

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

QUANTIFICAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO DAS COMPONENTES CLIMÁTICA E ANTRÓPICA NA ALTERAÇÃO DA VAZÃO MÉDIA ANUAL EM BACIAS DO SÃO FRANCISCO

Gabriela da Costa Ribeiro Dorneles¹ ; Saulo Aires de Souza² & Dirceu Silveira Reis Junior³

RESUMO – Compreender o comportamento das vazões de uma bacia hidrográfica, quando sujeita à variabilidade climática e a alterações de uso e cobertura do solo de origem antrópica, é essencial para elaborar e avaliar alternativas de adaptação. Este artigo procura separar e quantificar as contribuições de origem climática e de origem antrópica nas mudanças observadas nas vazões médias anuais de longo período em estações da Bacia do São Francisco. Numa primeira etapa, as séries anuais de vazão são analisadas para identificar a presença de mudança abrupta de comportamento e estimativa do ano mais provável de mudança, caso a mesma tenha sido identificada. Numa segunda etapa, aplicando o método da decomposição, baseado nas hipóteses de Budyko, determina-se o quanto da mudança observada na vazão média de longo período é oriunda da componente climática do problema, e quanto advém de mudanças na superfície da bacia, resultado de atividades antrópicas. O artigo apresenta resultados preliminares de cinco bacias hidrográficas para ilustrar a metodologia empregada, assim como uma análise crítica dos mesmos tendo como base as séries anuais de uso consuntivo e não consuntivo em cada uma das bacias avaliadas.

ABSTRACT– Understanding the behavior of streamflows in basins subject to climate variability and changes in land use and land cover due to human activities is key to design and evaluate adaptation strategies. The goal of this paper is to quantify changes in long term mean annual streamflow in gauges in the Sao Francisco river basin and estimate how much of the observed change is due to climate and how much is due to human activities. As a first step, the Pettit test was used to detect changes in 122 flow gauges and identify the most probable year of change. Then, the decomposition method, based on the Budyko's hypotheses, was used to estimate changes due to climate and changes due to changes in the basin due to human activities. The paper presents preliminary results of five different gauges to illustrate the methodology. A brief discussion of the results is given based on series of water consumption in each of these basins.

Palavras-Chave – Mudanças, Hipóteses de Budyko, Vazões.

1) Aluna de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB). Dorneles. Email: gabriela@gmail.com.

2) Aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB) e Especialista em Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas. E-mail: saulo.souza@ana.gov.br.

3) Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTARH/UnB). E-mail: Dirceu.reis@gmail.com

INTRODUÇÃO

As vazões observadas na seção transversal de um rio são o resultado integrador de uma série de fenômenos que ocorrem na bacia hidrográfica. Diversas atividades antrópicas realizadas na bacia afetam o comportamento das vazões. Alterações no uso e cobertura do solo devido à expansão da área urbana ou causadas, por exemplo, pelo desmatamento para o desenvolvimento agropecuário podem alterar o balanço energético na superfície, os fluxos de massa e energia entre o solo e a atmosfera, assim como as taxas de geração de escoamento superficial e de infiltração. A construção de reservatórios para abastecimento, geração de energia ou proteção contra inundações pode alterar fortemente o comportamento das vazões máximas e mínimas no exutório da bacia, assim como as retificações de cursos d'água e construção de diques. O incremento da taxa de extração de água superficial e subterrânea para fins agrícolas e industriais pode afetar sobremaneira o comportamento das vazões e de seus extremos.

Alterações no comportamento das vazões podem estar ligadas também à variabilidade e possíveis mudanças do clima na região. O aumento crescente da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera pode afetar a intensidade do ciclo hidrológico com possíveis repercussões na frequência e intensidade da ocorrência de secas e cheias (IPCC, 2013). Além disso, mecanismos atmosféricos e oceânicos de larga escala, tais como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO), Índice de Oscilação Decenal do Pacífico (PDO) e Oscilação Multidecenal do Atlântico (AMO), afetam o padrão de distribuição de chuva em várias regiões do mundo, modulando o comportamento dos extremos de vazão numa escala de mais longo prazo (Franks, 2014).

Compreender o comportamento das vazões frente aos vários tipos de mudanças possíveis na bacia hidrográfica, seja de caráter climático, seja oriundo de intervenções antrópicas na bacia, é uma questão científica importante, atual e difícil de ser tratada. A questão possui também forte relevância prática, pois está diretamente relacionada com os desafios enfrentados hoje por diversas instituições responsáveis pelo planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil e no mundo. Esse entendimento sobre o comportamento das vazões é essencial para que seja possível elaborar e avaliar diferentes alternativas de ação na bacia hidrográfica.

A relevância de tal questão pode ser aferida pelo fato de ter sido escolhida como tema central pela comunidade científica internacional quando decidiu aprofundar o conhecimento sobre a detecção, atribuição e predição de processos hidrológicos, como descrito no atual programa decenal de pesquisa “Panta-Rhei-Everything Flows (2013-2022)”, uma iniciativa da *International Association of Hydrological Sciences* (IAHS), dedicada exclusivamente às atividades de pesquisa sobre mudanças no comportamento hidrológico e sua relação com mudanças na sociedade (Montanari et al., 2013). A mesma preocupação ficou evidente no relatório publicado pela

Academia Nacional de Ciências, Engenharia e Medicina dos Estados Unidos (NAS, 2018), que trata das prioridades de pesquisa do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) relacionadas à água. Dentre os principais pontos levantadas no relatório, encontram-se as seguintes questões: (a) relação entre as atividades antrópicas e a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos, (b) como as mudanças do clima afetam a quantidade, qualidade e confiabilidade dos recursos hídricos, assim como o comportamento de eventos extremos, e (c) como a gestão do risco de longo prazo de eventos extremos pode ser aprimorada.

Este artigo tem como objetivo identificar as estações fluviométricas localizadas na bacia do Rio São Francisco que apresentam alterações significativas na vazão média de longo período, e estimar quantitativamente o grau de contribuição dessa mudança, quando presente, oriunda da variabilidade ou mudança do clima e aquela advinda de alterações antrópicas na bacia. O artigo continua com uma descrição da metodologia empregada. A discussão dos resultados e as conclusões finais são apresentados na sequência.

METODOLOGIA

Para quantificar a contribuição das componentes climática e antrópica em uma eventual alteração da vazão média anual, é necessário, inicialmente, identificar se a série analisada apresenta uma mudança brusca (ou salto) estatisticamente significativa, e em que momento essa mudança ocorre. Para isso, faz-se uso de testes de hipótese estatísticos aplicados às séries temporais obtidas dos registros históricos de estações fluviométricas. Detectada a mudança, o passo seguinte é a seleção da abordagem a ser utilizada para separar individualmente o impacto climático e antrópico nas vazões.

Teste de Pettitt

Para identificação do ano de mudança nas séries de vazões foi utilizado o teste não-paramétrico de Pettitt (Pettitt, 1979). Esse teste utiliza uma versão da estatística de Mann-Whitney, U_t , para verificar se duas amostras, $\{x_1, \dots, x_t\}$ e $\{x_{t+1}, \dots, x_n\}$, são oriundas da mesma população,

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{j=1}^n \text{sgn}(x_t - x_j) \quad (1)$$

A hipótese nula do teste de Pettitt considera ausência de um ponto de mudança na série. A estatística do teste conta o número de vezes em que o valor da primeira amostra excede o valor da segunda amostra. A estatística $k(t)$ representa o máximo valor de $|U_{t,n}|$ para um dado t , e P é o nível de significância do teste,

$$k(t) = \max_{1 \leq t \leq n} |U_{t,n}| \quad (2)$$

$$P = 2 e^{-\frac{6(k_n)^2}{n^3+n^2}} \quad (3)$$

em que k_n é o valor crítico e n é o número de anos da série histórica.

Método de Decomposição

O método da decomposição vem sendo empregado para separar as contribuições climáticas das contribuições antrópicas em estudos de mudanças de comportamento nas vazões médias em diversos estudos na literatura (Wang & Hejazi, 2011; Patterson *et al.*, 2013; Ning *et al.*, 2018; Dey & Mishra, 2017; Li *et al.*, 2018).

O método se baseia nas hipóteses de Budyko (Budyko, 1974) e faz uso de equações do tipo Budyko, como a equação de Fu, apresentada abaixo, que mostra como a precipitação média de longo período (P) se transforma em escoamento ($Q = P - E$), tendo como informação apenas P e a evapotranspiração potencial (Eo),

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{Eo}{P} - \left[1 + \left(\frac{Eo}{P} \right)^w \right]^{\frac{1}{w}} \quad (4)$$

em que w o único parâmetro da equação, função de características da bacia.

Identificado o ano mais provável de mudança no comportamento da série de vazões médias anuais, por meio do teste de Pettit, divide-se a série em dois períodos, o período base e o período com alteração. Para cada um dos períodos, determina-se os valores de E/P e Eo/P e faz-se o ajuste da eq. (4), encontrando-se um valor de ω para o período base (ω_1) e outro para o período de variação (ω_2). A Figura 1 ilustra a situação, mostrando a situação no período base como o ponto A [$Eo_1, P_1, E_1/P_1$] e a situação no período de alteração representada pelo ponto C [$Eo_2/P_2, E_2/P_2$].

Pode-se mostrar que a mudança na vazão média devido ao clima, dQc , resultado do processo de ir do ponto A para o ponto B na Figura 1, pode ser obtida da seguinte forma,

$$dQc = P_2 \left[1 - f \left(\frac{Eo_2}{P_2}, \omega_1 \right) \right] - P_1 \left[1 - f \left(\frac{Eo_1}{P_1}, \omega_1 \right) \right]$$

Seguindo a mesma lógica, pode-se mostrar que a mudança na vazão média devido a atividades antrópicas na bacia, dQh , resultado do processo de ir do ponto B para o ponto C, pode ser estimada por

$$dQh = P_2 \left[f \left(\frac{Eo_2}{P_2}, \omega_1 \right) - f \left(\frac{Eo_2}{P_2}, \omega_2 \right) \right]$$

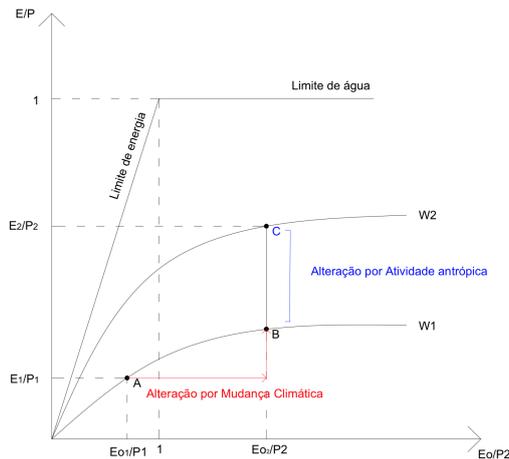


Figura 1 - Método da decomposição para separar as contribuições de mudanças no índice de aridez e parâmetro ω às mudanças na evaporação. (Adaptado de: Jiang et al. 2015)

ÁREA DE ESTUDO

A Região Hidrográfica São Francisco possui aproximadamente 638.466 km² de área, abrangendo sete Unidades da Federação. O Rio São Francisco nasce em Minas Gerais, na Serra da Canastra e chega a sua foz, no Oceano Atlântico, entre Alagoas e Sergipe, percorrendo cerca de 2.800 km de extensão. A região engloba parte da Região do Semiárido, que corresponde, aproximadamente, a 58% do território.

A demanda hídrica total na região é de 278,8 m³/s, representando 9,8% da demanda nacional (ano-base 2010). A região caracteriza-se por um predomínio claro das vazões de retirada para irrigação em relação aos demais usos, representando 77% do total de demandas da Região. A expansão da irrigação na Região (aumento de 26% na área irrigada, quando comparadas as estimativas de 2006 e 2012) levou a fortes impactos sobre os recursos hídricos e disputas entre usuários nos afluentes do Paracatu, na sub-bacia do Alto Preto, do rio Verde-Grande, do Rio Grande e Salitre. A Região do São Francisco também tem importante papel na geração de energia elétrica, cujo potencial hidrelétrico instalado, em 2013, era de 10.708 MW (12% do total instalado no País) (ANA, 2015).

DADOS

Este estudo empregou dados hidrometeorológicos de 122 estações fluviométricas localizadas na bacia do rio São Francisco. As séries de chuva foram estimadas empregando conjuntamente os dados disponibilizados pela Agência Nacional de Água (ANA) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de vazão foram obtidos do banco HIDRO da ANA. Os dados de evapotranspiração potencial foram obtidos do banco de dados CRU (*Climate Research Unit*). Os valores médios na bacia foram estimados pelo método do inverso do quadrado da distância (IQD).

RESULTADOS

O teste de mudanças abruptas Pettitt foi aplicado nas 122 estações selecionadas. A Figura 2 apresenta a distribuição empírica da probabilidade de não-excedência dos *p*-valores obtidos do teste de Pettitt. A linha vertical laranja destaca a região no gráfico com *p*-valor de 5%, utilizado como nível de significância do teste.

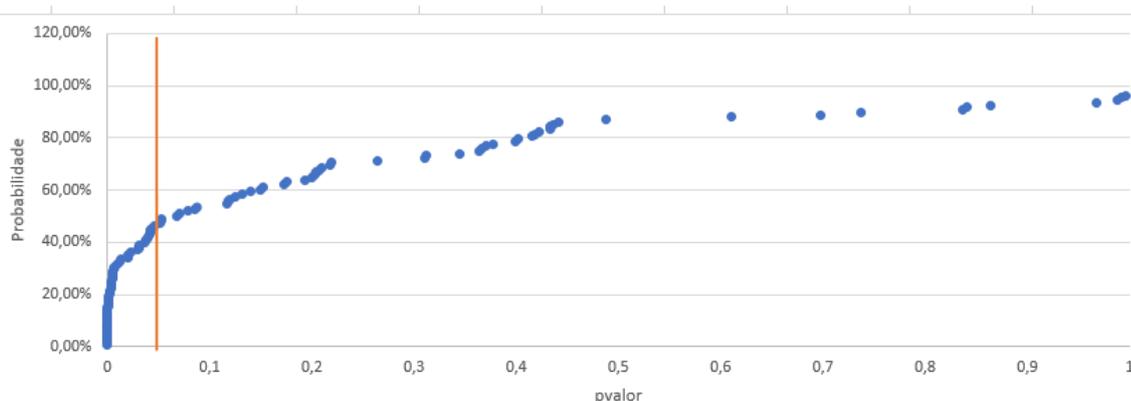


Figura 2 - Distribuição empírica da probabilidade de não-excedência dos *p*-valores obtidos do teste de Pettitt

O teste de Pettitt detectou a presença de mudança abrupta em 57 estações ao nível de significância de 5%, o que representa 47% das estações analisadas. Entretanto, decidiu-se empregar apenas os resultados das 42 estações em que tanto o período base, quanto o período de alteração, tivesse pelo menos 15 anos de dados de forma a ter estimativas mais precisas das variáveis envolvidas. Para cada uma dessas estações, foi determinado o ano mais provável de mudança, e calculados, para os períodos base e de alteração, os valores de *E*, *P* e *E_o*. Com essas informações, e com o ajuste da equação de Fu para ambos os períodos, foi possível determinar as mudanças nas vazões médias de longo período, assim como as componentes antrópicas e climáticas.

A Figura 3 ilustra a relação entre as contribuições antrópica, *dQ_h*, e climática, *dQ_c*, para cada uma das 42 estações onde detectou-se mudança de comportamento das vazões médias anuais. Os valores são apresentados como uma razão entre a mudança e a vazão média do período base, denominada de *Q₁*. Percebe-se uma grande variação de resultados entre as diferentes estações, sendo possível identificar estações com interferências predominantemente climática ou antrópica, e aquelas com maior equilíbrio entre estas componentes. Aproximadamente 86% (14%) das estações apresentaram redução (aumento) da vazão média anual. Das 36 estações com redução na vazão, 28 (78%) registraram *dQ_h* e *dQ_c* negativos, ou seja, nessas estações, tanto o clima quanto as atividades antrópicas contribuíram para a redução observada, como pode ser observado no terceiro quadrante da Figura 2. Das 6 estações com aumento de vazão, apenas 1 (17%) teve *dQ_h* e *dQ_c* positivos.

Apenas para fins ilustrativos, foram selecionadas cinco estações (48590000, 46998000, 40269900 e 46675000), que representam uma faixa considerável de variação de contribuições antrópicas e climáticas. A tabela 1 apresenta os resultados para essas estações, incluindo o número de anos do período base, o comprimento total da série histórica, o ano mais provável de alteração, as contribuições relativas oriundas do clima e de alteração antrópica na bacia, e os valores de ω para os períodos de base e de mudança. Vale destacar que, quanto maior a diferença entre os valores de ω do período base em relação ao período de mudança, maior é a alteração da bacia e consequentemente a contribuição antrópica na alteração da vazão média.

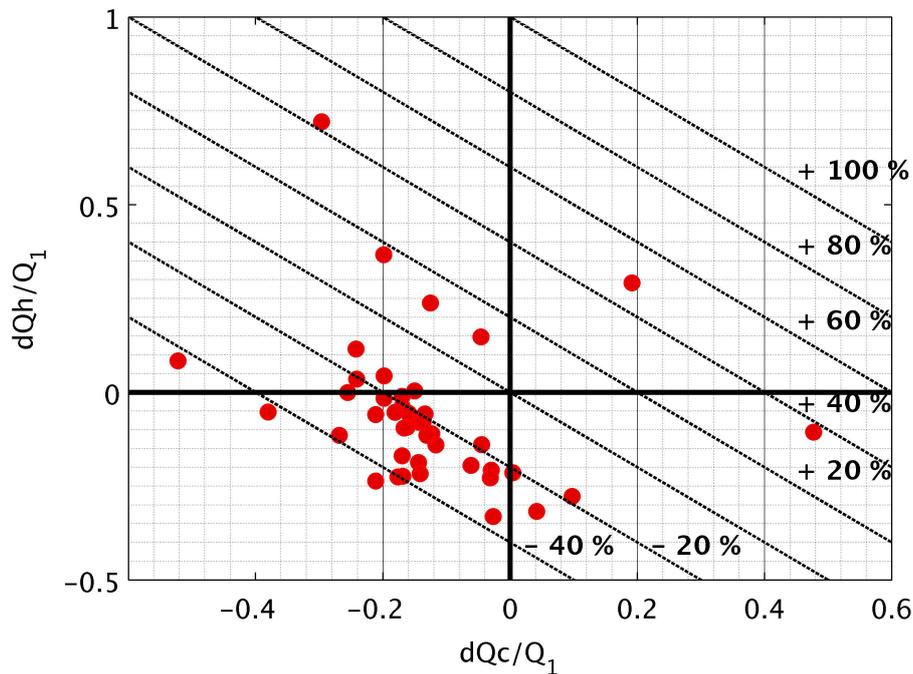


Figura 3 - Contribuição antrópica (dQh) e climática (dQc) medidas em relação à vazão média do período de base (Q_1).

Tabela 1 – Sumário dos resultados das contribuições antrópica e climática

Estação	Anos (base)	Anos (total)	Ano do salto	(dQc/dQ) (%)	(dQh/dQ) (%)	w base	w alteração
48590000	17	32	1994	50	50	3,16	3,52
46998000	58	80	1986	100	0	3,41	3,41
40269900	29	37	2007	-16	116	4,64	1,78
46675000	13	45	1977	-221	321	5,22	4,35

Pode-se observar que a estação 48590000, que registrou aumento da vazão média anual, possui contribuições climática e antrópica similares. A estação 46998000, que também observou

aumento de vazão, registrou valores similares de ω nos dois períodos, sugerindo pouca mudança na superfície da bacia, concluindo-se que a mudança observada é proveniente apenas de contribuição climática. É importante notar que as estações 40269900 e 46675000 possuem contribuição climática negativa e contribuição antrópica positiva, de forma que se não fosse pelas modificações realizadas na bacia, teríamos observado uma redução nas vazões médias de longo período nas duas bacias, ao invés do aumento que foi observado.

Observando a Tabela 2, que apresenta a informação de demanda consuntiva (ANA, 2019), percebe-se que as estações com maior interferência antrópica possuem uma variação percentual considerável da demanda entre os períodos de base e alteração. Para a estação majoritariamente alterada pela componente climática, apesar de possuir uma variação considerável da demanda, é possível perceber que a ordem de grandeza da demanda com relação a vazão média é mínima e por isso acaba não afetando a vazão de forma significativa.

Tabela 2 – Comparação entre as vazões observada e demanda de uso consuntivo entre o período base e de mudança

	Qbase (m ³ /s)	Qalteração (m ³ /s)	difqmed (%)	Demanda_base (m ³ /s)	Demanda_alteração (m ³ /s)	dDemanda (%)
40269900	4.35	6.19	42.2%	0.05	0.10	103.0%
48590000	2812.40	1771.92	-37.0%	18.46	114.52	520.2%
46675000	174.29	187.54	7.6%	0.11	9.90	8725.2%
46998000	2817.52	2073.30	-26.4%	10.22	68.87	573.8%

A estação 48590000, que possui uma distribuição equivalente com relação a origem da alteração das vazões, apesar de possuir também uma variação percentual grande da demanda não possui uma ordem de grandeza muito grande de retirada quando compara a vazão média local. O que, em razão disto, não levaria necessariamente a um alto percentual de contribuição climática.

CONCLUSÕES

O estudo teve como objetivo quantificar a origem das alterações em vazões médias de longo período na bacia do São Francisco. Para isso, foram identificadas aquelas estações em que havia uma alteração nas vazões médias de longo período, utilizando o teste de Pettitt. Posterior à análise de tendência, foi utilizada o método da decomposição, baseado nas hipóteses de Budyko, para quantificar a variação da vazão média de longo período do período anterior e posterior ao salto de tendência detectado, identificando também as componentes antrópicas e climáticas dentro desta mudança. Como forma de validar estes resultados, foi feita uma análise conjunta dos mesmos com informações de demanda para o mesmo período e local.

Foram obtidos resultados bem heterogêneos da origem das contribuições dentro da bacia. Isto se dá em razão de ser uma bacia grande e heterogênea dentro dos seus usos e ocupação. É possível

perceber a partir das informações de demanda a forma com que se dão as contribuições antrópicas e climáticas dentro de cada uma das cinco estações estudadas.

Com recomendação futura, seria interessante a partir desses resultados utilizar a informação de demanda de outras origens, e também informações de influência de reservatórios, que é importante em diversas partes nesta região, para dar continuidade aos entendimentos dessas contribuições na totalidade das estações mencionadas.

AGRADECIMENTOS O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (CHAMADA UNIVERSAL MCTI/CNPq Nº 01/2016), e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAP/DF) por meio do Edital 04/2017 de Demanda Espontânea.

REFERÊNCIAS

ANA (2015). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial. Brasília: ANA, 163 p.

ANA (2019). Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil / Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA. 75 p. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/ana_manual_de_usos_consuntivos_da_agua_no_brasil.pdf.

DEY, P.; MISHRA, A. (2017). Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: A review of methodologies and critical assumptions. *Journal of Hydrology* 548 278–290.

DUAN, Q., (2017). Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities. *Science of the Total Environment*, (February). Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.010>.

GAO, G. ET AL., (2016). Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. *Science of the Total Environment*, 557–558, pp.331–342. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.019>.

JIANG, C. et al., (2015). Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 522, pp.326–338. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.060>.

LI, C. ET AL., (2018). An analytical approach to separate climate and human contributions to basin streamflow variability. *Journal of Hydrology*, 559, pp.30–42. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.019>.

LI, Z. et al., (2017). Spatiotemporal variation in the attribution of streamflow changes in a catchment on China's Loess Plateau. *Catena*, 158(December 2016), pp.1–8. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.008>.

NING, T. ET AL., (2018). Comparison of the effectiveness of four Budyko-based methods in attributing long-term changes in actual evapotranspiration. *Scientific Reports*, 8(1), pp.1–10.

PATTERSON, L.A., LUTZ, B. & DOYLE, M.W., (2013). Climate and direct human contributions to changes in mean annual streamflow in the South Atlantic, USA. *Water Resources Research*, 49(11), pp.7278–7291.

PETTITT, A. (1979). A nonparametric approach to the change-point problem. *Appl. Stat.* 28, 126–135.

RODERICK, M.L. & FARQUHAR, G.D., (2011). A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties. *Water Resources Research*, 47(12). Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2010WR009826>.

WANG, D. & HEJAZI, M., (2011). Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States. *Water Resources Research*, 47(9).

WU, J. ET AL., (2017). Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities. *Science of the Total Environment*, 586, pp.328–337. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.010>.

ZHENG, Y. ET AL., (2018). Effect partition of climate and catchment changes on runoff variation at the headwater region of the Yellow River based on the Budyko complementary relationship. *Science of the Total Environment*, 643, pp.1166–1177. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.195>.

ZHOU, G. ET AL., (2015). Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 6, pp.1–9. Available at: <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms6918>.