et al.* (2015) e os atributos de cada uma das bacias hidrográficas são apresentados em Addor *et al.* (2017). Os atributos das bacias são divididos em seis categorias: topografia, clima, hidrologia, uso da terra, solo e geologia. A localização de todas as 671 estações fluviométricas consideradas nesta base de dados é apresentada na Figura 1.

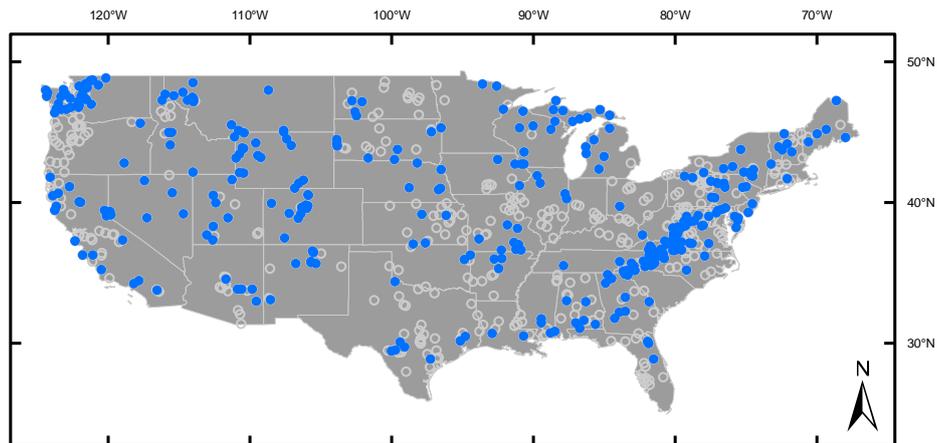


Figura 1. Localização das estações fluviométricas que compõem a base de dados CAMELS. As estações selecionadas para análise neste estudo são apresentadas em azul.

Assinaturas hidrológicas

Foram consideradas 13 assinaturas hidrológicas (Tabela 1): vazão diária média (q_{mean}); coeficiente de escoamento (r_{qp}); índice de escoamento de base calculado utilizando o filtro de Landson (bfi_1); índice de escoamento de base anual (bfi_2); dois parâmetros obtidos a partir da análise de recessão proposta por Brutsaert e Nieber (1977) (rec_1 e rec_2); inclinação da curva de permanência (s_{fdc}); dois parâmetros de ajuste da curva de permanência ao modelo de Van Genuchten (Sadegh *et al.*, 2016); percentil 5% da vazão (q_5 – vazões baixas); percentil 95% da vazão (q_{95} – vazões altas); índice de resposta da bacia (flash) (Baker *et al.*, 2004; Fenicia *et al.* 2017); e elasticidade vazão-precipitação (e_{qp}).

Tabela 1 – Assinaturas hidrológicas consideradas neste trabalho.

Assinatura	Descrição
q_{mean}	Vazão diária média
r_{qp}	Coeficiente de escoamento (razão da vazão diária média e da precipitação diária média)
bfi_{f1}	Índice de escoamento de base (razão entre o escoamento de base diário médio e a vazão diária média, separação do escoamento utilizando o filtro de Ladson <i>et al.</i> , 2013)
bfi_{f2}	Índice de escoamento de base anual
rec_1	Coeficiente linear da análise de recessão proposta por Brutsaert e Nieber (1977)
rec_2	Coeficiente angular da análise de recessão proposta por Brutsaert e Nieber (1977)
s_{fdc}	Inclinação da curva de permanência (entre os percentis 33 e 66 da vazão em valor logarítmico)
fdc_1	Parâmetro de ajuste da curva de permanência (Sadegh <i>et al.</i> , 2016)
fdc_2	Parâmetro de ajuste da curva de permanência (Sadegh <i>et al.</i> , 2016)
q_5	Percentil 5% da vazão (vazão baixa)
q_{95}	Percentil 95% da vazão (vazão alta)
flash	Índice de resposta da bacia (<i>flashiness index</i> - Baker <i>et al.</i> , 2004; Fenicia <i>et al.</i> , 2017)
e_{qp}	Elasticidade vazão-precipitação (sensibilidade da vazão à mudanças na precipitação em escala anual, usando vazão diária média como referência)

Para maiores detalhes sobre o cálculo de cada uma das assinaturas as referências citadas podem ser consultadas. As assinaturas q_mean , r_qp , bfi_1 , s_fdc , $q5$, $q95$, e e_qp são descritas em Addor et al. (2017) e nas referências citadas naquele trabalho. As assinaturas hidrológicas foram calculadas utilizando dados diários de vazão correspondentes ao período de 01 de outubro de 1989 a 30 de setembro de 2009 (20 anos).

Estimativa do erro de medição da vazão

As séries de vazão observadas $\tilde{y} = \{\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_n\}$ estão sujeitas a erros de medição, ou seja, o valor de vazão observado (medido) no tempo t pode ser representado como

$$\tilde{y}_t = h(t) + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim N(0, \sigma_t^0), \quad (1)$$

em que $h(t)$ é o valor de vazão real no tempo t e ε_t são erros aleatórios independentes, com média igual a zero e variância σ_t^0 desconhecida. A variância pode ser estimada a partir do método proposto por Vrugt *et al.* (2005),

$$\sigma_t^0 = \sqrt{\binom{2u}{u}^{-1} (\Delta^u \tilde{y}_t)^2} \quad (2)$$

em que Δ^u é o operador diferencial aplicado u vezes. As premissas para aplicação deste método são: (1) $h(t)$ é uma função suficientemente suave; e (2) a taxa de amostragem é elevada comparada com a variação de $h(t)$. Neste trabalho, foi considerado $u = 3$. As séries disponíveis são compostas de dados diários de vazão, o que dificulta o atendimento das premissas do método para todas as bacias hidrográficas consideradas. Para contornar este problema, foram excluídos os dados de picos de vazão (acima do percentil 95%) de todas as séries para a estimativa de σ_t^0 . Após a obtenção dos valores de σ_t^0 , o seguinte modelo de erro foi assumido:

$$\sigma_t = \sigma_0 + \sigma_1 \tilde{y}_t \quad (3)$$

em que σ_0 é o coeficiente linear do modelo e σ_1 é o coeficiente angular. Os valores de σ_0 e σ_1 foram obtidos a partir de uma regressão linear entre σ_t e \tilde{y}_t .

Incerteza nas assinaturas hidrológicas

Para estimar a incerteza nas assinaturas hidrológicas devido ao erro de medição de vazão, cada valor da série de vazão observada foi corrompido com um erro amostrado de uma distribuição normal centrada em zero e com variância σ_t . Este processo foi realizado 500 vezes, sendo então

obtidas 500 séries de vazão corrompidas para cada estação fluviométrica. Foram descartadas todas as estações fluviométricas que resultaram em valores negativos de vazão. Desta maneira, das 671 estações fluviométricas disponíveis na base de dados CAMELS, apenas 328 foram consideradas para o cálculo da incerteza nas assinaturas hidrológicas (Figura 1).

As séries corrompidas foram utilizadas no cálculo de cada uma das assinaturas hidrológicas apresentadas na Tabela 1. A incerteza para cada assinatura e para cada estação fluviométrica foi então sumarizada em termos de um intervalo de confiança de 95%. Para possibilitar a comparação da incerteza entre as assinaturas hidrológicas, que possuem magnitudes diferentes, a faixa de incerteza de 95% foi dividida pelo valor da assinatura hidrológica calculado a partir da série original de vazão observada.

RESULTADOS

Estimativa do erro de medição da vazão

A Figura 2 apresenta a distribuição dos valores do coeficiente angular do erro de medição σ_1 para cada uma das bacias consideradas neste estudo.

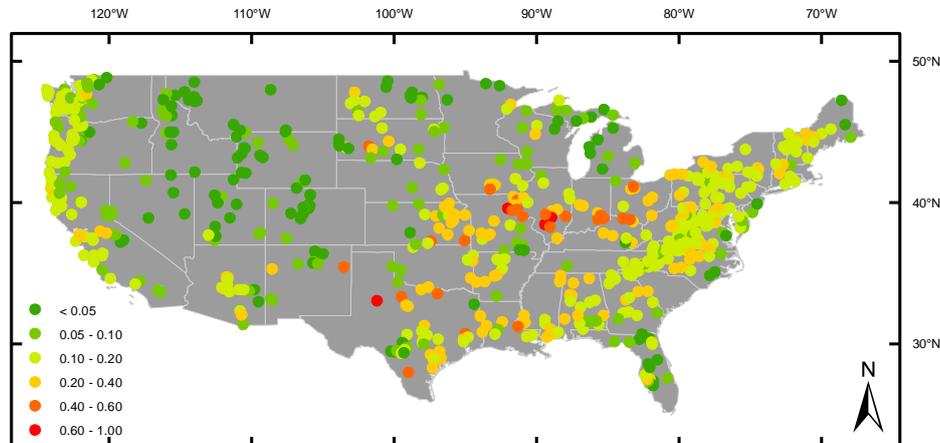


Figura 2. Valores do coeficiente angular do erro de medição para cada uma das bacias hidrográficas consideradas neste estudo.

Com o objetivo de se verificar quais fatores estão relacionados a um maior erro de medição, foi verificada a existência da relação entre σ_1 e índices climáticos e assinaturas hidrológicas das bacias hidrográficas. Foram obtidos maiores valores de σ_1 para as bacias hidrográficas com menores valores de vazão média, menores coeficiente de escoamento e menores índices de escoamento de base (Figura 3). Para estas bacias, a incerteza na vazão devido ao erro de medição ficou muito ampla, com valores negativos de vazão (sem sentido físico). Por este motivo, estas séries foram descartadas

da análise de incerteza das assinaturas hidrológicas. É esperado que para estas bacias as assinaturas hidrológicas estejam associadas a uma elevada incerteza. As bacias consideradas na análise de incerteza das assinaturas são apresentadas na Figura 1 (em azul).

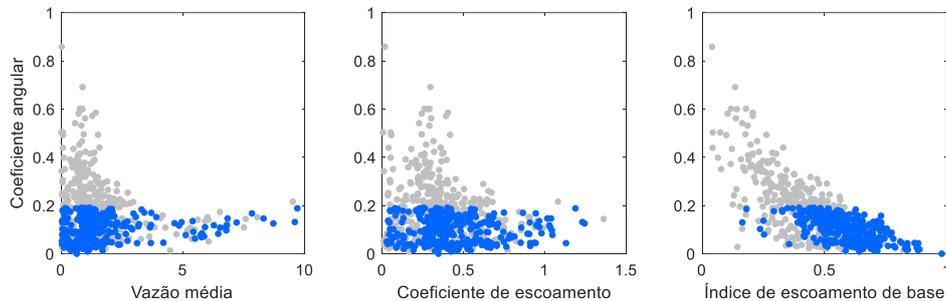


Figura 3. Relação entre o coeficiente angular do desvio padrão do erro e a vazão média, o coeficiente de escoamento e o índice de escoamento de base. Em azul estão os valores para as bacias selecionadas.

Incerteza nas assinaturas hidrológicas

As incertezas relativas para todas as assinaturas consideradas neste estudo são apresentadas na Figura 4. As menores incertezas foram obtidas para a vazão média (q_{mean}) e o coeficiente de escoamento (r_{qp}). Como a vazão média é calculada para um longo período (20 anos), o efeito da introdução de um erro aleatório na vazão observada acaba sendo amortecido. O coeficiente de escoamento é a razão da vazão diária média e da precipitação diária média e, portanto, também não é significativamente afetado pela existência de erros aleatórios. Já o índice de resposta da bacia (flash), os parâmetros da análise de recessão de Brutsaert e Nieber (rec_1 e rec_2) e a elasticidade vazão-precipitação (e_{qp}) resultaram em valores elevados de incerteza.

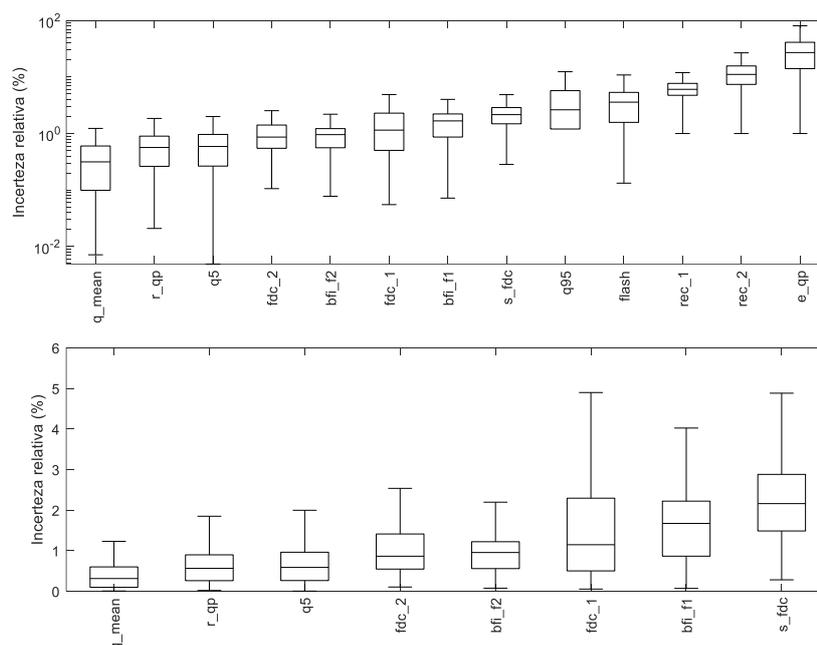


Figura 4. Incerteza relativa para todas as assinaturas hidrológicas consideradas neste estudo (painel superior) e para as assinaturas que apresentaram uma menor incerteza relativa (painel inferior).

A distribuição espacial dos valores das assinaturas assim como a magnitude da incerteza relativa para cada estação fluviométrica considerada são apresentadas na Figura 5. Para a maioria das assinaturas hidrológicas, quanto maior o valor da assinatura maior foi o valor da incerteza relativa. Esta relação não foi válida em duas situações: (i) para as assinaturas bfi_1 e bfi_2, em que maiores valores estiveram relacionados com uma menor incerteza relativa; e (ii) para as assinaturas rec_1 e rec_2, cuja incerteza não parece ter uma relação clara com a magnitude da assinatura.

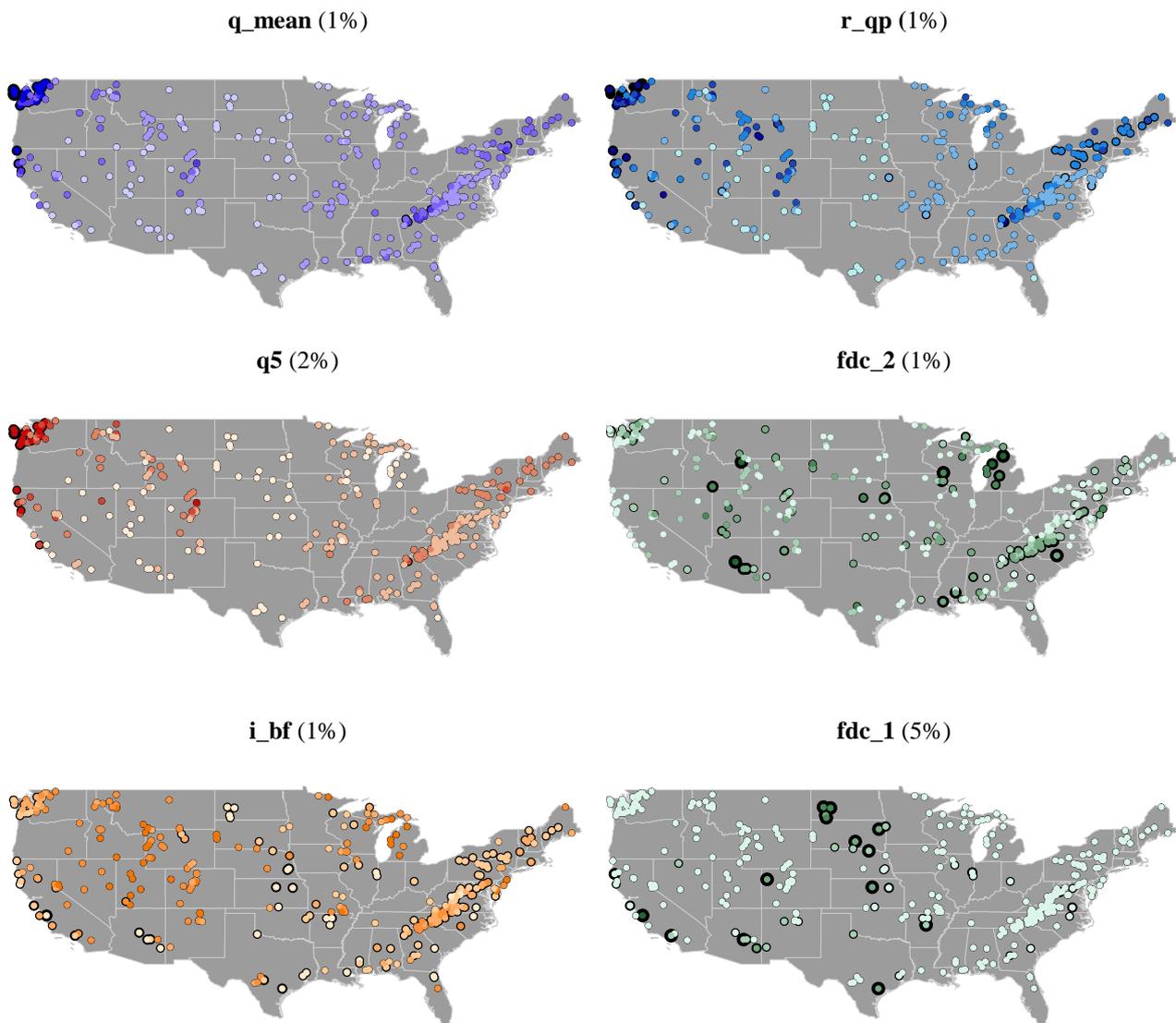


Figura 5. Assinaturas hidrológicas e incerteza relativa. A incerteza relativa é a razão entre a amplitude do intervalo de confiança de 95% dos valores de assinatura calculados para as séries de vazão corrompidas e valor da assinatura estimado a partir dos dados originais. O tamanho do círculo preto é proporcional ao valor da incerteza relativa, tendo sido dividido em 5 categorias para todas as assinaturas hidrológicas. A amplitude de cada categoria é apresentada entre parênteses ao lado da sigla da assinatura. q_mean é a vazão média diária; r_qp é o coeficiente de escoamento; bfi_1 é o índice de escoamento de base calculado utilizando o filtro de Landson; bfi_2 é o índice de escoamento de base anual; rec_1 e rec_2 são dois parâmetros da análise de recessão; s_fdc é a inclinação da curva de permanência; fdc_1 e fdc_2 são os dois parâmetros de ajuste da curva de permanência; $q5$ é o percentil 5% da vazão (vazões baixas); $q95$ é o percentil 95% da vazão (vazões altas); $flash$ é o índice de resposta da bacia; e e_qp é a elasticidade vazão-precipitação. (continua).

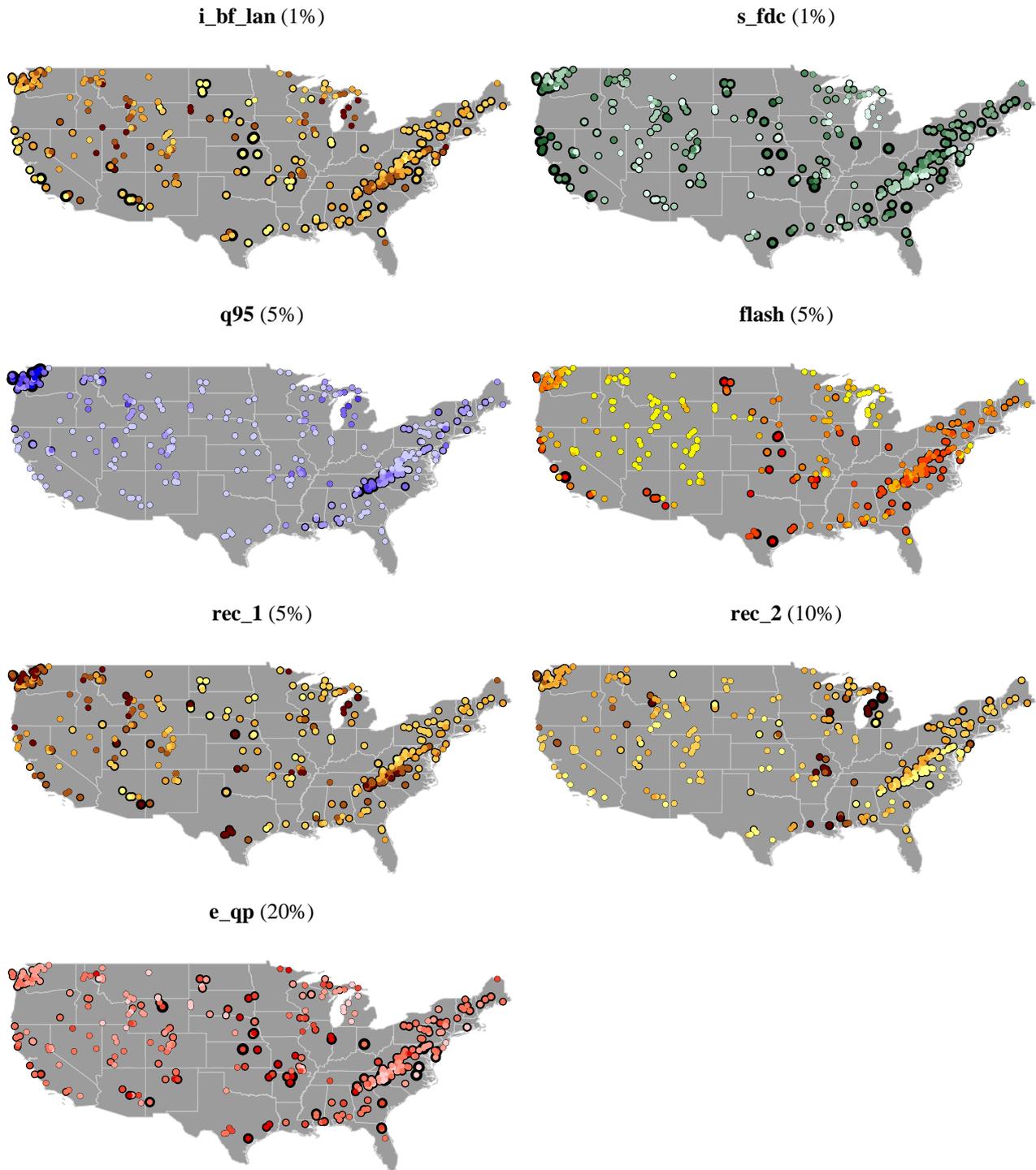


Figura 5 (continuação). Assinaturas hidrológicas e incerteza relativa. A incerteza relativa é a razão entre a amplitude do intervalo de confiança de 95% dos valores de assinatura calculados para as séries de vazão corrompidas e valor da assinatura estimado a partir dos dados originais. O tamanho do círculo preto é proporcional ao valor da incerteza relativa, tendo sido dividido em 5 categorias para todas as assinaturas hidrológicas. A amplitude de cada categoria é apresentada entre parênteses ao lado da sigla da assinatura. q_mean é a vazão média diária; r_qp é o coeficiente de escoamento; bfi_1 é o índice de escoamento de base calculado utilizando o filtro de Landson; bfi_2 é o índice de escoamento de base anual; rec_1 e rec_2 são dois parâmetros da análise de recessão; s_fdc é a inclinação da curva de permanência; fdc_1 e fdc_2 são os dois parâmetros de ajuste da curva de permanência; $q5$ é o percentil 5% da vazão (vazões baixas); $q95$ é o percentil 95% da vazão (vazões altas); $flash$ é o índice de resposta da bacia; e e_qp é a elasticidade vazão-precipitação.

Estimativa do erro de medição da vazão

Verificou-se uma correlação positiva entre a mediana das incertezas relativas de todas as assinaturas de uma mesma estação fluviométrica e o coeficiente angular do erro de medição da vazão (Figura 6). Ou seja, séries fluviométricas associadas a um maior erro de medição apresentam, em geral, maior incerteza nas assinaturas hidrológicas. Analisando cada assinatura hidrológica separadamente, verificou-se uma elevada correlação positiva entre as assinaturas r_{qp} , bfi_1 , bfi_2 , s_{fdc} , e_{qp} e $flash$ e o coeficiente angular do erro de medição da vazão. Para as demais assinaturas hidrológicas, esta relação foi mais fraca ou inexistente (resultados não apresentados).

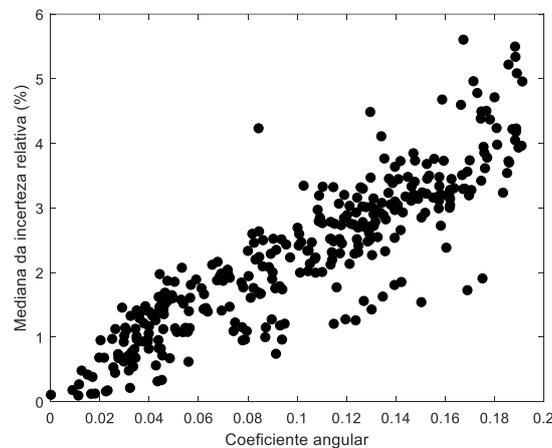


Figura 6. Relação entre a incerteza relativa das assinaturas hidrológicas e o coeficiente angular do erro de medição da vazão.

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo estimar a incerteza associada aos valores das assinaturas hidrológicas a partir do uso de um método de estimativa do erro de observação da vazão. Este método se baseia apenas em dados observados de vazão, não necessitando portanto do uso de modelos para propagação do erro da vazão para as assinaturas hidrológicas.

Foi verificado que: (i) maiores valores de erro de medição estão associados a bacias hidrográficas com menores valores de vazão média, menores coeficiente de escoamento e menores índices de escoamento de base; (ii) a vazão média (q_{mean}) e o coeficiente de escoamento (r_{qp}) apresentaram uma menor incerteza, enquanto que o índice de resposta da bacia ($flash$), os parâmetros da análise de recessão de Brutsaert e Nieber (rec_1 e rec_2) e a elasticidade vazão-precipitação (e_{qp}) resultaram em valores elevados de incerteza; (iii) para uma mesma assinatura hidrológica, maiores valores estão associados a uma maior incerteza relativa; e (iv) para as assinaturas hidrológicas coeficiente de escoamento (r_{qp}), índice de escoamento de base (bfi_1 e bfi_2), inclinação da curva

de permanência (s_{fdc}), elasticidade vazão-precipitação (e_{qp}) e índice de resposta da bacia (flash), a incerteza foi proporcional ao erro de medição.

O conhecimento sobre a incerteza associada aos valores das assinaturas pode ser utilizado para evitar que modelos hidrológicos sejam indevidamente considerados inadequados em representar os processos hidrológicos dominantes e possibilita a determinação de valores de assinaturas significativamente diferentes entre as bacias hidrográficas.

AGRADECIMENTOS – A primeira autora agradece à CAPES pela bolsa do Programa de Doutorado Pleno no Exterior, processo nº 88881.174456/2018-01.

REFERÊNCIAS

- Addor, N., Newman, A. J., Mizukami, N., Clark, M. P. (2017). *The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 5293-5313, <https://doi.org/10.5194/hess-21-5293-2017>
- Baker, D. B., Richards, R. P., Loftus, T. T., Kramer, J. W. (2004). *A new flashiness index: Characteristics and applications to midwestern rivers and streams*. Journal of the American Water Resources Association, 40(2), 503-522, doi: DOI 10.1111/j.1752-1688.2004.tb01046.x.
- Brutsaert, W., Nieber, J. L. (1977). *Regionalized drought flow hydrographs from a mature glaciated plateau*. Water Resour. Res., 13, 637–643, doi:10.1029/WR013i003p00637
- Fenicia, F., Kavetski, D., Reichert, P., Albert, C. (2018). *Signature-domain calibration of hydrological models using approximate Bayesian computation: Empirical analysis of fundamental properties*. Water Resources Research, 54, 3958– 3987. <https://doi.org/10.1002/2017WR021616>
- Newman, A. J., Clark, M. P., Sampson, K., Wood, A., Hay, L. E., Bock, A., Viger, R. J., Blodgett, D., Brekke, L., Arnold, J. R., Hopson, T., Duan, Q. (2015). *Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA: data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 209–223, <https://doi.org/10.5194/hess-19-209-2015>
- Sadegh, M., Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Xu, C. (2016). *The soil water characteristic as new class of closed-form parametric expressions for the flow duration curve*. Journal of Hydrology, 535, 438-456, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.027>
- Vrugt, J. A., Diks, C. G. H., Gupta, H. V., Bouten, W., Verstraten, J. M. (2005). *Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation*. Water Resour. Res., 41, W01017, doi:10.1029/2004WR003059.