

NÃO-ESTACIONARIEDADE É INEVITÁVEL! CAUSAS DAS RECENTES MUDANÇAS DE VAZÃO NO BRASIL

Vinícius B. P. Chagas¹ & Pedro L. B. Chaffe²

RESUMO – Mudanças nas séries de vazão são frequentes e interferem na segurança hídrica do Brasil. Porém, não-estacionariedades nos tributários das maiores bacias do país foram pouco exploradas e suas causas são incertas. Este trabalho buscou: (i) avaliar tendências de vazão no Brasil, de 1980 a 2015; (ii) investigar as causas das tendências na vazão média, máxima, e mínima anual no Brasil. Foram analisadas tendências em 779 estações fluviométricas com a declividade de Theil-Sen. As causas das mudanças na vazão foram investigadas com regressão multivariada e classificação de bacias. Os resultados mostram que 80,5% das bacias tiveram tendências significativas na vazão média, máxima, ou mínima anual. Reduções na vazão predominaram no Cerrado e Semiárido. Houve aumentos da vazão no norte e oeste da Amazônia. Mudanças na vazão média no Brasil foram causadas por, em grau de importância: mudanças na chuva, demandas hídricas, e mudanças na evapotranspiração. Tendências na vazão máxima foram associadas a chuva e evapotranspiração mensal. Mudanças na vazão mínima foram direcionadas por duas variáveis com pesos semelhantes: balanço de chuva e evapotranspiração anual, e demanda hídrica. Construções de reservatórios e desflorestamentos pouco mudaram a vazão. Mudanças na vazão são generalizadas, devendo ser consideradas na análise da segurança hídrica do Brasil.

ABSTRACT– Changes in river flow series are common and interfere with Brazil’s water security. However, nonstationarities of the tributaries of the largest basins in the country were little explored. Its causes are still uncertain. This work aimed to: (i) evaluate streamflow trends in Brazil, from 1980 to 2015; (ii) investigate the drivers of changes in average, maximum, and minimum flows in Brazil. Trends in 779 flow gauges were analyzed with the Theil-Sen slope. The trend attribution analyses were made with multiple regression and catchment classification. Results show that trends in average, maximum, or minimum flow were significant for 80.5% of river basins. The Cerrado and the Semiárido regions had streamflow reductions. The northern and western parts of the Amazon had increased streamflow. Changes in average flows in Brazil were driven by, in descending order of importance: changes in rainfall, water extractions, and evapotranspiration. Trends in maximum flows were driven by monthly rainfall and evapotranspiration. Changes in minimum flows were driven by two variables with similar weights: annual rainfall and evapotranspiration, and water extractions. Reservoir constructions and deforestations had little impact on changes in streamflows. Changes in streamflow are ubiquitous and should be taken into consideration in the water security of Brazil.

Palavras-Chave – Vazão. Tendências. Brasil.

1. INTRODUÇÃO

A vazão de um rio é a base da integridade ecológica da bacia hidrográfica e é a referência para o gerenciamento dos diversos usos socioeconômicos dos recursos hídricos. No último século, houve significativas mudanças na vazão dos rios em várias regiões do mundo (PIAO et al., 2007). No Brasil, os rios Paraná, Paraguai, e Uruguai, que formam a bacia da Prata, tiveram um dos maiores aumentos do mundo na vazão média no último século (PIAO et al., 2007). Houve um aumento substancial da

1) Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. E-mail: vbchagas@gmail.com.
2) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina.

vazão do rio Solimões e redução nos tributários sul da bacia do Amazonas (VILLAR et al., 2009). Porém, estudos que analisaram mudanças de vazão no Brasil não investigaram os extensos bancos de dados dos tributários das maiores bacias. Isso pode estar deixando de revelar diversas não-estacionariedades, pois as menores bacias podem ter as maiores mudanças em diversas características da série de vazão (CHAGAS; CHAFFE, 2018).

Causas das mudanças de vazão podem ser climáticas, como mudanças na precipitação ou evapotranspiração; ou não climáticas, como mudanças na cobertura da terra ou regulação direta do ciclo hidrológico (KUNDZEWICZ; GERTEN, 2015). Mudanças de vazão no Brasil foram geralmente associadas a intensas mudanças na cobertura da terra (e.g., COSTA et al., 2003) ou à variabilidade climática (e.g., COLLISCHONN et al., 2001). Entretanto, não há estudos que tenham investigado causas das mudanças de vazão em todo o Brasil, que tenham considerado os tributários das maiores bacias, e que tenham considerado um conjunto de características da série de vazão. Além disso, a maior parte dos trabalhos não consideraram múltiplas causas de fatores climáticos e não climáticos, podendo deixar de analisar as mudanças na vazão causadas por uma soma de fatores.

Neste trabalho, são analisadas mudanças na vazão de 779 bacias no Brasil, do período de 1980 a 2015. Os objetivos são: (i) avaliar tendências na vazão média, máxima, e mínima anual no Brasil; (ii) investigar as causas das tendências na vazão média, máxima, e mínima anual no Brasil. A maior parte das bacias são analisadas em escala regional pela primeira vez. São investigadas as hipóteses de que cinco variáveis possam ter levado às mudanças na vazão: chuva, evapotranspiração, mudanças na cobertura de florestas, hidrelétricas, e demandas hídricas das bacias hidrográficas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Seleção e controle de qualidade dos dados de vazão

São analisadas as bacias hidrográficas dos rios com exutório dentro do país. A Agência Nacional de Águas (ANA) possui dados diários de mais de 8 mil estações fluviométricas (ANA, 2018). Destas, apenas 779 estações de medição foram usadas para identificar tendências de vazão, de 1980 a 2015. Os critérios de seleção das estações foram: (i) apenas estações com pelo menos 25 anos de dados completos, i.e., sem ausência de dados; e (ii) apenas estações aprovadas no controle de qualidade dos dados. O controle de qualidade dos dados teve base na visualização das curvas de permanência anuais e da série temporal de vazão e de chuva de cada bacia. Isto permite identificar erros nas séries de dados, como valores repetidos em sequência, valores com ordens de grandeza incompatíveis, zero no lugar de ausência de dados, e incoerência entre os dados de chuva e vazão.

2.2 Cálculo das tendências

Cada uma das 779 bacias teve tendências lineares calculadas para três índices de vazão: vazão média anual, diária máxima anual, e mínima anual de uma média móvel de 7 dias. Para aumentar a

independência da série anual dos índices, os dois primeiros foram calculados com o ano hidrológico iniciando no mês seguinte ao mais seco do ano, i.e., de Setembro-Agosto. A vazão mínima anual foi calculada com o ano iniciando após o mês mais úmido do ano, i.e., de Março-Fevereiro.

Tendências lineares foram calculadas com a declividade de Theil-Sen (THEIL, 1950; SEN, 1968). A regressão de Theil-Sen não assume distribuição normal dos resíduos e tem baixa influência de outliers. Como assume que a série temporal é independente, antes de calcular as tendências foi verificada a autocorrelação de todas as séries anuais. Quando significativa, a autocorrelação da série foi removida com o *trend-free pre-whitening* (YUE et al., 2002), tornando-as independentes. A significância estatística das tendências foi estimada com *bootstrap* usando 2 mil reamostragens, que é o valor recomendado para obter um intervalo de confiança de 95%.

2.3 Análise de causas

Após a análise das tendências de vazão no Brasil, foi buscado quais fatores podem ter causado estas mudanças. A análise de causas buscou relações entre tendências de vazão (i.e., variável dependente) e potenciais forçantes hidrológicas (i.e., variáveis independentes) (Tabela 1). Três variáveis não climáticas foram analisadas como causas das mudanças de vazão. Primeiro, mudança na cobertura de florestas naturais da bacia. Foi computada com a diferença de dois mapeamentos do MapBiomas (2018), um referente a 1985 e outro a 2015, ambas geradas partir de classificações de imagens *Landsat* com resolução horizontal de 30 metros. Segundo, construção de Usinas Hidrelétricas de Energia entre 1980 e 2015, para cada bacia hidrográfica, com dados da ANEEL (2018). Terceiro, demanda hídrica de cada bacia do ano de 2014, conforme informações de captação e usos consuntivos de água estimadas pela ANA (2016).

As variáveis climáticas da análise de causas são mudanças na chuva e na evapotranspiração. Os dados diários de chuva foram de Xavier et al. (2015) e de evapotranspiração são do modelo GLEAM (MIRALLES et al., 2011; MARTENS et al., 2017), ambos de 1980 a 2015 e com 0,25° de resolução.

Tabela 1 - Variáveis da análise de causas das tendências de vazão. Δ é tendência ou mudança; Q é vazão; P é chuva; ET é evapotranspiração; FN é florestas naturais; e UHE é Usinas Hidrelétricas de Energia.

Variáveis dependentes	Variáveis independentes				
	Fatores climáticos		Fatores não climáticos		
Δ na Q média	Δ na P média	Δ na ET média	Δ na cobertura de FN	Construção de UHE	Demanda hídrica
Δ na Q máxima	Δ no balanço P menos ET 7 dias antes da Q máxima	Δ no balanço P menos ET 30 dias antes da Q máxima	Δ na cobertura de FN	Construção de UHE	Demanda hídrica
Δ na Q mínima	Δ no balanço P menos ET 90 dias antes da Q mínima	Δ no balanço P menos ET 365 dias antes da Q mínima	Δ na cobertura de FN	Construção de UHE	Demanda hídrica

Tendências da vazão média anual de cada bacia foram relacionadas com tendências da chuva média anual e da evapotranspiração média anual de cada bacia, calculadas com a declividade de Theil-Sen. Por outro lado, como as tendências das vazões máximas e mínimas são analisadas na escala de evento, estas foram relacionadas com variáveis climáticas também na escala de evento. As tendências na vazão máxima de cada bacia foram relacionadas com tendências no balanço climático (i.e., chuva menos evapotranspiração cumulativa da bacia) em duas escalas de tempo: (i) 7 dias antes da vazão máxima, representando a chuva diretamente relacionada ao evento da vazão máxima (e.g., BLÖSCHL et al., 2017); e (ii) 30 dias antes da vazão máxima, representando a umidade do solo antecedente ao evento da vazão máxima (e.g., BLÖSCHL et al., 2017).

Vazões mínimas resultam de eventos mais longos que vazões máximas. Tendências na vazão mínima foram relacionadas com tendências no balanço climático de: (i) 90 dias antes da vazão mínima, buscando representar mínimas causadas por pouca chuva na própria estação do ano; e (ii) 365 dias antes da mínima, buscando representar mínimas causadas por pouca chuva também na estação úmida anterior, frequente causa em bacias com alta sazonalidade (VAN LOON, 2015).

A análise de causas foi feita com dois procedimentos: regressões multivariadas e classificações de bacias. A classificação de bacias analisou os casos excepcionais, i.e., as bacias com tendências que não seguiram o padrão médio, e será explicada em maiores detalhes nos resultados. A regressão multivariada buscou analisar a condição geral das bacias, i.e., o comportamento médio das tendências de vazão. Foram feitas três regressões, uma para cada linha da Tabela 1. As amostras da regressão foram as tendências de cada bacia hidrográfica. Assim, foi feita a substituição do tempo pelo espaço para buscar explicações das tendências de vazão.

Na regressão, todas variáveis foram aproximadas da distribuição normal. Para isso, foram removidos outliers, e duas variáveis foram transformadas com Box-Cox: (i) demanda hídrica da bacia (DMD), com $DMD' = \ln(DMD)$; e (ii) mudança na cobertura de florestas naturais da bacia (ΔFN), com $\Delta FN' = (\Delta FN + \min(\Delta FN))^2$. Para haver comparação direta entre os coeficientes da regressão, todas variáveis foram padronizadas com a subtração da média e divisão pelo desvio padrão. Os efeitos da multicolinearidade da regressão foram estimados com o fator de inflação da variância (VIF), onde valores abaixo de 3 indicam multicolinearidades pouco problemáticas (HAIR et al., 2014).

As 779 bacias usadas para analisar tendências não estão igualmente distribuídas pelo Brasil. Por isso, o número de bacias usadas na análise de causas foi reduzido, para que nenhuma região do país tenha maior influência. Foram desconsideradas bacias com estações de medição no mesmo canal e com grande proximidade, bacias menores que 500 km², ou bacias que não estão inteiramente inseridas no Brasil, pois parte dos dados utilizados só estão disponíveis no país. Para isto, todas as bacias foram delimitadas a partir de dados altimétricos do SRTM (USGS, 2006), de resolução horizontal de 90 metros. Assim, a análise de causas foi realizada com apenas 354 bacias hidrográficas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Tendências de vazão

As tendências na vazão média (ΔQ_{med}), diária máxima anual (ΔQ_{max}), e mínima anual de uma média móvel de 7 dias (ΔQ_{min}) das 779 bacias analisadas estão espacializadas na Figura 1. Cada tendência foi dividida pela mediana da sua respectiva série temporal, a fim de observá-las em porcentagem por ano. A maior parte do Brasil teve reduções na vazão. É notada predominância de significativa redução da vazão média, máxima, e mínima no Cerrado e no Semiárido (Figura 1), justamente onde a vazão média anual é a mais baixa do país. Por outro lado, as vazões médias e máximas aumentaram na parte norte e oeste da Amazônia. O Sul do Brasil foi a região com menos mudanças significativas, predominando apenas aumentos na vazão mínima.

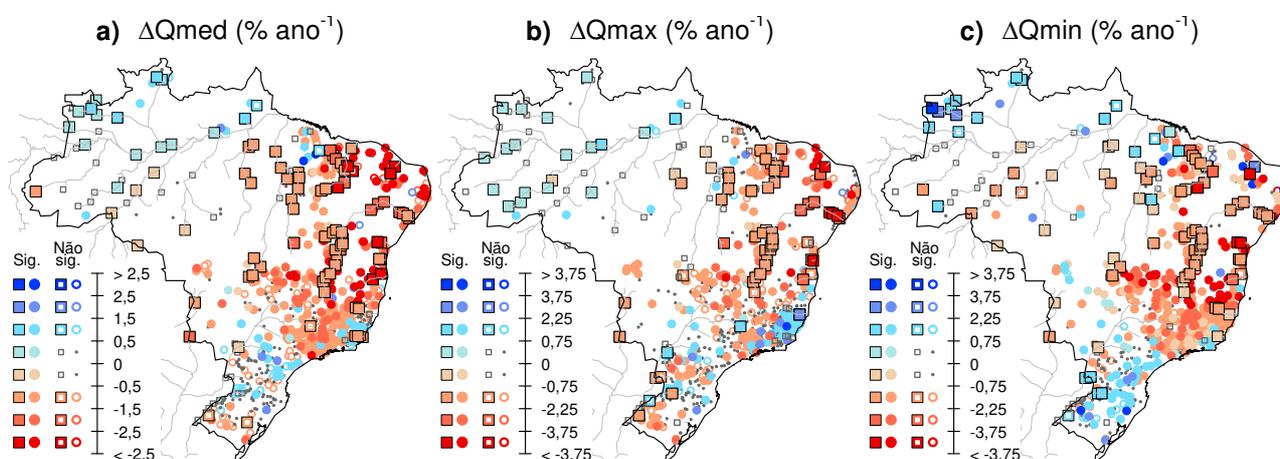


Figura 1 – Tendências de 1980 a 2015 da (a) vazão média anual, (b) vazão diária máxima anual, e (c) vazão mínima anual de 7 dias. Os quadrados e círculos indicam bacias maiores e menores que 30 mil km², respectivamente. Símbolos preenchidos são tendências de Theil-Sen significativas para o nível de 5%.

Dentre os três índices de vazão, mudanças na vazão mínima foram as mais frequentes e intensas. 48,8% das estações fluviométricas analisadas tiveram redução significativa na vazão mínima anual. Caso estas tendências se mantenham nos próximos anos, a condição hídrica do Brasil poderá entrar em nível alarmante. As mudanças mais críticas foram nas regiões hidrográficas do Atlântico Norte, bacia do Paraná, do São Francisco, e do Tocantins, onde houve reduções nas vazões médias e mínimas em mais de 75% das estações analisadas.

Encontrou-se tendência significativa em pelo menos um dos três índices de vazão em 80,5% das 779 bacias analisadas. Portanto, as não-estacionariedades das séries de vazão foram quatro vezes mais comuns que as estacionariedades. Isto sugere que o gerenciamento da segurança hídrica do Brasil deve sempre ser feito com o apoio de informações sobre mudanças de vazão. Além disto, a frequente não-estacionariedade reforça o conceito de bacias hidrográficas como entidades em permanente mudança (TROCH et al., 2015).

3.2 Análise de causas da condição geral

Analisou-se fatores não climáticos (Figura 2) e climáticos (Figura 3) que podem ter causado mudanças na vazão. Dentre os fatores não climáticos, as demandas hídricas de 2014 (DMD) foram maiores no média e alto Paraná, na bacia do São Francisco, e particularmente no Nordeste do país (Figura 2a), onde foi frequentemente acima de 60% da vazão média anual. Os desflorestamentos entre 1985 e 2015 (ΔFN) foram maiores na fronteira do Cerrado com a Amazônia (Figura 2b). A construção de UHE entre 1980 e 2015 (ΔUHE) ocorreu em 8% das 354 bacias analisadas, sendo principalmente nas bacias acima de 30 mil km² no Sul e Sudeste do Brasil (Figura 2c).

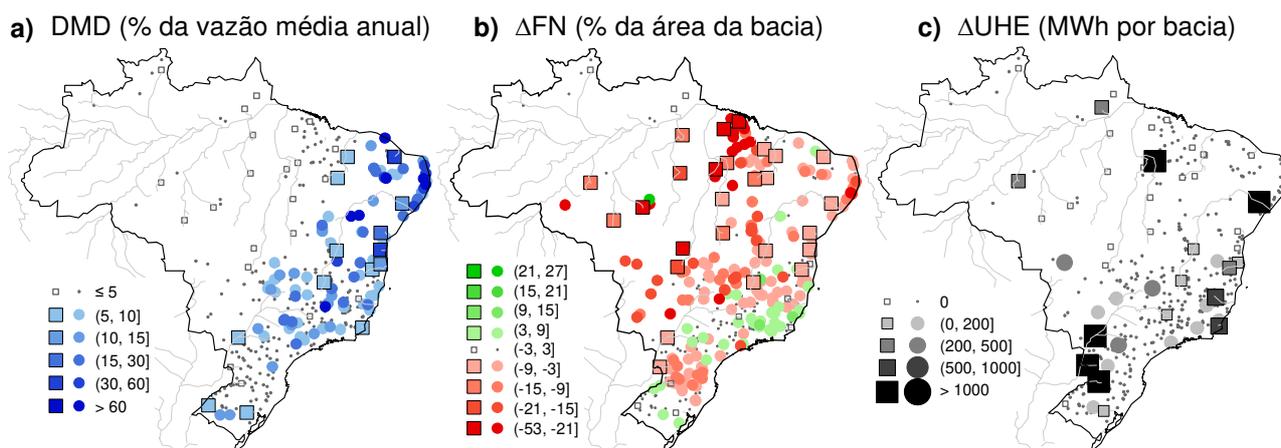


Figura 2 – Variáveis não climáticas da análise de causas. (a) Demanda hídrica da bacia no ano de 2014. (b) Mudança na cobertura florestal por bacia de 1985 a 2015. (c) Geração total por bacia das Usinas Hidrelétricas de Energia construídas entre 1980 e 2015. Os quadrados e círculos indicam bacias maiores e menores que 30 mil km², respectivamente.

Dentre os fatores climáticos da análise de causas, as tendências da chuva média anual das bacias (ΔP_{med}) foram principalmente de redução no Cerrado e no Sudeste do Brasil (Figura 3a). Tendências na evapotranspiração média anual das bacias (ΔET_{med}) foram de menores magnitudes que na ΔP_{med} , sendo de aumento na bacia do São Francisco e no Sul do Brasil (Figura 3b). O balanço climático de 7 dias (ΔPET_{7d}) e de 30 dias (ΔPET_{30d}) antes das vazões máximas tiveram distribuição espacial muito semelhantes entre si (Figura 3c-d) e com a ΔQ_{max} . As tendências na escala de 7 dias foram maiores que na escala de 30 dias. Com relação às tendências no balanço climático de 90 (ΔPET_{90d}) e 365 dias (ΔPET_{365d}) antes da vazão mínima (Figura 3e-f), percebe-se que também houve predominância de reduções. Entretanto, com inspeção visual, as tendências no balanço climático não foram tão intensas quanto as reduções da ΔQ_{min} no Cerrado e Semiárido.

Os resultados das três regressões entre as tendências de vazão e suas possíveis causas estão na Tabela 2. A variável ΔUHE não foi incluída na regressão pois não cumpre suas premissas, sendo incluída apenas na classificação de bacias. Os coeficientes da regressão de ΔQ_{med} sugerem que as causas das mudanças na vazão média foram, em grau de importância: (i) mudanças na chuva média, (ii) demanda hídrica, e (iii) mudanças na evapotranspiração média. Apesar da demanda hídrica

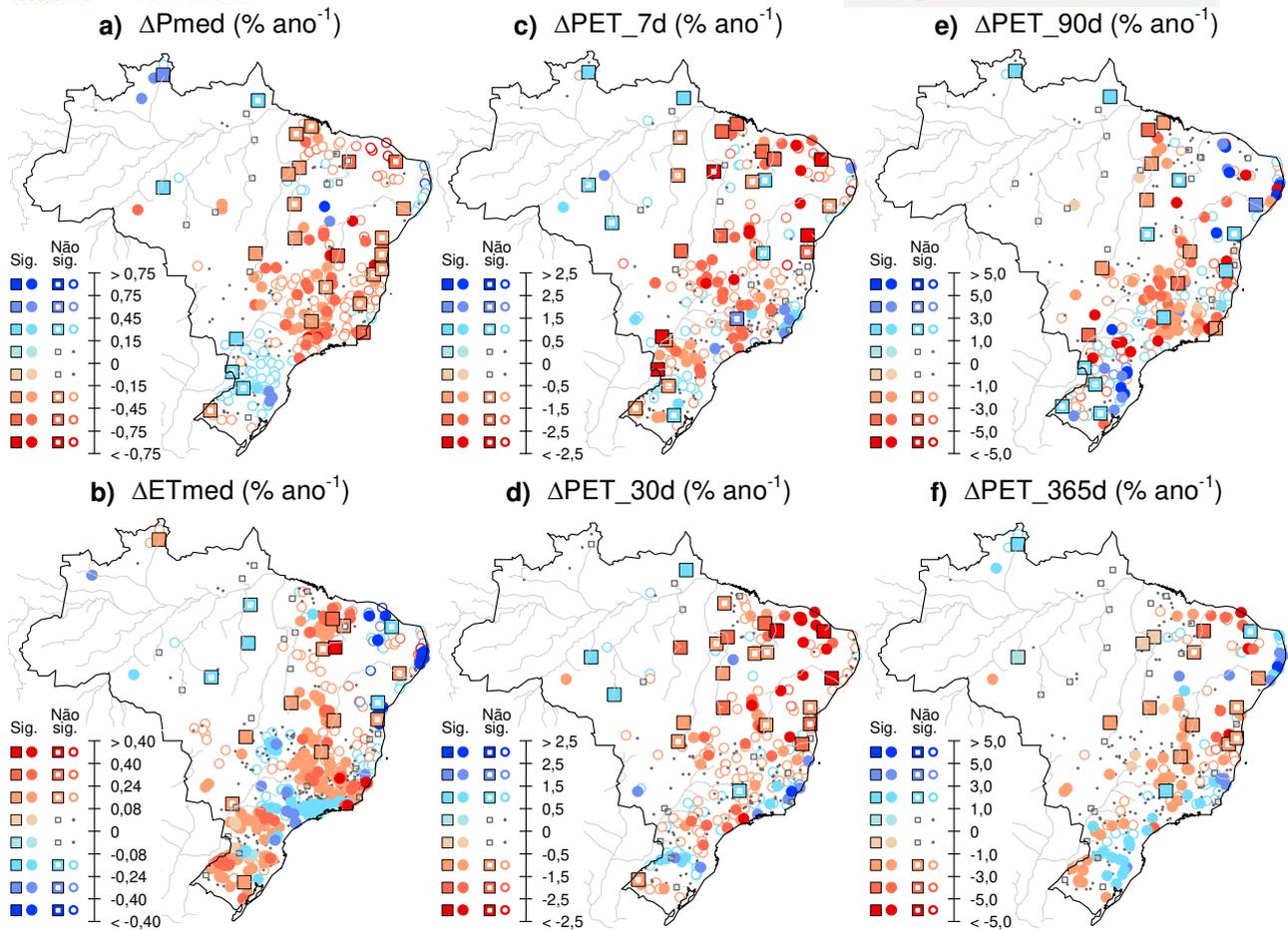


Figura 3 – Variáveis climáticas da análise de causas. Tendências de cada bacia, entre 1980 e 2015, para: (a) chuva média anual; (b) evapotranspiração média anual; chuva menos evapotranspiração (c) 7 dias e (d) 30 dias antes das vazões máximas; (e) 90 dias e (f) 365 dias antes das vazões mínimas. A descrição dos símbolos é igual da Figura 1.

Tabela 2 – Resultados das regressões da ΔQ_{med} , ΔQ_{max} , e ΔQ_{min} . VIF significa fator de inflação da variância. O coeficiente de determinação ajustado (R_a^2) foi de 0,43 para a regressão da ΔQ_{med} , 0,41 para ΔQ_{max} , e 0,28 para ΔQ_{min} . As três regressões foram significativas ao nível de 0,001.

Variável dependente	Variável independente	Coefficiente	Intervalo de confiança [0,025; 0,975]	P-valor	VIF
ΔQ_{med}	ΔP_{med}	0,422	[0,344; 0,499]	< 0,001	1,17
	ΔET_{med}	-0,168	[-0,242; -0,093]	< 0,001	1,04
	DMD'	-0,242	[-0,319; -0,163]	< 0,001	1,18
	$\Delta FN'$	0,098	[0,025; 0,170]	0,008	1,01
ΔQ_{max}	ΔPET_{7d}	0,193	[0,100; 0,286]	<0,001	1,51
	ΔPET_{30d}	0,345	[0,250; 0,440]	<0,001	1,61
	DMD'	-0,140	[-0,216; -0,066]	<0,001	1,08
	$\Delta FN'$	0,082	[0,008; 0,157]	0,030	1,06
ΔQ_{min}	ΔPET_{90d}	0,100	[0,012; 0,188]	0,025	1,04
	ΔPET_{365d}	0,277	[0,188; 0,366]	<0,001	1,05
	DMD'	-0,317	[-0,401; -0,232]	<0,001	1,01
	$\Delta FN'$	0,096	[0,008; 0,183]	0,008	1,03

ter influência significativa, esta análise sugere que fatores climáticos prevaleceram sobre fatores não climáticos na ΔQ_{med} .

A regressão de ΔQ_{max} indica que as maiores causas das tendências foram os fatores climáticos, particularmente na escala mensal. A influência dos fatores não climáticos na ΔQ_{max} , apesar de terem coeficientes estatisticamente significativos, foram de baixa confiabilidade pois seus intervalos de confiança se aproximam de zero. Para ΔQ_{min} , a regressão teve menor desempenho que as demais, com 28% da variância de seus dados explicado pelas variáveis dependentes. Ainda assim, formam-se evidências que as causas predominantes da ΔQ_{min} foram duas variáveis com o mesmo peso: demanda hídrica e balanço climático na escala anual.

A influência da ΔFN foi fraca nas tendências nos três índices de vazão. Mas isto não significa que esta variável não levou a mudanças hidrológicas. Neste trabalho analisaram-se apenas influências diretas das mudanças de cobertura florestal na vazão. Porém, os efeitos indiretos podem ser maiores que os efeitos diretos, pois o desflorestamento pode alterar a fisiografia da bacia (BRUIJNZEEL, 2004) e aumentar a sensibilidade às mudanças na chuva (CHAGAS; CHAFFE, 2018).

3.3 Análise de causas dos casos excepcionais

As bacias foram classificadas em três grupos (Figura 4a): (i) Excesso hídrico, quando houve aumento significativo na ΔQ_{med} mas não houve aumento significativo na ΔP_{med} , ou quando ΔQ_{med} não teve tendência significativa apesar de redução significativa na ΔP_{med} ; (ii) Normal, quando ambas ΔQ_{med} e ΔP_{med} tiveram aumento significativo, redução significativa, ou tendência não significativa; e (iii) Déficit hídrico, para as demais bacias. Em sobreposição a estes critérios, bacias inseridas na faixa de incerteza (i.e., faixa com um desvio padrão da ΔQ_{med} no entorno da linha central) foram classificadas como Normal. Em seguida, foi visto quais das demais variáveis estão associadas às bacias Excesso (Figura 4b) e Déficit (Figura 4c). O mesmo foi feito para a ΔQ_{max} em comparação com ΔPET_{7d} (não mostrado), e para ΔQ_{min} em comparação com ΔPET_{365d} (não mostrado).

Para as tendências de vazão média, as bacias Déficit foram mais numerosas no Nordeste do país (Figura 4c). A variável que predominou nas bacias Déficit foi a demanda hídrica, com 40% das bacias Déficit com DMD média ou alta, contra 8% das Excesso. A ΔET_{med} teve aumento significativo em 20% das bacias Déficit e das Excesso. Portanto, a classificação de bacias reforça as evidências da regressão, onde a DMD pode ter sido mais influente que a ΔET_{med} nas mudanças da vazão média.

Para tendências de vazão máxima, as bacias Excesso estiveram concentradas na bacia do Paraná (não mostrado). As bacias Excesso foram mais associadas ao desflorestamento (i.e., 26% das bacias) que as bacias Déficit (5% das bacias). Além disto, a bacia do Paraná é a região do país com as menores coberturas florestais desde a década de 1980. Portanto, apesar da classificação de bacias formar evidências da influência do desflorestamento na vazão máxima, estas evidências são fracas pois não estão inteiramente de acordo com a regressão da ΔQ_{max} .

Nas tendências de vazão mínima, houve o dobro de bacias Déficit (i.e., 40) que bacias Excesso

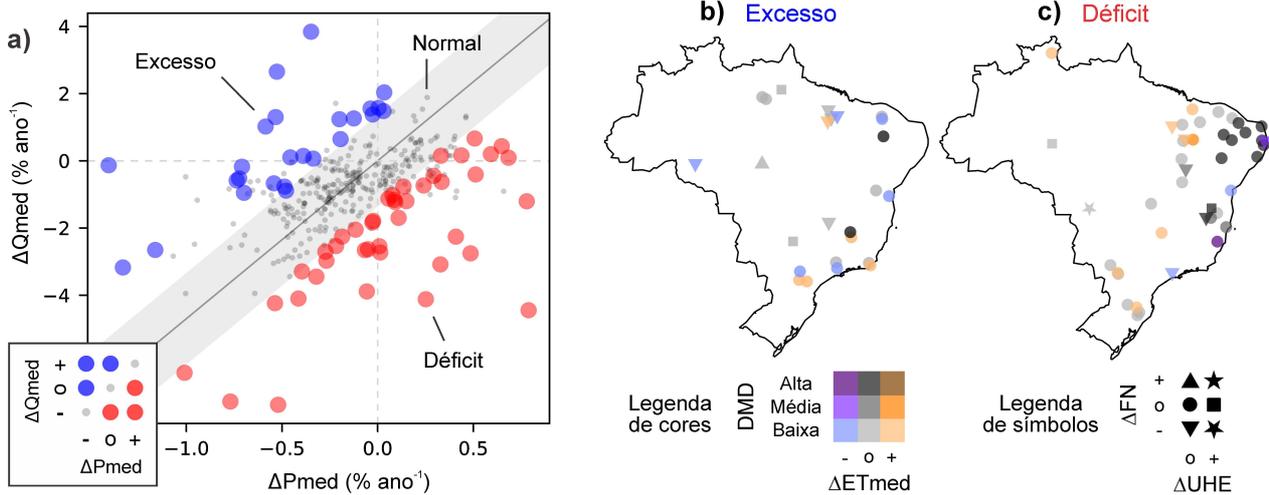


Figura 4 – Classificação das bacias em Excesso, Normal, e Déficit para ΔQ_{med} versus ΔP_{med} . Variáveis associadas às bacias (b) Excesso e (c) Déficit. A escala de cores representa DMD (baixas: <10%, médias: entre 10 e 30%) e ΔET_{med} significativo de aumento (+), redução (-), ou não significativo (o). Os símbolos representam ΔFN (abaixo de -20% (-), entre -20 e 20% (o), e acima de 20% (+)) e ΔUHE (construção (+) ou ausência de novas hidrelétricas (o) na bacia).

(i.e., 20). A maior parte das bacias estão no Cerrado, na bacia do São Francisco, e na região hidrográfica do Atlântico Leste (não mostrado). A demanda hídrica foi a variável mais presente nas bacias Déficit: 45% das bacias possuem DMD médias altas. Para a classe Excesso, foram 25% das bacias. Portanto, somam-se as evidências da influência das variáveis não-climáticas nas vazões mínimas. Dentre todos os índices de vazão analisados, as tendências na vazão mínima foram as mais frequentes, as mais alarmantes e, dentre todas as análises de causas, foram também as de maior influência antrópica. Para todos os três índices de vazão, a construção de hidrelétricas esteve pouco presente nas bacias Excesso e Déficit. Apesar de indicar que as hidrelétricas pouco interferiram nas tendências de vazão, isto pode estar ocorrendo porque a construção de novas hidrelétricas ocorreu apenas em um pequeno conjunto de bacias.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou as causas das tendências de vazão média, máxima, e mínima no Brasil, de 1980 a 2015. Foi encontrado uma redução alarmante na vazão média e mínima no Sudeste do Brasil, no Nordeste, e no Cerrado. Houve aumento da vazão no norte e oeste da Amazônia. As mudanças na vazão mínima foram causadas por, em grau de importância: mudanças na chuva média, demanda hídrica, e mudança na evapotranspiração. Mudanças na vazão máxima foram causadas por mudanças no balanço climático mensal e, com fracas evidências, por desflorestamentos. Tendências nas mínimas foram as mais intensas e as com maior influência antrópica: causadas por, em mesmo peso, demanda hídrica e mudanças no balanço climático na escala anual. Houve tendência significativa em pelo menos um dos três índices de vazão em 80,5% das 779 bacias. Portanto, as mudanças na vazão devem ser levadas em conta em qualquer planejamento de recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS - O primeiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Metadados da Agência Nacional de Águas, Demandas Hídricas Consuntivas. 2016. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>>. Acesso em 15 de novembro de 2018.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. 2018. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em 15 jan. 2018.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Informações Geográficas do Setor Elétrico. 2018. Disponível em: <<http://sigel.aneel.gov.br/>>. Acesso em 15 fev. 2018.
- BLÖSCHL, G.; HALL, J.; PARAJKA, J.; et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, v. 357, n. 6351, p. 588–590, 2017.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, ecosystems & environment*, v. 104, n. 1, p. 185–228, 2004.
- CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B. The Role of Land Cover in the Propagation of Rainfall Into Streamflow Trends. *Water Resources Research*, v. 54, p. 5986–6004, 2018.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: Part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology*, v. 245, n. 1–4, p. 218–238, 2001.
- COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River. *Journal of Hydrology*, v. 283, n. 1–4, p. 206–217, 2003.
- HAIR, J. F. et al. *Multivariate data analysis*. New Jersey, 2014.
- KUNDZEWICZ, Z. W.; GERTEN, D. Grand Challenges Related to the Assessment of Climate Change Impacts on Freshwater Resources. *Journal of Hydrologic Engineering*, n. 10, p. 1–10, 2015.
- MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass – Coleção 3 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil, acessado em 15 de novembro de 2018 através do link: <http://mapbiomas.org/>.
- MARTENS, B. et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture. *Geoscientific Model Development*, v. 10, n. 5, p. 1903–1925, 2017.
- MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; DE JEU, R. A. M.; et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 15, n. 2, p. 453–469, 2011.
- PIAO, S.; FRIEDLINGSTEIN, P.; CIAIS, P.; et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO₂ on global river runoff trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 104, n. 39, p. 15242–7, 2007.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Am. Statist. Assoc.*, v. 63, p. 1379–1389, 1968.
- THEIL, H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, I. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen*, v. 53, p. 386–392, 1950.
- TROCH, P. A.; LAHMERS, T.; MEIRA, A.; et al. Catchment coevolution: A useful framework for improving predictions of hydrological change? *Water Resources Research*, p. 2742–2759, 2015.
- USGS - U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc Second scene. Maryland, EUA: 2006. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 jun. 2017.
- VAN LOON, A. F. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 2, n. 4, p. 359–392, 2015.
- VILLAR, E. J. C.; GUYOT, J. L.; RONCHAIL, J.; et al. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). *Journal of Hydrology*, v. 375, n. 3–4, p. 297–311, 2009.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, v. 2659, p. 2644–2659, 2015.
- YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, v. 16, p. 1807–1829, 2002.