

**COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA
ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM ESCALA
NACIONAL**

**SUBPROJETO – REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES VIA
MODELAGEM HIDROLÓGICA**

**ÍNDICES HIDROLÓGICOS DE RIOS DA
AMÉRICA DO SUL**

IPH-ANA-HGE-SR-R2

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Índices

Hidrológicos de rios da América do Sul



ESTE MATERIAL FAZ PARTE DE UM CONJUNTO DE RELATÓRIOS CRIADOS NO CONTEXTO DO PROJETO DE COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM ESCALA NACIONAL, ENTRE O INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH-UFRGS) E A AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA).

AUTORES: Larissa de Castro Ribeiro, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Walter Collischonn, Mino Viana Sorribas e Cléber Henrique de Araújo Gama.

COMO CITAR: Ribeiro, L. de C., Sorribas, M. V., Gama, C. H. de A, Collischonn, W., Paiva, R. C. D., 2021. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Índices hidrológicos de rios da América do Sul: IPH-ANA-HGE-SR-R2. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Sumário

1	Apresentação	5
2	Introdução	6
3	Revisão Bibliográfica	8
3.1	Regime De Vazões Naturais	8
3.2	Caracterização Do Regime De Vazões.....	9
3.2.1	Índices Hidrológicos	9
4	Metodologia	10
4.1	Vazões estimadas por modelagem hidrológica	10
4.2	Vazões observadas dos postos fluviométricos para análise da acurácia da estimativas dos índices hidrológicos	12
4.2.1	Filtro de seleção de vazões observadas dos postos fluviométricos.....	13
4.3	Mapas Climáticos e hidrogeológicos.....	14
4.4	Índices Hidrológicos	15
4.4.1	Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro	18
4.4.2	Vazão mínima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias	18
4.4.3	Vazão máxima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias.....	19
4.4.4	Data da vazão mínima	19
4.4.5	Data da vazão máxima	19
4.4.6	Taxa de ascensão.....	19
4.4.7	Taxa de recessão	20
4.4.8	Número de reversões.....	20
4.4.9	Índice da vazão de base (IQB)	20
4.4.10	Coeficiente de recessão da vazão de base (k).....	20
4.4.11	Coeficiente de escoamento (R_{QP}).....	21
4.4.12	Inclinação da curva de permanência das vazões (S_{FDC})	21
4.4.13	Índice de assimetria do hidrograma (S)	21
4.4.14	Elasticidade da vazão (E_{QP})	22
4.4.15	Índice de aridez (IA).....	22
4.4.16	Vazão média (Q_m).....	23
4.4.17	Frequência e duração de vazões altas, baixas e vazões zero.....	23
4.4.18	Vazão máxima de referência (Q_5).....	23
4.4.19	Vazão mínima de referência (Q_{95}).....	23
4.4.20	Vazão máxima de referência normalizada (Q_{10}/Q_{50}).....	24
4.4.21	Autocorrelação (Acorr).....	24

4.5	Análise Da Acurácia Dos Índices Hidrológicos Estimados Através De Vazões Simuladas	24
5	Resultados	26
5.1	ANÁLISE DA ACURÁCIA DOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS.....	27
5.1.1	Visão geral da acurácia.....	29
5.2	ÍNDICES HIDROLÓGICOS.....	34
5.2.1	Magnitude das vazões médias (G1)	34
5.2.2	Magnitude das vazões extremas (G2)	35
5.2.3	Sazonalidade de extremos (G3)	37
5.2.4	Variabilidade das vazões no tempo (G4).....	39
5.3	BASE DE DADOS.....	41
6	Conclusão	44
7	Referências Bibliográficas	45
	APÊNDICE A	51
	APÊNDICE B	58

1 APRESENTAÇÃO

Este documento apresenta o relatório “IPH-ANA-HGE-SR-R2” do subprojeto “Regionalização de vazões via modelagem hidrológica”, no contexto do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”, na forma de um Termo de Execução Descentralizada (TED) entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Neste relatório serão apresentados e analisados índices hidrológicos, calculados a partir de vazões naturais estimados por modelagem hidrológica, para rios da América do Sul. Também será apresentada a análise da acurácia desses índices hidrológicos, através de erro relativo, erro absoluto e correlação, e uma base de dados com esses índices. A base de dados foi construída através da elaboração de mapas com os principais índices hidrológicos no arquivo “IPH-ANA-HGE-SR-B2” disponibilizado em plataforma *online* no formato ESRI *shapefile*. O manual de utilização da base de dados está disponibilizado no arquivo “IPH-ANA-HGE-SR-M2”.

O estudo apresentado neste relatório faz parte da dissertação de mestrado intitulada “Caracterização do Regime de Vazões Naturais de Rios da América do Sul Utilizando Modelagem Hidrológica” apresentada por Ribeiro (2021), desenvolvida no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS), sob orientação do Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

2 INTRODUÇÃO

Os rios prestam importantes serviços ambientais relacionados à preservação e sustentação dos ecossistemas aquáticos. Possuem um papel importante no ciclo hidrológico de bacias hidrográficas (Bunn and Arthington, 2002; Poff et al., 1997) e sustentam atividades humanas socioeconômicas como o abastecimento de água de cidades, navegação, suprimento para a indústria, agricultura e geração de energia elétrica. A América do Sul se destaca por possuir grandes rios, como os transfronteiriços rios Amazonas, rio Paraguai, rio Uruguai, rio do Prata, e grandes rios brasileiros como o rio Parnaíba, rios Tocantins-Araguaia e rio São Francisco, com variados comportamentos hidrológicos e diversidade climática (Figura 1). Sendo uma das regiões mais ricas em recursos hídricos do mundo e responsável por cerca de 30% da água doce desaguada nos oceanos (Shiklomanov e Rodda, 2004; Berner e Berner, 2012), suas grandes bacias comportam ecossistemas aquáticos com uma imensa biodiversidade, como as áreas alagadas da bacia do Rio Amazonas e do Pantanal, que realizam serviços ambientais importantes (Harris et al., 2005; Pott and Pott, 2004; Junk et al., 2007).

Os rios possuem características hidrológicas em seu regime de vazões que podem variar ao longo do tempo, em escala diária, mensal, sazonal e decadal. Neste contexto, compreender seu comportamento natural é importante para o adequado gerenciamento dos recursos hídricos e para monitorar a preservação dos serviços ambientais e socioeconômicos.

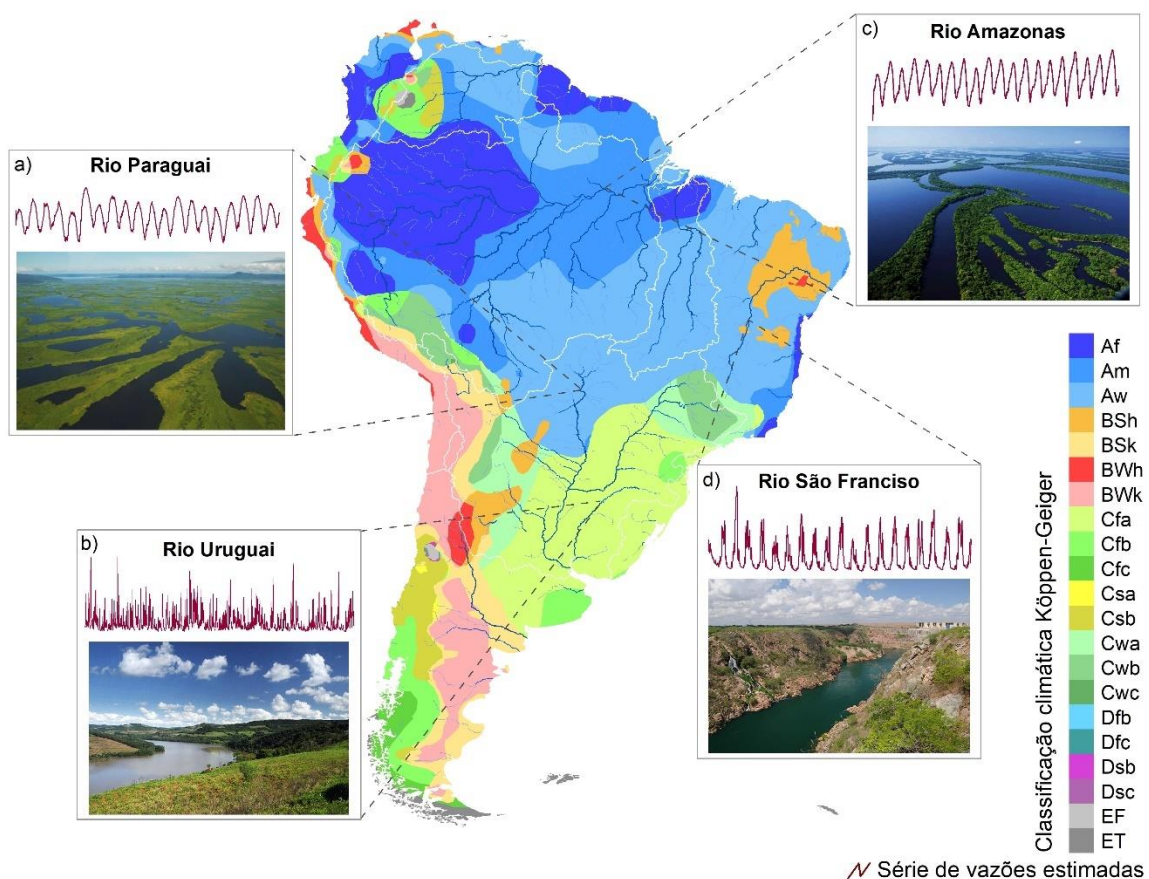


Figura 1. Rios da América do Sul. a) Rio Paraguai. Fonte: Soares, 2020; b) Rio Uruguai. Fonte: ANA, 2020a; c) Rio Amazonas. Fonte: Morais, 2020; d) Rio São Francisco. Fonte: ANA, 2020b.

O comportamento dos rios pode ser compreendido e caracterizado através do regime de vazões, que é descrito pelo padrão das características das séries de vazões de um rio como a magnitude,

regularidade de ocorrência e variabilidade das vazões. A mudança dessas características do regime de vazões pode ameaçar a integridade dos ecossistemas aquáticos e causar impactos na dependência dos rios para as atividades socioeconômicas, devido a imprevisibilidade dinâmica das séries de vazões (Poff et al., 1997; Virkki et al., 2021). Informações contidas nas séries de vazões nas escalas horária, diária, sazonal e interanual são fundamentais para obter o regime de vazões e assim, o entendimento do comportamento dos rios (Poff et al., 1997). Essas informações podem ser traduzidas através de índices hidrológicos.

Modelos hidrológicos são uma alternativa para estimar as vazões em locais não monitorados, sobretudo em escala continental (Sivapalan et al., 2003; Wood et al., 2011; Bierkens, 2015; Bierkens et al., 2015; Sood and Smathkin, 2015), e sendo adequados para análise de séries diárias no estudo de regimes de vazões (Melles et al. 2014), complementando o papel dos postos de monitoramento.

Através da caracterização do regime de vazões utilizando índices hidrológicos, podemos analisar o comportamento dos rios, e regiões hidrográficas (Chagas et al., 2020; Siddiqui et al., 2021). Esses índices fornecem informações relevantes sobre o comportamento hidrológico, dando ferramentas para identificar padrões, processos dominantes e a sua intensidade e influência destas características de vazões nos ecossistemas aquáticos. A comunidade de gestão de recursos hídricos, em geral, utiliza os índices hidrológicos das vazões de referência (e.g. Q_{90} , Q_{95} , $Q_{7,10}$) para a tomada de decisão. Alguns índices hidrológicos foram abordados por algumas comunidades de ecólogos como sendo os IHAs (Índices de Alteração Hidrológica), analisando a relação do regime de vazões com ecossistemas aquáticos. A comunidade científica dos hidrólogos vem utilizando índices hidrológicos como as assinaturas hidrológicas (e.g. índice de vazão de base, inclinação da curva de permanência das vazões, vazão média) como métricas para caracterizar e analisar o comportamento do regime de vazões dos rios.

Avanços recentes de Siqueira et al. (2018), demonstraram a capacidade atual da modelagem hidrológica continental na América do Sul para representação de séries de vazões com acurácia similar ao normalmente obtido em modelagem hidrológica em escala de bacias hidrográficas. Este desenvolvimento traz novas oportunidades para a caracterização do regime hidrológico dos rios.

Neste relatório será apresentada a caracterização e mapeamento do regime hidrológico em trechos de rios da América do Sul através de índices hidrológicos e a avaliação do desempenho da modelagem hidrológica em reproduzir o regime de vazão natural dos rios através desses índices. Também será apresentada uma base de dados, construída através da elaboração de mapas com os principais índices hidrológicos e de arquivo disponibilizado em plataforma online no formato ESRI *shapefile*. As séries de vazões naturais utilizadas neste trabalho foram obtidas através de modelagem hidrológica em escala continental, com resultados do Modelo de Grandes Bacias (MGB) apresentados por Siqueira et al. (2018), não considerando ações antrópicas como tomada d'água e reservatórios, mudanças climáticas e mudanças interdecadais nas séries de vazões.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REGIME DE VAZÕES NATURAIS

O regime de vazões de um rio é definido pelo conjunto de características que descrevem a magnitude, previsibilidade e variabilidade de suas vazões. Essas características são importantes para manter integridade ecossistemas aquáticos, pois a biodiversidade presente nesses ecossistemas evoluiu de acordo com adaptação a essas características de vazões, como por exemplo o movimento e velocidade das águas e a sedimentação no canal do rio, assim como a dinâmica de secas e inundações (Poff et al., 1997; Bunn and Arthington, 2002).

Segundo Poff et al. (1997), a caracterização do regime de vazões (Figura 2) é dada pela sua magnitude, sazonalidade (*timing*) ou capacidade de previsão da regularidade de ocorrência de vazões, duração de uma condição de vazão, frequência de ocorrência de algum evento e taxa de mudança dessas vazões, e são necessários muitos anos de observações de vazão para descrever essas características. Estas características exercem funções onde a alteração de cada uma delas pode representar uma resposta ecológica. Poff et al. (1997) apresentam exemplos de mudanças nessas características e sua resposta ecológica correspondente, como por exemplo a perda de intensidade das vazões nos picos sazonais pode interromper a desova de algumas espécies de peixes.

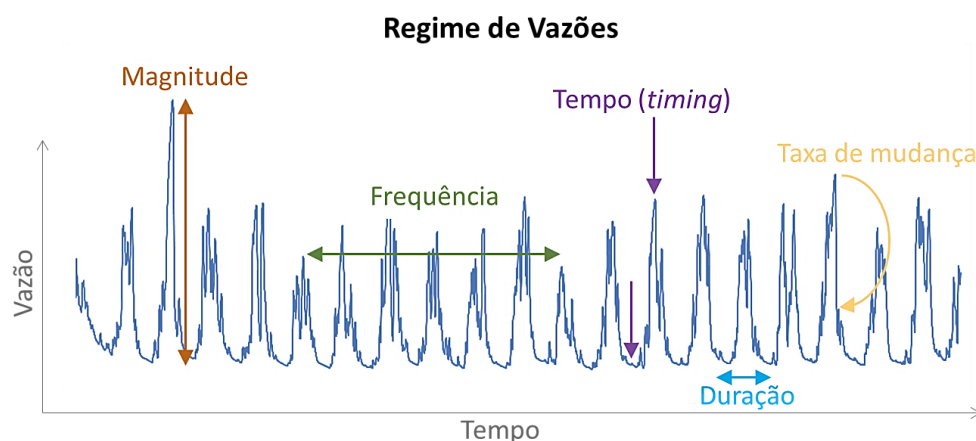


Figura 2. O regime de vazões e suas características principais.

Assim como na ecologia, o regime de vazões também regula aspectos sociais e econômicos dependentes da água. Questões como “O quanto de água temos?”, “Quando teremos água?”, “Por quanto tempo teremos água?”, “Qual será a duração magnitude da seca?”, “Qual será a magnitude das inundações?”, “Quais são as dinâmicas das vazões?”, são documentadas na agenda de pesquisa internacional PUB (Prediction in Ungauged Basins, Blosch et al. 2013). Predições acerca das vazões nos rios são demandadas pela população, indústria e agricultura dependentes do uso da água, e no gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos.

Um dos desafios mais relevantes da hidrologia é obter informações das vazões em rios. Existem diversos tipos de métodos, como os que medem a vazão *in situ* em pontos de monitoramento, e métodos que estimam as vazões, como a regionalização de vazões e modelagem hidrológica, aplicados principalmente para regiões com poucos pontos de monitoramento e que necessitam

dessas informações. Com a obtenção das séries de vazões dos rios é possível calcular índices hidrológicos que representam suas características dos regimes de vazões.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VAZÕES

A caracterização dos regimes de vazões pode ser realizada através de métricas que resumem o comportamento dos rios. A comunidade de gestão de recursos hídricos, em geral, utiliza algumas vazões de referência como métricas para as tomadas de decisões. Essas métricas foram abordadas por algumas comunidades de ecólogos como sendo os IHA (Índices de Alteração Hidrológica), analisando a relação do regime de vazões com ecossistemas aquáticos. Por outro lado, a comunidade científica da hidrologia vem utilizando assinaturas hidrológicas como métricas para caracterizar e analisar o comportamento do regime de vazões. Neste relatório chamaremos essas métricas de índices hidrológicos. A seguir, serão apresentadas resumidamente elementos da caracterização do regime de vazões.

O regime de vazões pode ser caracterizado através do estudo dos índices hidrológicos, e pode ser utilizado para entender o comportamento dos rios e analisar a dependência de ecossistemas aquáticos em características do regime de vazões (e.g. Siddiqui et al., 2021). A caracterização do regime de vazões pode ser realizada através da análise de índices hidrológicos como índice de aridez, vazões de referência, inclinação da curva de permanência e coeficiente de escoamento, relacionadas a atributos das bacias, como área, solo e geologia, dessa forma se torna possível compreender o funcionamento dos rios e as características dominantes que regem o regime de vazões (e.g. Kuentz et al., 2017; Addor et al., 2018; Ouellet Dallaire et al., 2018; Jehn et al., 2020).

3.2.1 Índices Hidrológicos

Os índices hidrológicos podem ser utilizados na caracterização dos regimes de vazões, através da análise de sua dinâmica temporal estabelecendo índices como a vazão mínima, máxima e média. Os índices resumem alguns aspectos do regime de vazões, que é um dos fatores que controlam o regime ambiental dos ecossistemas aquáticos, ribeirinhos e de áreas alagadas. Alguns exemplos de índices hidrológicos são os Índices de Alteração Hidrológica (IHAs), assinaturas hidrológicas e vazões de referência, que são abordados a seguir.

Os ecossistemas se adaptaram e se desenvolveram de acordo com os regimes de vazão, formando condições ambientais para sua evolução e distribuição. A relação entre os índices hidrológicos e sua influência nesses ecossistemas são explorados através de Índices de Alteração Hidrológica (IHA) (Richter et al, 1996; Poff et al., 1997; Richter et al, 1998).

Os IHAs são desenvolvidos com base em sua relevância ecológica e em sua capacidade de refletir as alterações causadas por antropização no regime de vazões naturais (Mathews e Richter, 2007). Foram estabelecidos 33 IHA, descritos pelo Manual do usuário da IHA (The Nature Conservancy, 2006) com base na metodologia apresentada por Richter et al. (1996), onde são analisadas séries de vazões diárias para a obtenção destes índices.

Segundo Richter et al. (1996) esses 33 IHA podem ser separados em 5 grupos, de acordo com as características do regime de vazões, sendo eles: magnitude das vazões médias; magnitude e duração dos extremos; sazonalidade dos extremos; frequência e duração de pulsos de vazões altos e baixos; e variabilidade das vazões no tempo.

Richter et al. (1996) representa os IHA como o grau da mudança percentual desses índices antes e após antropizações como a regularização de vazão causadas pela operação de barragens, bombeamento de água subterrânea, entre outras. Este estudo vem sendo reproduzido por vários autores em variadas regiões do mundo, principalmente com análise do impacto de reservatórios (e.g. Gao et al., 2009; Armanini et al., 2014; Timpe & Kaplan, 2017; Do Vasco et al., 2019; Dong et al., 2020).

Na região do Pantanal (Brasil) os autores Jardim et al. (2020) avaliaram as mudanças causadas pela barragem de Manso utilizando os IHA, e mostraram que a implementação da barragem teve um efeito de regulação que diminuiu as vazões altas, aumentou as vazões baixas, além de reduzir a conectividade lateral.

Os IHA também têm sido utilizado com frequência em estudos para analisar cenários futuros com efeitos das mudanças climáticas globais, causando a alteração do regime de vazões (e.g. Bharati et al., 2016; Akhter et al., 2019; López-Ballesteros et al., 2020), o que aponta a importância de documentar esses índices, que podem servir de base para a análise de como e o quanto o regime de vazões está sendo alterado.

Assinaturas hidrológicas são índices hidrológicos obtidos através de séries observadas ou estimados por modelagem, de dados hidrológicos como vazão, chuva ou umidade do solo. Esses índices apresentam informações relevantes sobre o comportamento hidrológico, como processos dominantes na geração de escoamento de uma região hidrológica (McMillan et al., 2017). Exemplos de assinaturas hidrológicas obtidas a partir de séries de vazão de um rio incluem vazão média, índice de vazão de base, inclinação da curva de permanência da vazão (McMillan et al., 2017) e coeficiente de autocorrelação da série de vazão (Euser et al., 2012).

McMillan (2020) categoriza as assinaturas hidrológicas com base em processos como a evapotranspiração, armazenamento e derretimento de neve, excesso de infiltração e saturação, água subterrânea, armazenamento de água, vazão de base, conectividade e alteração humana, em uma revisão que mostra a variabilidade substancial no número, tipo e escala temporal das assinaturas disponíveis para representar cada processo hidrológico.

As assinaturas hidrológicas também podem ser utilizadas na calibração de parâmetros de modelos hidrológicos, minimizando a diferença de assinaturas obtidas através de dados observados e dados simulados (Hingray et al., 2010; Pfannerstill et al., 2014) e analisar a consistência da estrutura de modelos chuva-vazão em reproduzir comportamentos hidrológicos (Euser et al., 2012).

Addor et al. (2017) apresentaram um estudo onde foi gerada uma base de dados hidrológicos chamada CAMELS para os Estados Unidos, e Chagas et al. (2020) gerou uma base de dados semelhante chamada CAMELS-BR, dentre estes dados, foram obtidas 13 assinaturas hidrológicas para 897 postos fluviométricos distribuídos no Brasil, sendo elas: a) vazão média diária; b) coeficiente de escoamento; c) elasticidade da vazão; d) inclinação da curva de duração; e) índice da vazão de base; f) data média de meia vazão (Mean half-flow date); g) Q_5 ; h) Q_{95} ; i) frequência e duração de vazões máximas; j) frequência e duração de vazões mínimas; e k) frequência de dias com vazão 0.

As assinaturas hidrológicas obtidas por Chagas et al. (2020) foram analisadas pontualmente e espacialmente, onde foi possível relacioná-las com o comportamento do regime de vazões. A Tabela 1 apresenta uma relação entre algumas assinaturas hidrológicas com características do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Tabela 1. Assinaturas Hidrológicas e suas relações com características hidrológicas de bacias.

Assinatura hidrológica	Característica hidrológica relacionada	Referência
Coeficiente de escoamento	Valores altos indicam que uma grande quantidade de água que entra, sai como vazão, enquanto um valor baixo pode identificar que uma grande quantidade de água da bacia sai como evapotranspiração	Sawicz et al. (2011)
Inclinação da curva de permanência das vazões	Valores altos podem indicar um regime de vazão variável, valor baixo significa uma resposta mais amortecida podendo ser resultado de uma chuva constante e/ou uma contribuição vinda de água subterrânea, também podendo se relacionar com a redistribuição da umidade do solo	Sawicz et al. (2011); Yilmaz et al. (2008)
Índice de vazão de base	Define a fração da vazão que é de origem subterrânea	Sawicz et al. (2011)
Elasticidade da vazão	pode significar a sensibilidade ou insensibilidade em relação a mudança na precipitação	Sawicz et al. (2011); Sankarasubramanian et al. (2001)

As vazões de referência, que também são índices hidrológicos, são utilizadas para amenizar prováveis situações críticas de abastecimento em épocas de escassez hídrica, como critério no gerenciamento de outorga do uso da água por órgãos gestores como a ANA, ADASA (Distrito Federal), SEMA (Mato Grosso), Águas Paraná (Paraná) e SEMARH (Alagoas). As vazões mínimas de referência mais comumente utilizadas são a Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ segundo o levantamento apresentado por Lisboa (2014).

As vazões Q_{90} e Q_{95} podem ser estimadas através da vazão com permanência de 90% ou 95%, ou seja, aquela igualada ou superada em 90% ou 95% do tempo, de acordo com a série histórica de vazões (Câmara, 2003). A vazão $Q_{7,10}$ é a mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos. As vazões máximas de referência Q_{10} e Q_5 também são utilizadas para estimar a disponibilidade hídrica de regiões e para estimar eventos de cheias, como vazões de cheia com tempo de retorno T_r de 2, 10, 50 e 100 anos, por exemplo. Vazões de referência podem ser utilizadas para caracterizar o regime de vazões dos rios, também sendo analisadas como índices hidrológicos (e.g. David et al., 2019; Chagas et al., 2020; Jehn et al., 2020).

4 METODOLOGIA

A metodologia deste estudo está apresentada no fluxograma da Figura 6, que em suma, consistiu na obtenção de uma base de dados para o cálculo dos índices hidrológicos utilizando séries de vazões diárias estimadas por modelagem hidrológica, e utilizando séries de vazões observadas de postos fluviométricos. Após o cálculo dos índices hidrológicos foi realizada a análise da acurácia dos índices obtidos com as séries de vazões estimadas, comparando-os com os índices obtidos de séries de vazões observadas. Posteriormente foi realizada a caracterização dos rios da América do Sul através do mapeamento e da análise dos índices hidrológicos, com apoio dos mapas climáticos e hidrogeológicos da base dados. Também foi criada uma base de dados através da elaboração de mapas com os principais índices hidrológicos analisados. Os próximos tópicos abordam os componentes da metodologia com mais detalhes.

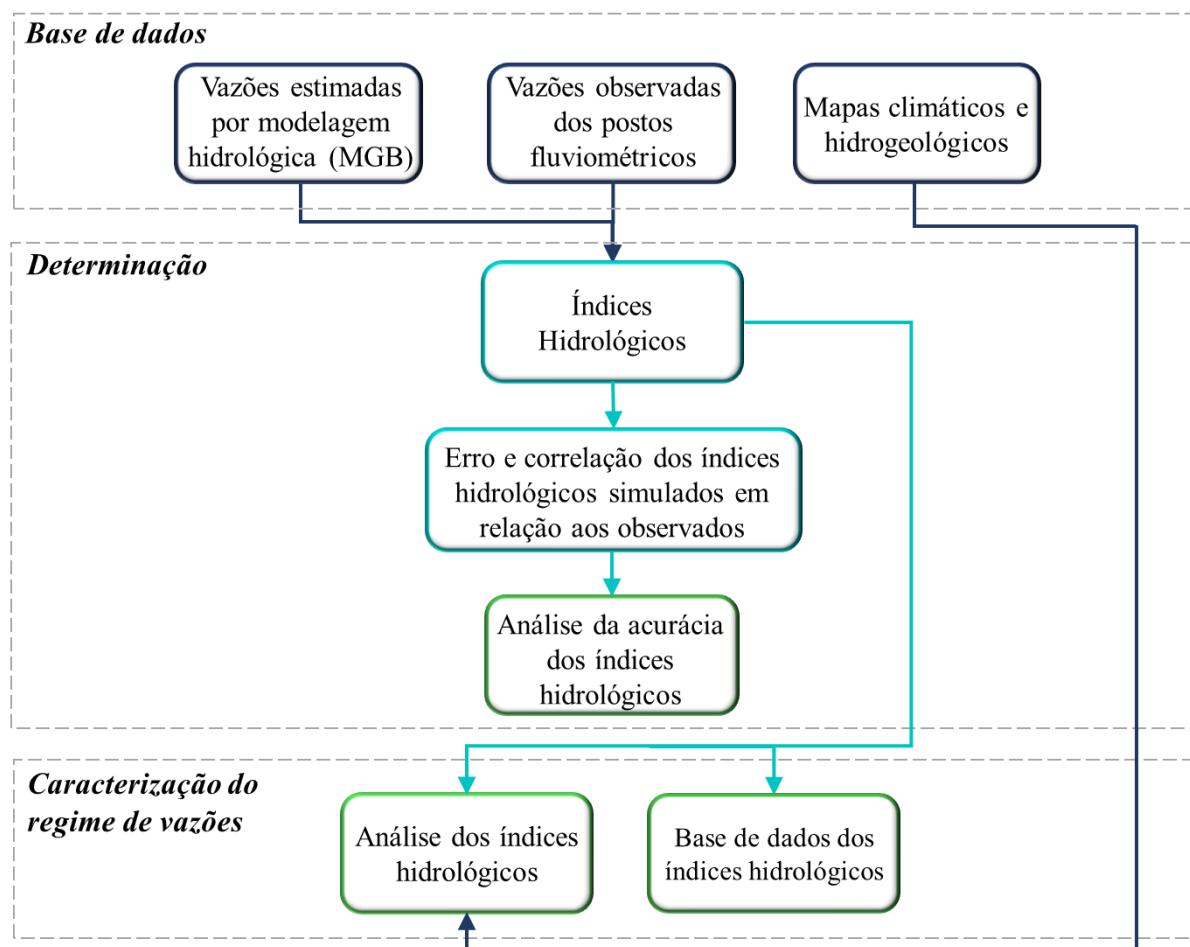


Figura 3. Fluxograma geral da proposta metodológica.

4.1 VAZÕES ESTIMADAS POR MODELAGEM HIDROLÓGICA

Foram utilizadas as vazões diárias estimadas para a América do Sul apresentadas por Siqueira *et al.* (2018) utilizando o modelo MGB, com período da simulação das séries de vazões estendido de janeiro de 1979 a dezembro 2014 utilizando dados de entrada da modelagem de precipitação do MSWEP v2.0 (Beck *et al.*, 2019). As vazões foram obtidas em mm/dia para que os resultados pudessem ser comparados à estudos como os apresentados por Chagas *et al.* (2020), David *et al.* (2019) e Beck *et al.* (2013), além disso, facilita a comparação entre diferentes rios com

diferentes áreas de contribuição, onde foi considerada a área da bacia de cada trecho de rio discretizado na modelagem.

O modelo MGB possui desempenho satisfatório em aplicações de grande escala e desempenho equivalente em aplicações locais, melhor do que o obtido por modelos globais (Paiva et al., 2013; Pontes et al., 2017; Siqueira et al., 2018) e em bacias de respostas sazonais e relativamente lentas (como a bacia Amazônica), mas também o comportamento em cheias mais rápidas e não sazonais (Bravo et al., 2012; Paiva et al., 2013; Fan et al., 2016; Pontes et al., 2017). O MGB-AS possui a melhor estimativa de vazões diárias distribuídas na América do Sul, conforme as análises apresentadas por Siqueira et al. (2018). A base de dados das vazões simuladas por Siqueira et al. (2018) se encontram disponíveis no portal do site do HGE/IPH/UFRGS (<https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos/south-america-river-discharge-dataset/>).

As vazões foram obtidas numa série contínua de 35 anos (compreendidos entre 1980 a 2014). Da mesma forma que considerado no trabalho de Siqueira et al. (2018), o primeiro ano de simulação disponibilizado (1979) foi descartado, para evitar erros relativos ao período de aquecimento do modelo hidrológico. Conforme apresentado por Siqueira et al. (2018), as séries geradas foram consideradas satisfatórias em termos de Nash-Sutcliffe e eficiência de Kling-Gupta, principalmente em grandes rios e áreas úmidas.

A modelagem hidrológica realizada por Siqueira *et al.* (2018) utilizando o modelo MGB não considerou ações antrópicas como tomada d'água e reservatórios. Também não foram consideradas as mudanças climáticas e mudanças interdecadais nas séries de vazões. Sendo assim, as séries de vazões obtidas pelos autores representam as vazões naturais dos rios, em seu comportamento médio.

Na modelagem hidrológica da América do Sul, Siqueira et al. (2018) discretizaram a região em minibacias com 33 mil trechos de rios, como ilustra a Figura 4, com comprimento médio de 15 km. Desta forma, será possível caracterizar o regime de vazões em dezenas de milhares de locais.

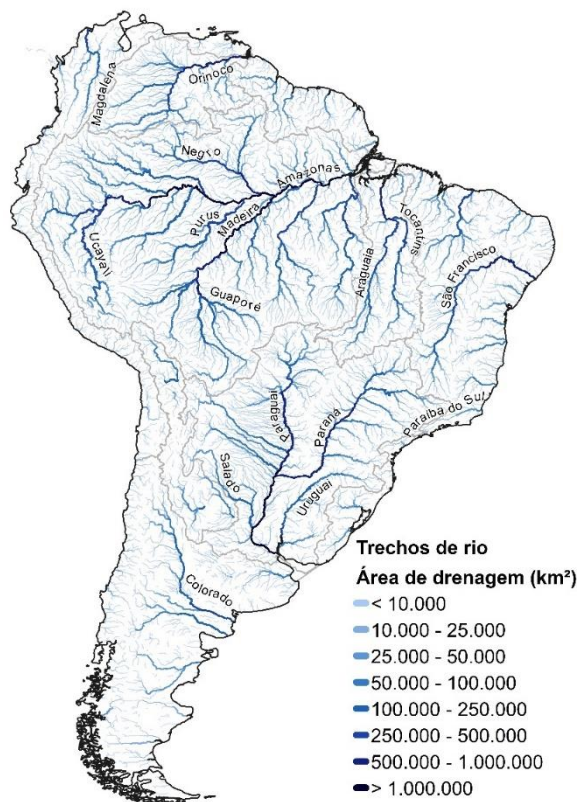


Figura 4. Discretização dos rios em 33 mil trechos, obtidos na modelagem hidrológica da América do Sul.

4.2 VAZÕES OBSERVADAS DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS PARA ANÁLISE DA ACURÁCIA DA ESTIMATIVAS DOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS

Para escolha dos postos fluviométricos com série histórica do período de 1980 a 2014, foi utilizada a base de dados da ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico) e do ONS (Operador Nacional do Serviço Elétrico) para a região do Brasil. Para os outros países foram utilizados outras fontes de dados, com a mesma série histórica. Nesta base de dados foi utilizada uma filtragem para a seleção dos postos fluviométricos, descrito no item a seguir, resultando ao total de 1329 postos fluviométricos, descritos na Tabela 2. As séries de vazões observadas foram utilizados neste relatório como referência para a avaliação da acurácia dos resultados obtidos para os índices hidrológicos com as vazões estimadas.

Tabela 2. Base de dados das vazões observadas utilizadas.

Serviço hidrológico	Fonte de dados	Quantidade de postos
Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (Brasil)	ANA/Brazil: http://www.snirh.gov.br/hidroweb	1104
Operador Nacional do Serviço Elétrico – ONS (Brasil)	ONS/Brazil: http://ons.org.br/	95
<i>Environmental Research Observatory for geodynamical, Hydrological and Biogeochemical control of erosion/alteration and material transport in the Amazon (ORE-HyBam)</i>	ORE-HyBam: http://www.ore-hybam.org	17
<i>Instituto Nacional del Agua - INA (Argentina)</i>	INA/Argentina: http://bdhi.hidricosargentina.gov.ar	33
<i>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (Colômbia)</i>	IDEAM/Colombia: http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion	45
<i>Servicio Nacional de Meteorología y Hidrología - SENAMHI (Peru e Bolívia)</i>	SENAMHI/Peru and Bolivia	20
<i>Global Runoff Data Center – GRDC (Internacional)</i>	http://www.bafg.de/GRDC/	5
<i>Dirección General de Aguas - DGA (Chile)</i>	DGA/Chile: http://snia.dga.cl/BNAConsultas	10
Total		1329

4.2.1 Filtro de seleção de vazões observadas dos postos fluviométricos

O filtro de seleção de vazões observadas dos postos fluviométricos foi aplicado na base de dados das estações disponíveis para o download nos portais das instituições citadas na Tabela 2, e aplicada a seguinte sequência de filtragem:

- I) Exclusão de estações com série de vazões menor do que dois anos de dados para o período de 01/01/1979 e 31/12/2014;
- II) Medições identificadas como 0 (zero) m³/s no lugar de falha tornam-se falha. A identificação foi feita de forma automática pela consideração de que: em postos com Q90 superior a zero as vazões iguais a zero; em postos com Q90 igual à zero, se medições de 0 m³/s ocorrem na vizinhança de falhas ou se a vazão no dia anterior for maior do que 50 m³/s, também representam falhas;
- III) Vazões constantes por um longo período tornam-se falhas. Neste caso foi verificado quantas vezes um mesmo valor de medição se repetia ao longo da série disponível. Caso o valor mais repetido na série apresentasse mais que uma vez e meia o número de repetição de 99% dos outros dados, este valor era considerado falho quando ocorrido em dias sequentes;

IV) Medições superiores a 1000mm/dia e vazões negativas tornaram-se falhas.

Foi aplicado essa sequência de filtragens, porém, observamos que alguns postos ainda apresentavam dados de inconsistências nas medições das vazões, então foi realizada uma inspeção manual e alguns postos foram removidos. Após isso resultaram aproximadamente 1329 postos fluviométricos para a análise.

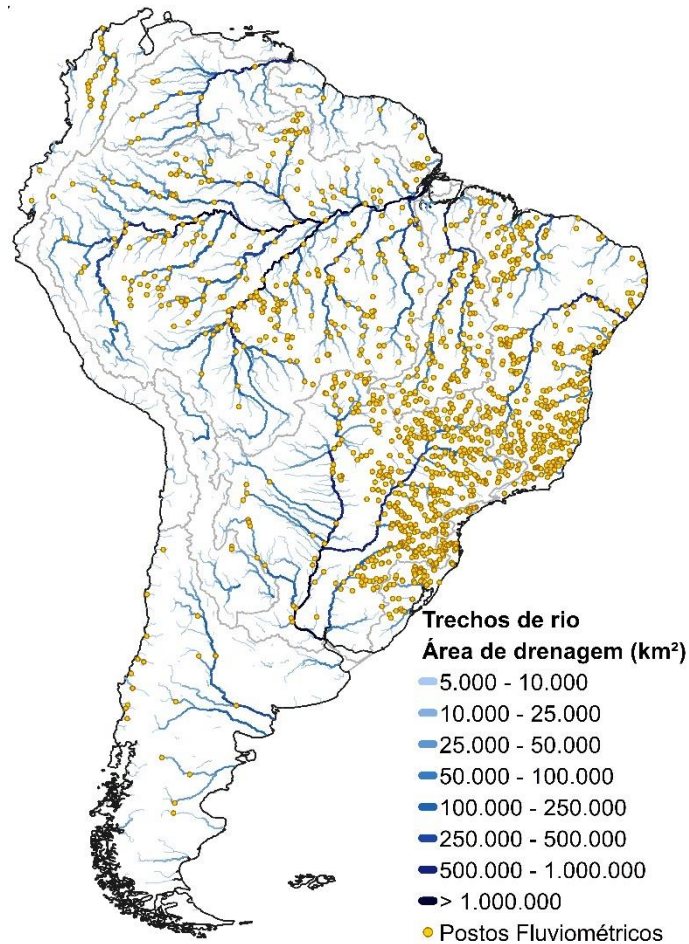


Figura 5. Postos fluviométricos utilizados para as análises.

4.3 MAPAS CLIMÁTICOS E HIDROGEOLÓGICOS

Para a análise da caracterização do regime de vazões dos rios utilizando os índices hidrológicos foram examinados os mapas de regiões climáticas, chuva, áreas alagadas e potencialidade hídrica da América do Sul, ilustrados na Figura 6, como ferramenta para compreender o comportamento dos rios em relação a alguns índices hidrológicos.

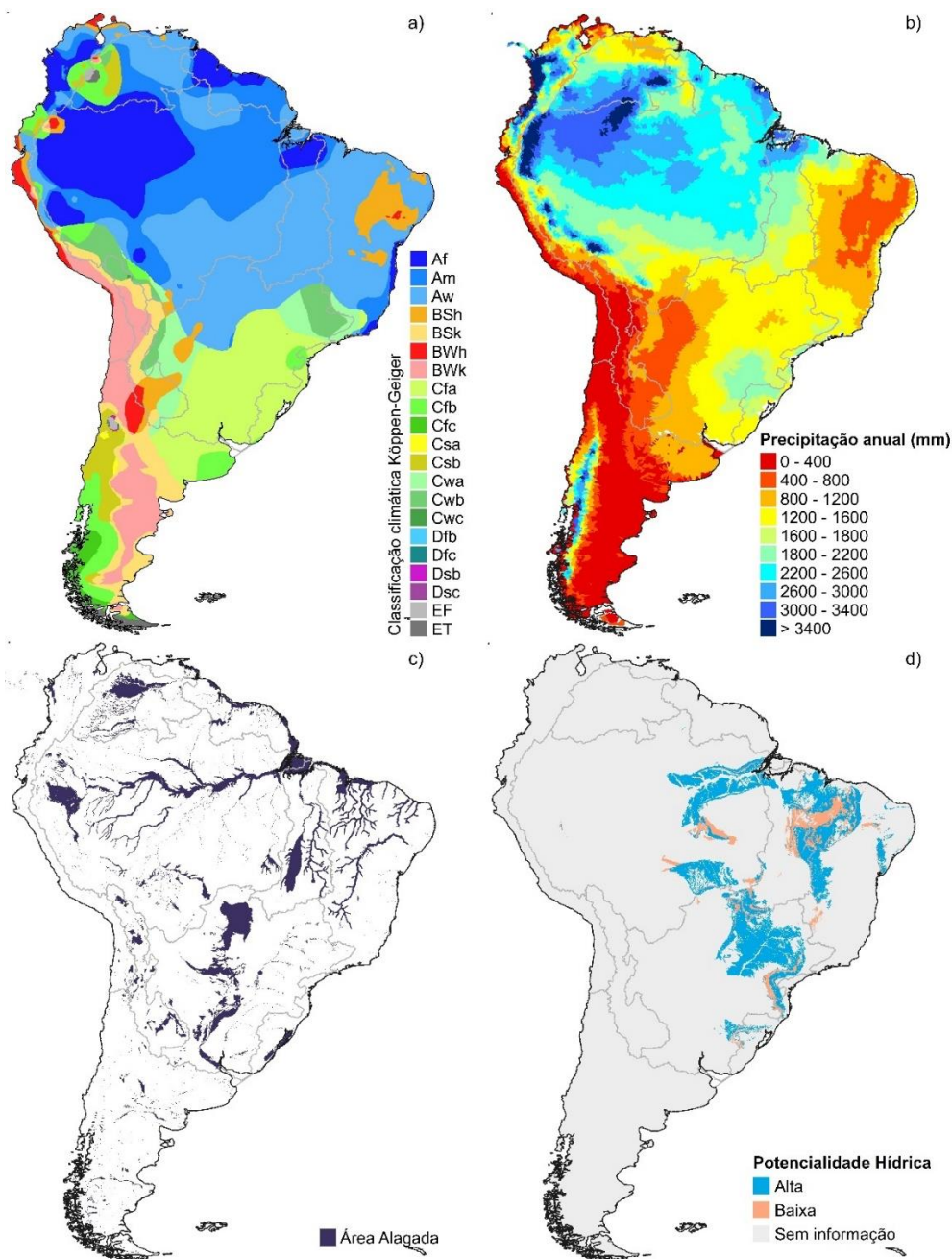


Figura 6. Mapas da América do Sul mostrando a) Classificação climática de Köppen-Geiger, adaptado de Peel et al. (2007), b) Chuva média anual em mm obtida do MSWEP v2.0. Fonte: Adaptado de Beck et al. (2019), c) Áreas alagadas e regiões baixas obtida do Global Lakes and Wetlands Database (GLWD-3), adaptado de Lehner e Döll (2004) e d) Potencialidade hídrica do Mapa de domínios e subdomínios hidrogeológicos do Brasil. Fonte: Adaptado de CPRM (2007).

4.4 ÍNDICES HIDROLÓGICOS

Para realizar a caracterização do regime de vazões dos rios da América do Sul, foram utilizados índices hidrológicos. Na obtenção dos índices hidrológicos, alguns foram calculados utilizando ano hidrológico de máximas (e.g. vazões máximas e elasticidade da vazão) e outros com ano hidrológico de mínimas (e.g. vazões mínimas, frequência de vazões mínimas). O cálculo dos índices hidrológicos foi realizado através da elaboração de rotinas programas em linguagem Python 3.7 e R, essas rotinas estão disponibilizadas no repositório do GITHUB:

https://github.com/Larissacr/hydrological_signatures. A separação dos anos hidrológicos foi realizada para cada trecho de rio analisado, conforme descrito a seguir.

Para a obtenção do mês de início dos anos hidrológicos foram obtidas as datas das vazões máximas/mínimas de cada um dos anos da série de vazões, após isso foi verificado qual o mês em que era mais frequente a ocorrência dessas vazões máximas/mínimas, obtendo para cada ano hidrológico a data da vazão mínima, posteriormente esse mês com maior frequência foi centralizado no ano hidrológico e o início do ano se dava 6 meses antes disso. Para exemplificar o ano hidrológico de mínimas, ilustrado na Figura 10, temos o exemplo de série de vazões com início em março e término em fevereiro, onde as vazões mínimas são centralizadas no ano hidrológico, no mês de agosto, para que toda a amplitude mínima de vazões seja captada.

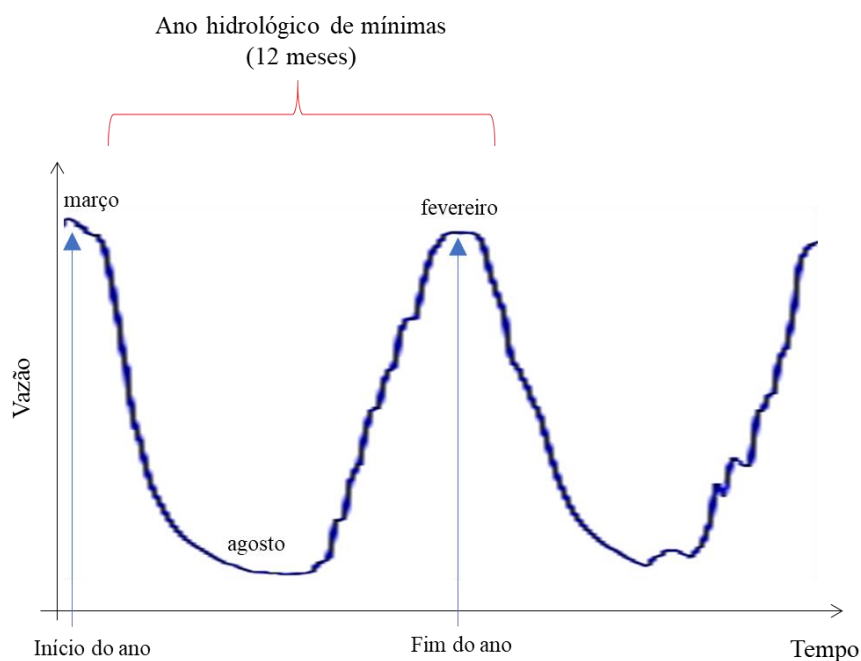


Figura 7. Exemplo de ano hidrológico de mínimas.

O ano hidrológico de máximas, ilustrado na Figura 8, para esse exemplo série de vazões, tem início em agosto e término em julho, onde as vazões máximas são centralizadas no ano hidrológico, no mês de fevereiro, para que toda sua amplitude máxima de vazões seja captada.

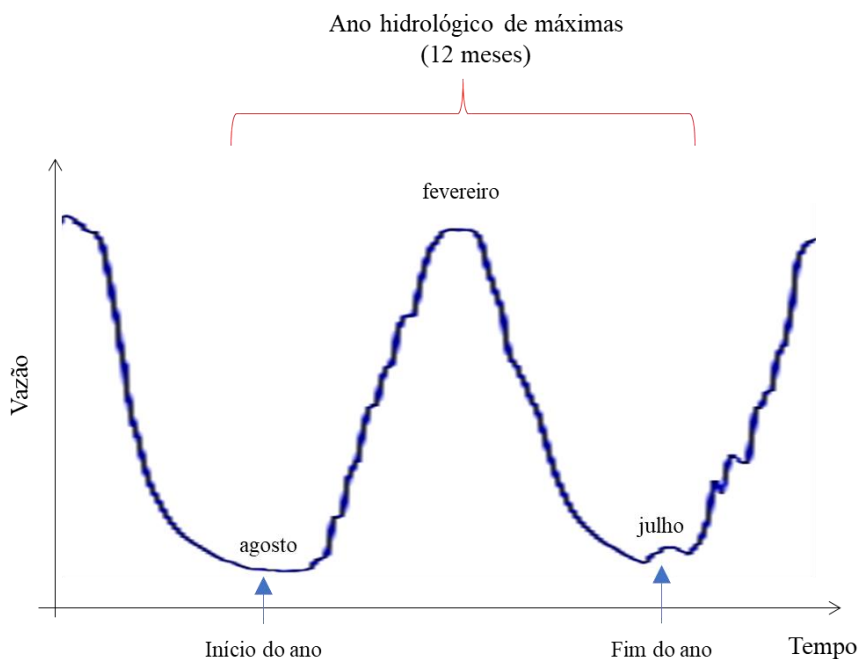


Figura 8. Exemplo de ano hidrológico de máximas.

Os índices hidrológicos calculados neste trabalho são descritos como 27 dos IHA, calculados de acordo com o manual do *software* Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 (The Nature Conservancy, 2009) e para 15 destes IHA foram calculados o desvio padrão e coeficiente de variação. Também foram calculadas 16 assinaturas hidrológicas, resultando em 73 índices hidrológicos. Tanto os IHA quanto as assinaturas hidrológicas foram nomeadas como **índices hidrológicos** neste estudo.

Para o cálculo dos índices de aridez e coeficiente de escoamento foram necessários dados de precipitação média diária, que foram obtidas do MSWEP v2.0 (Beck et al., 2019), e dados de evapotranspiração potencial, que foram obtidas da modelagem hidrológica com o MGB que gerou as séries de vazões estimadas, descritas no item 4.1 deste trabalho.

Todos os índices foram calculados para o período das séries de vazões simuladas e observadas de 1980 a 2014. Para a simplificação da visualização dos resultados, os índices hidrológicos foram categorizados em 4 grupos, como mostra a Tabela 3.

Nos tópicos a seguir será descrito como foi realizado o cálculo de cada um dos índices hidrológicos apresentados neste estudo.

Tabela 3. Índices hidrológicos separados em grupos (Adaptado de Black et al., 2005).

Grupo	Índice hidrológico
G1 - Magnitude das vazões médias	Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro
	Vazão média (Q_m)
	Coefficiente de Escoamento (RQP)
	Índice de Aridez (IA)
G2 - Magnitude das vazões extremas	Vazão mínima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias
	Vazão máxima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias
	Índice de vazão de base (IQB)
	Frequência de vazões igual a zero
	Vazão máxima de referência Q_5
	Vazão mínima de referência Q_{95}
	Vazão máxima de referência normalizada $Q_{10/Q50}$
	Frequência de vazões altas
	Duração de vazões altas
	Frequência de vazões baixas
Duração de vazões baixas	
G3 - Sazonalidade dos extremos	Data da vazão mínima
	Data da vazão máxima
G4 - Variabilidade das vazões no tempo	Taxa de ascensão
	Taxa de recessão
	Número de reversões
	Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)
	Elasticidade da vazão (EQP)
	Índice de assimetria do hidrograma (s)
	Coefficiente de recessão da vazão de base (k)
Autocorrelação (Acorr)	

4.4.1 Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro

Para este índice foram calculadas as vazões médias diárias de todos os meses para cada ano da série de vazões e para cada trecho de rio, e depois calculada a média diária mensal de todos os anos. O resultado deste índice é uma vazão diária média do mês correspondente em mm/dia.

4.4.2 Vazão mínima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias

Para o cálculo destes índices as séries de vazões foram separadas utilizando anos hidrológicos de mínimas. O ano hidrológico é utilizado para que se tenha segurança de que a vazão mínima de um ano é independente da vazão mínima do ano anterior ou posterior. Foi calculado o início do ano hidrológico de mínimas para cada trecho de rio analisado. Estes índices são obtidos do cálculo de médias móveis das vazões mínimas diárias para 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias consecutivos. Foram calculados valores destes índices para cada ano hidrológico da série de vazões, obtendo então 35 valores (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente calculada a média desses 35 valores para cada índice. Para estes índices também foram

calculados seus coeficientes de variação e desvio padrão. Os resultados destes índices são vazões diárias em mm/dia.

4.4.3 Vazão máxima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias

Para o cálculo destes índices as séries de vazões foram separadas utilizando anos hidrológicos de máximas. O ano hidrológico é utilizado para que se tenha segurança de que a vazão máxima de um ano é independente da vazão máxima do ano anterior ou posterior. Foi calculado o início do ano hidrológico de máximas para cada trecho de rio analisado. Estes índices são obtidos do cálculo de médias móveis das vazões máximas diárias para 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias consecutivos. Foram calculados valores destes índices para cada ano hidrológico da série de vazões, obtendo então 35 valores (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente calculada a média desses 35 valores para cada índice. Para estes índices também foram calculados seus coeficientes de variação e desvio padrão. Os resultados destes índices são vazões diárias em mm/dia.

4.4.4 Data da vazão mínima

Para este índice são calculadas as datas de ocorrência da vazão mínima com as séries de vazões do ano hidrológico de mínimas. As datas dessas vazões ocorrem com maior frequência no meio do ano hidrológico de mínimas, ou seja, se o ano hidrológico inicia em janeiro, a vazão mínima ocorre com mais frequência 6 meses depois, em julho. Estes índices indicam a previsibilidade das datas de ocorrência das vazões mínimas. Para que se possa efetuar o cálculo da data média de ocorrência da vazão mínima, as datas são transformadas para graus e após realizar as operações foram transformadas de volta para data, efetuando assim uma estatística circular. O resultado desse índice é o dia e o mês em que acontece a vazão mínima com mais frequência. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão. O desvio padrão é dado em dias/ano.

4.4.5 Data da vazão máxima

Para este índice são calculadas as datas de ocorrência da vazão máxima com as séries de vazões do ano hidrológico de máximas. Estes índices indicam a previsibilidade das datas de ocorrência das vazões máximas. Para que se possa efetuar o cálculo da data média de ocorrência da vazão máxima, as datas são transformadas para graus e após realizar as operações foram transformadas de volta para data, efetuando assim uma estatística circular. O resultado desse índice é o dia e o mês em que acontece a vazão máxima com mais frequência. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão. O desvio padrão é dado em dias/ano.

4.4.6 Taxa de ascensão

A taxa de ascensão foi considerada como a taxa média de acréscimo diário de vazão, em mm/dia. Foi calculada a média diária de acréscimo da vazão para cada ano hidrológico, obtendo assim 35 valores da taxa (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente foi calculada a média desses 35 valores. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão.

4.4.7 Taxa de recessão

A taxa de recessão foi considerada como a taxa média de decréscimo diário de vazão, em mm/dia. Foi calculada a média diária de decréscimo da vazão para cada ano hidrológico, obtendo assim 35 valores da taxa (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente foi calculada a média desses 35 valores. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão.

4.4.8 Número de reversões

O número de reversão das vazões é calculado considerando uma mudança na continuidade de acréscimo ou decréscimo da vazão de um dia para o outro, esse índice foi apresentado em dias/ano. Foi calculada a média anual do número de reversões da vazão para cada ano hidrológico, obtendo assim 35 valores deste índice (correspondentes aos 35 anos de dados), e posteriormente foi calculada a média desses 35 valores. Para este índice também foram calculados seu coeficiente de variação e desvio padrão.

4.4.9 Índice da vazão de base (IQB)

O índice da vazão de base é um indicativo de que a vazão de um rio é dependente ou não da vazão armazenada em aquífero e se a vazão pode sofrer muitas variações devido a taxa de evapotranspiração da bacia hidrográfica a qual pertence (Bosch et al., 2017). Altos valores deste índice podem indicar que a vazão do rio tem grande contribuição de aquífero e possuem respostas mais lentas a grandes eventos de chuva, sendo mais resiliente a períodos secos (Fan, 2015). Este índice foi estimado com base no filtro digital de Eckhardt (Eckhardt, 2005) com uma modificação apresentada no trabalho de Collischonn e Fan (2012), por meio da Equação 1, descrita a seguir:

$$IQB = \frac{Q_{90}}{Q_{50}} \quad (1)$$

onde IQB é o índice da vazão de base; Q_{90} Vazão referente ao 10º percentil da curva de permanência de vazões; e Q_{50} Vazão referente ao 50º percentil da curva de permanência de vazões.

4.4.10 Coeficiente de recessão da vazão de base (k)

É definida como a taxa de decaimento do da vazão de base (Vogel e Kroll, 1996), ou seja, esvaziamento do aquífero, calculada a partir de dados de vazões diárias como descrito por Beck et al. (2013). Altos valores de k , e baixos valores de IQB indicam que as bacias hidrográficas com alta demanda evaporativa seca mais rapidamente após eventos de chuva, resultando em vazões dominadas por eventos de curta duração (Beck et al., 2013), no geral quanto menor o valor de k , o escoamento tem grande contribuição da vazão superficial em períodos de seca e se “esvazia” rápido. Este índice é calculado através da Equação 2, descrita a seguir. Para este cálculo foram selecionadas apenas vazões com valores abaixo da Q_{90} (vazão referente ao 90º percentil da curva de permanência de vazões) e em trechos do hidrograma a partir de 5 dias seguidos de recessão das vazões.

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q_{(t+\Delta t)}}{Q_t}\right)} \quad (2)$$

onde k é o coeficiente de recessão da vazão de base; Q_i é a vazão diária no tempo t ; e Q_{i-1} é a vazão diária no tempo $t-1$.

4.4.11 Coeficiente de escoamento (R_{QP})

O coeficiente de escoamento é definido como a razão da vazão média de longo prazo com a precipitação média de longo prazo. Este índice representa a separação do balanço hídrico a longo prazo entre a água liberada da bacia hidrográfica como vazão, evapotranspiração e outros processos. Quanto mais alto o valor desse índice, provavelmente maior é a porcentagem da chuva que entra no sistema e sai como escoamento, quanto menor, provavelmente a chuva que entra sai em grande parte como evapotranspiração ou infiltração. Para o cálculo do RQP foi utilizada a precipitação média diária do MSWEP v2.0 (Beck et al., 2019), e como as vazões estimadas pela modelagem hidrológica utilizando o MGB foram obtidas para cada trecho de rio acumulando as vazões à montante, foi necessária realizar a média da precipitação para cada trecho, ponderando pelas suas respectivas áreas de drenagem. Este índice é calculado através da Equação 3, descrita a seguir.

$$R_{QP} = \frac{Q}{P} \quad (3)$$

onde R_{QP} é o coeficiente de escoamento; Q é a vazão média de longo prazo; e P é a precipitação média de longo prazo.

4.4.12 Inclinação da curva de permanência das vazões (S_{FDC})

A curva de permanência das vazões é a distribuição de probabilidades de fluxo ser maior ou igual a uma magnitude especificada. Para quantificar um índice de variabilidade de vazão, a inclinação da curva de permanência (SFDC) é calculada entre os 33% e 66% dos percentis de vazão, uma vez que em escala semi-logarítmica representa uma parte relativamente linear da curva de permanência das vazões e indica variabilidade das vazões (Yadav et al., 2007; Zhang et al., 2008; Sawicz et al., 2011). Altos valores desse índice sugerem vazões muito variáveis, causado por uma alta sazonalidade do regime de vazões ou por uma resposta rápida a eventos de precipitação (Yokoo and Sivapalan, 2011; McMillan et al., 2017). Este índice é calculado através da Equação 4.

$$S_{FDC} = \frac{\ln(Q_{33\%}) - \ln(Q_{66\%})}{(0,66 - 0,33)} \quad (4)$$

onde S_{FDC} é a inclinação da curva de permanência de vazões; $Q_{33\%}$ é o valor da vazão no percentil de 33%; e $Q_{66\%}$ é o valor da vazão no percentil de 66%.

4.4.13 Índice de assimetria do hidrograma (S)

Proposto por Fleischmann et al. (2016), este índice sugere que a assimetria do hidrograma é fortemente controlada pela relação entre vazão do rio e celeridade das ondas de inundação. Rios sem planícies de inundação geralmente possuem hidrogramas inclinados positivamente,

obtendo valores de S positivos, enquanto rios com várzeas possuem hidrogramas negativamente distorcidos, obtendo valores de S negativos. Este índice é calculado através da Equação 5, descrita a seguir. Esse índice é obtido calculando a derivada da vazão para cada dia e separando as médias das derivadas positivas (ascensão do hidrograma) e derivadas negativas (recessão do hidrograma).

$$S = 1 - \frac{\text{recessão do hidrograma } \frac{|dQ|}{|dt|}}{\text{ascensão do hidrograma } \frac{|dQ|}{|dt|}} = 1 - \frac{\frac{1}{n_{\text{neg}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{neg}}} \frac{|\Delta Q_{\text{neg},i}|}{\Delta t}}{\frac{1}{n_{\text{pos}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{pos}}} \frac{|\Delta Q_{\text{pos},i}|}{\Delta t}} \quad (5)$$

onde S é o índice de assimetria do hidrograma; ΔQ é o incremento de vazão entre dois dias consecutivos; n é o número de intervalos de tempo (dias); neg indica o número de intervalos de tempo em que ΔQ é negativo; e pos indica o número de intervalos de tempo em que ΔQ é positivo.

Se S for negativo (<0), a ascensão do hidrograma é mais lenta que a recessão e o hidrograma é negativamente assimétrico; se for igual a zero, o hidrograma é simétrico; e se >0 , a ascensão do hidrograma é mais rápida que a recessão (Fleischmann et al., 2016).

Fleischmann et al. (2016) ressaltam que este índice apresenta resultados mais concisos para bacias com hidrograma mais suaves, como em regiões de área alagada (e.g. Rio Amazonas, Rio Piquiri e Rio Paraguai).

4.4.14 Elasticidade da vazão (E_{QP})

Este índice é um indicador da sensibilidade da vazão média anual a mudanças na precipitação média anual. Por exemplo, um valor de elasticidade da vazão de 2 indica que uma mudança de 1% na precipitação média anual gera uma mudança de 2% na vazão média anual (Sankarasubramanian et al., 2001), então, quanto maior o valor do EQP, mais sensível o regime de vazões é a precipitação média anual. Este índice pode ser calculado considerando a diferença interanual entre a vazão anual dividido pela diferença inter-anual entre a precipitação anual, que é então normalizada pelo escoamento a longo prazo (Sankarasubramanian et al., 2001; Sawicz et al., 2011), calculada através da Equação 6.

$$E_{QP} = \text{mediana} \left(\frac{Q_t - \bar{Q}}{P_t - \bar{P}} \cdot \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right) \quad (6)$$

onde E_{QP} é a elasticidade de vazão; Q_t é o valor da vazão no tempo t ; \bar{Q} é o valor da vazão média anual; P_t é a precipitação no tempo t ; e \bar{P} é a precipitação média anual.

4.4.15 Índice de aridez (IA)

Este índice foi desenvolvido por Thornthwaite (1948) e posteriormente complementado por Penman (1953), onde apresenta a relação entre a umidade disponível provinda da precipitação e a umidade que sai da bacia através de evapotranspiração, é uma avaliação se o que entra de precipitação no balanço hídrico é o suficiente para manter a demanda d'água em vista do que é evaporado. A evapotranspiração e precipitação foram calculadas para cada minibacia onde se localizam os trechos de rios, delimitados pela modelagem hidrológica utilizando o MGB (Siqueira

et al., 2018). Valores altos do índice de aridez representam rios em regiões mais árida. Esta relação é calculada através da Equação 7.

$$IA = \frac{ETP}{\bar{P}} \quad (7)$$

onde IA é o índice de aridez; \bar{P} é a precipitação média anual; e ETP é a evapotranspiração potencial média anual.

4.4.16 Vazão média (Q_m)

Este índice representa a vazão média mensal. Para o cálculo deste índice, é realizada a aplicação de média aritmética para a série histórica de vazões, como mostra na Equação (8):

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} \quad (8)$$

onde Q_m é a vazão média; Q é a vazão diária; e N é o número de dias da série temporal de vazões.

4.4.17 Frequência e duração de vazões altas, baixas e vazões zero

O índice da frequência de vazões altas foi obtido através do cálculo da frequência média anual com que as vazões ultrapassaram 9 vezes o valor da vazão média diária e sua duração foi calculada com a contagem de dias no ano em que essa vazão média foi superada 9 vezes. Para a frequência de vazões baixas foi através do cálculo da frequência média anual com que as vazões ficaram abaixo 0.2 vezes o valor da vazão média diária e sua duração foi calculada com a ocorrência de dias consecutivos no ano em que isto ocorreu. No cálculo da frequência de vazões igual a zero, foi calculada a frequência média anual com que as vazões fossem iguais a 0. Os valores de 9 vezes o valor da vazão média diária para vazões altas e 0,2 vezes para vazões baixas foram estimados através da metodologia apresentada por Addor et al. (2017), que foi seguida para o cálculo deste índice.

4.4.18 Vazão máxima de referência (Q_5)

Obtido pela curva de permanência da série histórica das vazões, correspondente ao 5º percentil. É uma vazão máxima, utilizada para caracterizar vazões altas, estimadas através da vazão com permanência de 5%, ou seja, aquela igualada ou superada em 5% do tempo, de acordo com a série histórica de vazões (Câmara, 2003).

4.4.19 Vazão mínima de referência (Q_{95})

Obtido pela curva de permanência da série histórica das vazões, correspondente ao 95º percentil. É uma vazão mínima, utilizada para caracterizar vazões baixas, estimadas através da vazão com permanência de 95%, ou seja, aquela igualada ou superada em 95% do tempo, de acordo com a série histórica de vazões (Câmara, 2003).

4.4.20 Vazão máxima de referência normalizada (Q_{10}/Q_{50})

Vazão referente ao 10º percentil da curva de permanência normalizado pela vazão mediana da série de dados. É uma vazão máxima, utilizada para caracterizar vazões altas, estimadas através da vazão com permanência de 10%, ou seja, aquela igualada ou superada em 10% do tempo. Este índice será normalizado pela vazão média Q_{50} , assim como realizado por Sawicz et al. (2014) e David et al. (2019).

4.4.21 Autocorrelação (Acorr)

A autocorrelação de séries de vazões representa o quanto as vazões são correlacionadas entre seus valores, numa determinada distância temporal. A medida em que a distância temporal é aumentada na análise, espera-se que o valor de autocorrelação diminua, ou seja, provavelmente as vazões de um determinado dia são mais similares às vazões do dia anterior ou posterior do que as vazões 60 dias antes ou depois. Para este índice foi calculada a autocorrelação das vazões com uma distância temporal de 365 dias entre as vazões. Dessa forma é possível verificar a sazonalidade e previsibilidade das vazões.

Este índice foi calculado através de script na linguagem Python 3.7, disponibilizado no repositório do GITHUB: https://github.com/Larissacr/hydrological_signatures, onde foi utilizada a biblioteca statsmodels.tsa.stattools.acf, com base nos estudos de Parzen (1963) e Brockwell e Davis (2016).

4.5 ANÁLISE DA ACURÁCIA DOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS ESTIMADOS ATRAVÉS DE VAZÕES SIMULADAS

O objetivo da aplicação dos índices hidrológicos na caracterização dos regimes de vazões é o estudo do comportamento dos rios da América do Sul, de nenhuma forma é uma avaliação para alguma tomada de decisão, que requer elevada acurácia em pontos específicos, para o dimensionamento de obras hidráulicas ou outorga de vazões. Por isso, o foco desta análise de acurácia é mais voltado em verificar se as estimativas dos índices hidrológicos representam a magnitude e padrão espacial dos índices hidrológicos de vazões observadas.

Para a avaliação da representatividade dos índices hidrológicos estimados pela modelagem hidrológica, foram calculados o erro relativo (em módulo), o erro absoluto (em módulo) e a correlação dos índices obtidos através das séries de vazões simuladas em relação aos índices obtidos através das séries de vazões observadas.

O erro relativo normalizado (ER) é a relação entre a variável X observada (índice hidrológico calculado a partir de vazões observadas) e a variável Y estimada (índice hidrológico calculado a partir de vazões simuladas). De acordo com a formulação apresentada na Equação 8, os resultados indicam a magnitude em módulo do erro, em porcentagem, levando em consideração o desvio padrão dos dados observados como um fator de normalização. Esta formulação permite avaliar a magnitude do erro em relação a variabilidade do índice hidrológico sobre a América do Sul.

$$ER = \frac{|Y - X|}{DPX} \times 100 \quad (\%) \quad (8)$$

onde ER é Erro Relativo; X é valor observado (índice hidrológico calculado a partir de vazões observadas); Y é o valor estimado (índice hidrológico calculado a partir de vazões simuladas); e DPX é o desvio padrão do valor observado.

O erro absoluto é a diferença entre a variável X observada (índice hidrológico calculado a partir de vazões observadas) e a variável Y estimada (índice hidrológico calculado a partir de vazões simuladas). De acordo com a formulação apresentada na Equação 9, os resultados indicam a magnitude em módulo do erro.

$$EA = |Y - X| \quad (9)$$

onde EA é Erro Absoluto; X é valor observado (índice hidrológico observado) e Y é o valor estimado (índice hidrológico simulado).

Na análise da correlação foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson entre as estimativas obtidas via séries de vazões simuladas e observadas nos postos fluviométricos. Considerando que os postos fluviométricos são distribuídos de forma irregular (e.g. muitos postos na região sudeste e poucos na região norte), considerou-se a densidade espacial de postos fluviométricos para evitar análise tendenciosa. Ao considerar que a densidade de postos fluviométricos dentro da área de estudo é desigual, a métrica foi adaptada para considerar essas diferenças, melhorando a representatividade do coeficiente de correlação. Para tanto, assume-se que a densidade de postos em uma determinada região é dada por:

$$a = \frac{A}{n} \quad (10)$$

onde a é a densidade de postos por área, A [km²] é a área da região entorno ao posto analisado e n é o número de postos na área. Nesse estudo foi utilizado uma área de 500 km x 500 km.

Assim, a densidade de postos serve como ponderação para o cálculo do coeficiente, resultando na equação 11.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n a_i (X_i - \bar{X}_i)(Y_i - \bar{Y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i (X_i - \bar{X}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n a_i (Y_i - \bar{Y}_i)^2}} \quad (11)$$

onde r é o coeficiente de correlação; i é o ponto em que está sendo calculado que varia de 1 a n, sendo n o número total de pontos analisados; \bar{X} e \bar{Y} são as médias das observações.

5 RESULTADOS

Os resultados deste estudo são apresentados em três tópicos principais: 5.1) Análise da acurácia de índices hidrológicos estimados a partir de vazões obtidas por modelagem hidrológica; 5.2) Análise dos índices hidrológicos e 5.3) Desenvolvimento da base de dados dos índices hidrológicos para os rios América do Sul. Os tópicos serão discutidos nos itens a seguir. Alguns rios não apresentaram valores de alguns índices hidrológicos, pois no cálculo dos índices as séries de vazões podiam não cumprir alguns requisitos, como por exemplo no índice k que em seu cálculo foram selecionadas vazões abaixo da Q_{90} e com 5 dias consecutivos de recessão.

Na Figura 9 a seguir temos exemplos de hidrogramas de vazões estimadas por modelagem hidrológica de rios da América do Sul (as séries de vazões foram apresentadas no item 4.1 deste trabalho), para que possam ser usados como ferramenta para compreender o comportamento dos rios em relação a alguns índices hidrológicos.

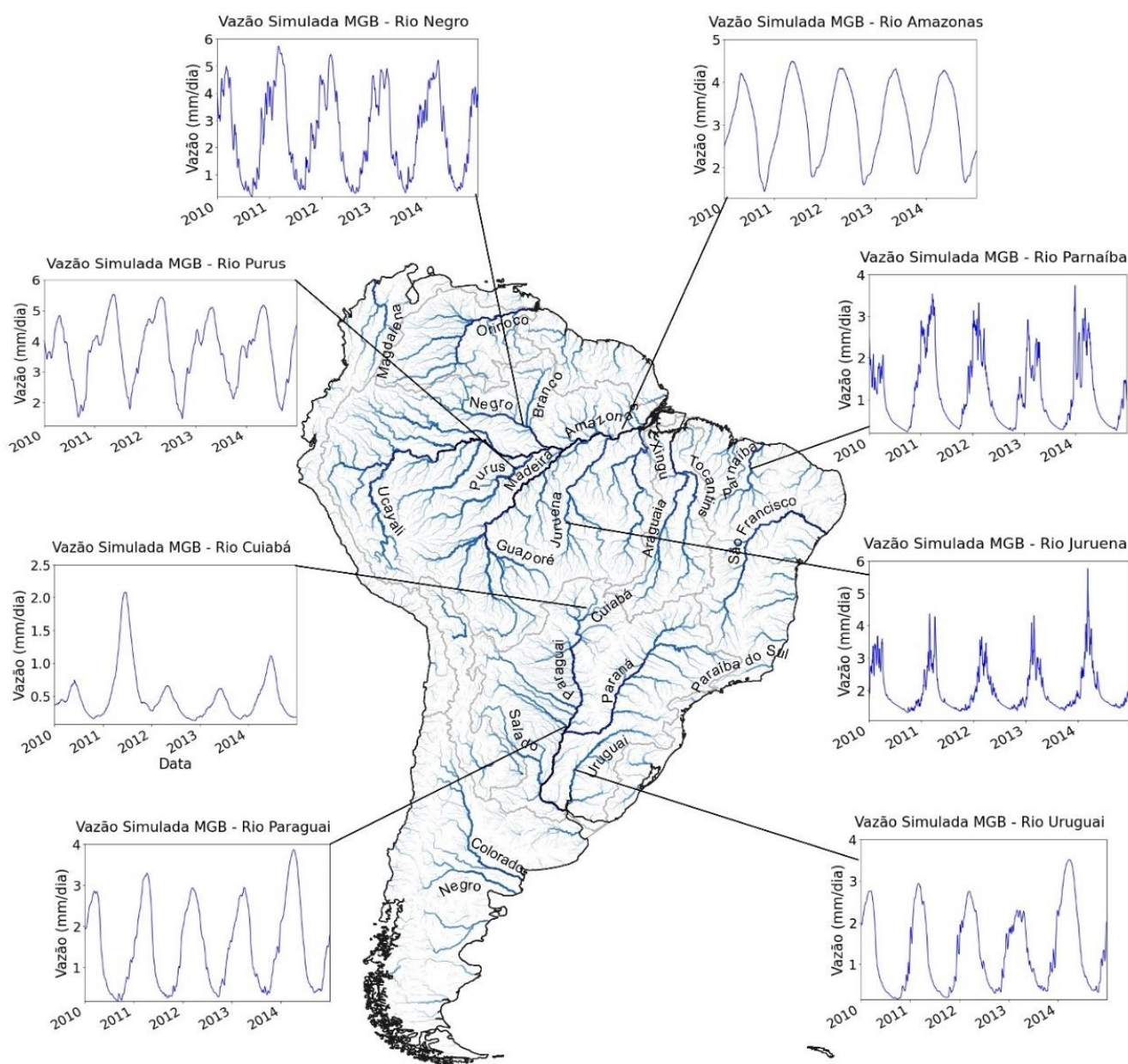


Figura 9. Exemplos de hidrogramas de vazões estimadas por modelagem hidrológica de rios da América do Sul.

5.1 ANÁLISE DA ACURÁCIA DOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS

Como resultado da análise da acurácia índices hidrológicos obtidos das vazões simuladas, foram gerados mapas de alguns índices dos grupos G2 e G4, que foram selecionados por representarem resultados mais significativos para discussão. Nos mapas estão apresentados os índices hidrológicos para as vazões simuladas dos trechos de rios e para as vazões observadas dos postos fluviométricos. Foi calculado o erro absoluto (EA), onde a unidade do erro é a mesma da assinatura e o valor é em módulo, para os pontos analisados que serão apresentados em mapas com a espacialização dos erros. Estes mapas serão apresentados a seguir.

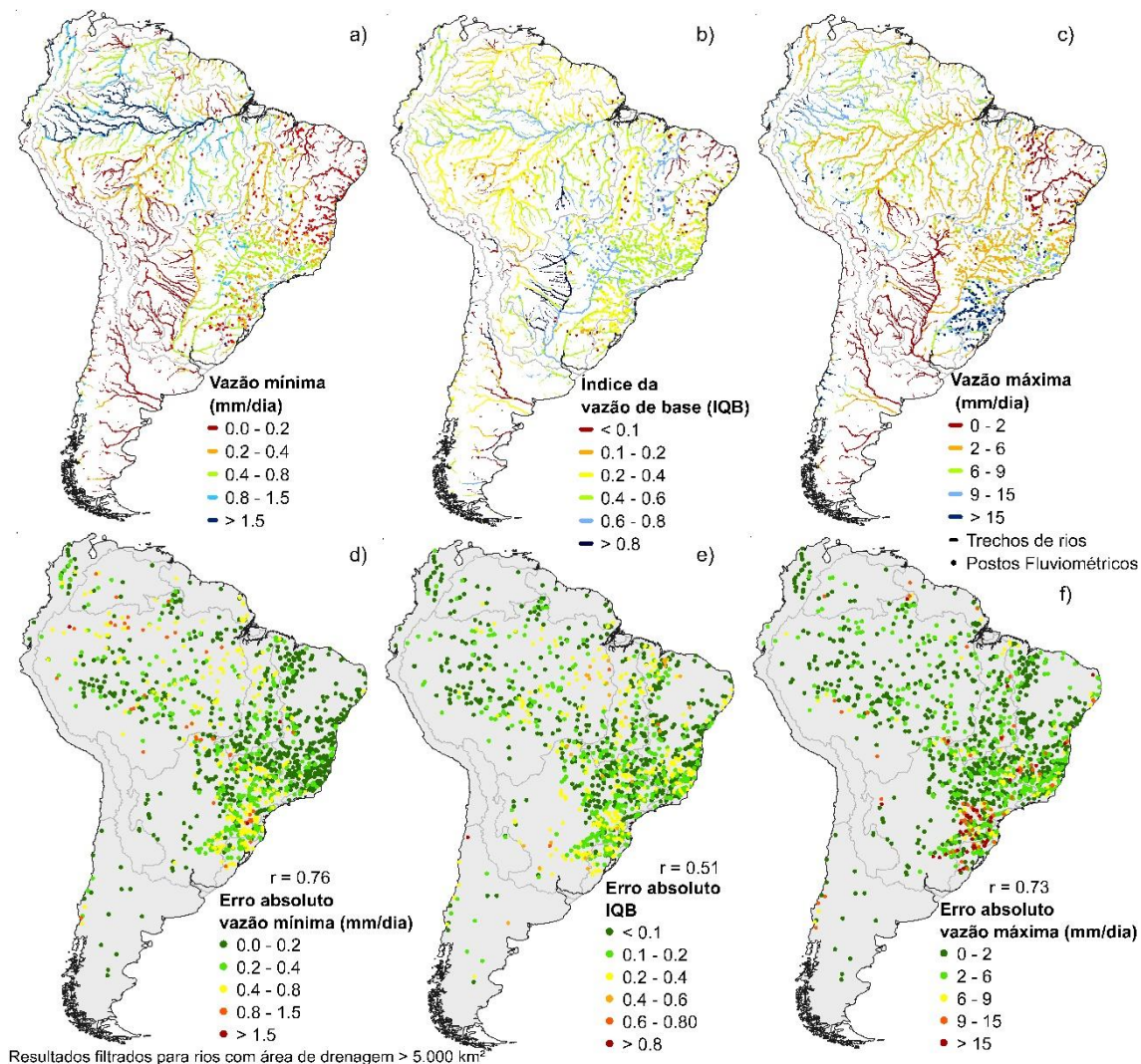


Figura 10. Resultado do cálculo de alguns índices hidrológicos do grupo G2, e seus respectivos erros absolutos (EA).

Para o índice de vazão mínima, ilustrado na Figura 10a, temos que a correlação é de $r = 0,76$ e tem-se uma semelhança desse índice calculado nos trechos de rios e nos postos fluviométricos, com ênfase nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil. A espacialização do erro EA na Figura 10d mostra que temos, em destaque, erros de maior magnitude nas regiões do Rio Amazonas e na região Sul do Brasil, com erros que variam entre 0,4 e 1,5 mm/dia. A região do Rio Amazonas com maior magnitude dos erros está localizada na região climática equatorial Af (de acordo com

a figura de classificação climática Figura 6a). A região do Sul do Brasil está localizada em região climática subtropical úmida Cfa.

Na Figura 10b para o índice IQB obtivemos uma correlação $r = 0,51$ e uma semelhança desse índice calculado nos trechos de rios e nos postos fluviométricos, com exceção de algumas regiões como na dos rios Tocantins-Araguaia e Xingu, o mapa da distribuição de erro (Figura 10d) nos permite visualizar que a maioria dos pontos apresenta erro absoluto de menos de 0,2.

Para o índice de vazão máxima, ilustrado na Figura 10c, obtivemos uma correlação $r = 0,73$ e uma semelhança desse índice calculado nos trechos de rios e nos postos fluviométricos. Na espacialização do erro EA deste índice, ilustrado na Figura 10f, destacamos a região Sul do Brasil com concentração de erros de maior magnitude.

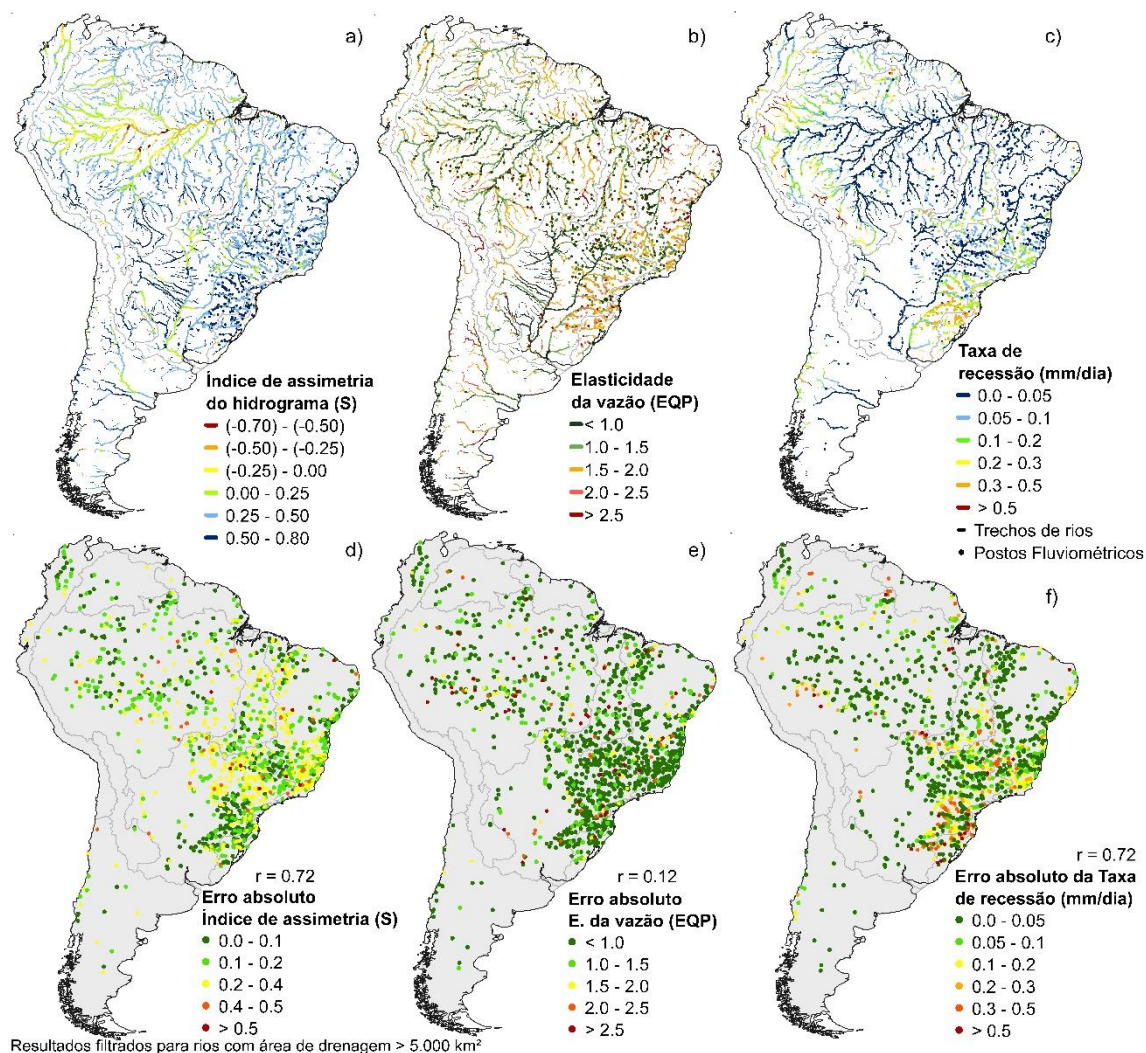


Figura 11. Resultado do cálculo de alguns índices hidrológicos do grupo G4, e seus respectivos erros absolutos (EA).

Na Figura 11a temos o índice S, onde obtivemos uma correlação $r = 0,72$ e uma semelhança desse índice calculado nos trechos de rios e nos postos fluviométricos, principalmente na região da bacia Amazônica e na região Sul do Brasil. Algumas regiões apresentaram maior magnitude

do erro EA, como a do sudeste do Brasil (Figura 11d). Esta região não possui muitas áreas alagadas (Figura 6c). Em geral, nas regiões com grandes áreas alagadas este índice obteve erros absolutos de menor magnitude, com exceção de algumas regiões de planícies inundáveis do Pantanal.

Para o índice elasticidade da vazão (EQP), ilustrado na Figura 11b, obtivemos uma correlação baixa de $r = 0,12$ e uma menor semelhança desse índice calculado nos trechos de rios e nos postos fluviométricos na maioria das regiões da América do Sul. Na distribuição espacial do erro temos que na maioria dos pontos a magnitude do erro absoluto foi menor que 1,0. Porém, em pontos dispersos o erro absoluto foi alto, com valores que variam de 2,0 a maiores que 2,5 (Figura 11e).

No índice da taxa de recessão, ilustrado na Figura 11c, obtivemos uma boa correlação $r = 0,72$ e uma boa semelhança desse índice calculado nos trechos de rios, principalmente na região da bacia Amazônica. Na análise dos erros absolutos temos que a região Sul e Sudeste do Brasil concentram a maioria dos pontos com erros de maior magnitude.

Em geral os erros absolutos de maior magnitude dos índices hidrológicos analisados se concentraram nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, que se localizam em regiões climáticas subtropical úmidas Cfa (Figura 6a). Estas regiões também são as que têm a maior densidade de postos fluviométricos utilizados para esta análise.

5.1.1 Visão geral da acurácia

Para termos uma visão geral da acurácia dos índices calculados a partir das vazões simuladas, obtivemos os boxplots das medianas, com valor em módulo, dos erros relativos (ER) em relação aos grupos em que os índices hidrológicos foram categorizados G1, G2, G3 e G4, apresentados na Figura 12.

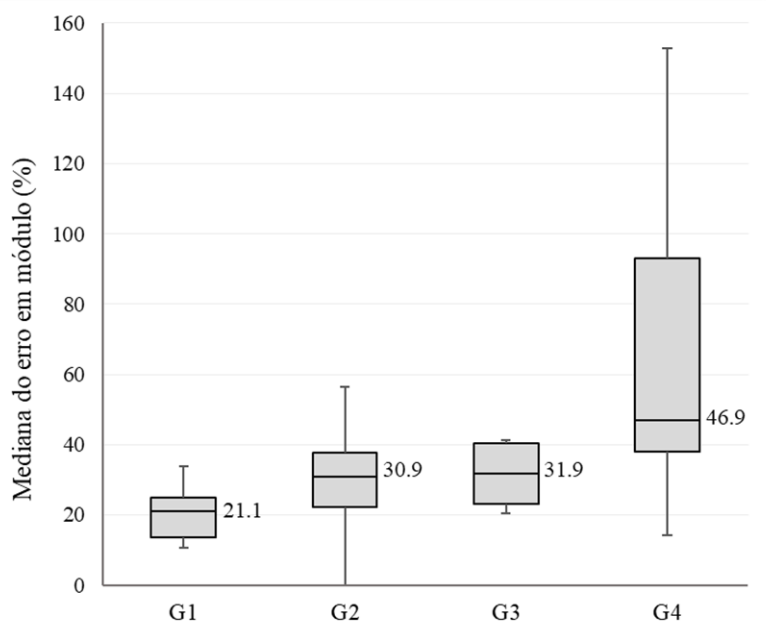


Figura 12. Boxplots das medianas dos erros com valor em módulo dos índices hidrológicos dos grupos.

Nesta análise por grupos, temos que o grupo G4 obteve a maior mediana de erros e o grupo G1 a menor. Isso pode significar que a modelagem hidrológica utilizada, para a obtenção das séries

de vazões que os índices foram calculados, consegue representar com menor incerteza os índices de magnitude das vazões médias (G1). Na representação dos índices do G4, de variabilidade das vazões no tempo, temos uma maior incerteza em relação aos outros grupos.

No Apêndice B está localizada a Tabela 8 que mostra a mediana do erro relativo (ER) em porcentagem, para 56 índices hidrológicos analisados. A média dos valores das medianas do ER dos 56 índices é de 33,2%.

A Tabela 4 apresenta a correlação e a mediana do erro relativo de alguns dos índices hidrológicos analisados neste trabalho. Nos valores de correlação encontrados, que variam de 0,89 a 0,04, temos uma mediana de 0,73, que corresponde a uma boa correlação positiva. Para a mediana do erro relativo temos valores que variam de 5,5 a 96,70%, com mediana de 34,10%.

Tabela 4. Correlação calculada de alguns dos índices hidrológicos.

Índice hidrológico	Mediana do erro relativo - ER (%)	Correlação
Vazão média	24,34	0,89
Coeficiente de Escoamento (RQP)	33,88	0,77
Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)	36,15	0,04
Vazão máxima de referência Q ₅	27,37	0,83
Vazão mínima de referência Q ₉₅	49,29	0,83
Vazão mínima de 1 dia	39,50	0,76
Coeficiente de variação da vazão mínima de 1 dia	34,10	0,20
Vazão máxima de 1 dia	17,90	0,73
Coeficiente de variação da vazão máxima de 1 dia	39,70	0,77
Taxa de ascensão	14,24	0,75
Taxa de recessão	22,15	0,72
Índice de assimetria do hidrograma (s)	96,70	0,72
Índice de vazão de base (IQB)	56,32	0,51
Elasticidade da vazão (EQP)	43,92	0,12
Vazão máxima de referência normalizada Q10/Q50	5,50	0,23
Mediana	34,10	0,73

O índice de assimetria do hidrograma (s) apresenta um ER alto, de 96,70% e ao mesmo tempo uma correlação alta, de 0,72. Isto pode ser um indicativo de que a modelagem hidrológica utilizada está acertando na variação do índice e errando em sua magnitude. O contrário pode ser visto nos índices SFDC, Coeficiente de variação da vazão mínima de 1 dia e Q10/Q50, onde possuem mediana do ER baixa e correlação baixa.

A Tabela 5 apresenta a mediana do erro relativo (ER) de índices hidrológicos em módulo (%) para bacias hidrográficas da América do Sul. A Figura 13 ilustra as bacias hidrográficas utilizadas para esta análise.



Figura 13. Bacias hidrográficas da América do Sul.

Na Tabela 5 temos valores variados da mediana do ER para bacias da América do Sul. Destacamos os valores baixos, menores que 10%, do ER para o índice de Vazão média na bacia do Rio Negro (Argentina). Valores baixos do ER para o índice de vazão mínima de 1 dia nas bacias do Atlântico Leste, Atlântico Nordeste Oriental, Parnaíba e Colorado. Para o índice de Vazão máxima de referência Q_5 na bacia do Rio Magdalena. Destacamos os valores baixos para o índice de Vazão máxima de 1 dia para as bacias do Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, São Francisco, Colorado e Magdalena. Para o índice de Taxa de ascensão nas bacias Amazônica, Atlântico Nordeste Ocidental, Parnaíba, São Francisco, Colorado e Negro (Argentina). Destacamos os valores baixos para o índice de Taxa de recessão para as bacias do Atlântico Nordeste Ocidental e Colorado. E valores baixos para o índice de Vazão máxima de referência normalizada Q_{10}/Q_{50} nas bacias Amazônica, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Sudeste, Parnaíba, São Francisco, Tocantins-Araguaia, Magdalena, Orinoco e Prata.

Obtivemos a maior mediana de erro relativo para o índice de vazão média na bacia do Rio Colorado (82,60%). Para o índice RQP a maior mediana do ER está na bacia do Rio Negro. Para os índices de RQP, S, Vazão máxima de referência Q_5 e Vazão mínima de referência Q_{95} temos a maior mediana do ER no Rio Colorado.

Tabela 5. Mediana do erro relativo (%) dos índices hidrológicos para bacias hidrográficas da América do Sul.

Índice hidrológico	Mediana do erro relativo de cada índice hidrológico em módulo (%)						
	Amazônica	Atlântico Leste	Atlântico Nordeste Ocidental	Atlântico Nordeste Oriental	Atlântico Sudeste	Atlântico Sul	Parnaíba
Vazão média	33.97	40.07	16.91	66.67	15.66	23.35	13.94
Coefficiente de Escoamento (RQP)	38.53	47.26	18.42	72.76	27.79	31.91	14.22
Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)	34.59	37.64	40.29	101.98	22.94	73.01	17.58
Vazão mínima de referência Q95	48.88	56.63	50.10	81.59	25.30	77.77	24.46
Vazão máxima de referência Q5	34.99	42.68	24.28	73.36	18.66	32.97	21.12
Vazão mínima de 1 dia	52.17	9.13	15.70	0.44	22.79	77.13	3.06
Coefficiente de variação da vazão mínima de 1 dia	28.58	50.00	41.01	213.59	32.20	42.05	18.23
Vazão máxima de 1 dia	14.31	18.81	5.73	44.13	41.82	49.80	8.27
Coefficiente de variação da vazão máxima de 1 dia	24.39	94.33	143.94	245.06	32.38	60.41	70.65
Taxa de ascensão	8.69	13.11	4.84	46.64	18.74	89.98	8.27
Taxa de recessão	11.60	17.26	4.71	57.00	45.78	73.99	15.75
Índice de assimetria do hidrograma (s)	84.93	88.02	118.60	41.82	127.36	54.27	77.96
Índice de vazão de base (IQB)	49.39	47.44	72.87	11.77	58.49	86.47	24.38
Elasticidade da vazão (EQP)	61.43	51.62	48.22	55.31	28.86	35.35	63.75
Vazão máxima de referência normalizada Q10/Q50	4.34	14.55	10.04	53.73	3.24	12.95	3.49

Continuação da Tabela 5. Mediana do erro relativo (%) dos índices hidrológicos para bacias hidrográficas da América do Sul.

Índice hidrológico	Mediana do erro relativo de cada índice hidrológico em módulo (%)						
	São Francisco	Tocantins-Araguaia	Colorado	Magdalena	Negro (Argentina)	Orinoco	Prata
Vazão média	20.64	21.00	82.60	17.55	6.83	45.53	20.17
Coefficiente de Escoamento (RQP)	36.92	33.54	74.90	17.95	184.17	36.24	32.35
Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)	34.41	49.29	30.97	13.71	44.16	45.42	37.59
Vazão mínima de referência Q95	24.59	36.82	98.19	29.37	20.18	69.77	62.18
Vazão máxima de referência Q5	29.58	18.70	164.41	9.87	30.40	43.73	20.53
Vazão mínima de 1 dia	16.69	37.09	1.30	37.78	25.58	63.19	61.15
Coefficiente de variação da vazão mínima de 1 dia	35.55	25.75	188.28	14.50	42.62	35.92	34.91
Vazão máxima de 1 dia	6.21	19.76	1.57	5.26	12.28	20.64	22.93
Coefficiente de variação da vazão máxima de 1 dia	58.63	29.76	47.56	20.59	23.59	14.52	42.37
Taxa de ascensão	6.32	16.95	0.06	10.58	3.58	14.21	19.62
Taxa de recessão	10.97	25.61	0.18	23.27	10.33	30.41	28.46
Índice de assimetria do hidrograma (s)	114.30	100.70	143.29	68.61	62.59	62.42	101.11
Índice de vazão de base (IQB)	42.93	54.69	45.98	34.46	60.72	26.72	68.07
Elasticidade da vazão (EQP)	33.79	39.18	46.42	32.01	111.73	66.16	43.80
Vazão máxima de referência normalizada Q10/Q50	3.83	6.02	38.52	1.49	14.39	1.48	5.89

5.2 ÍNDICES HIDROLÓGICOS

As análises dos resultados para índices hidrológicos, separados por grupos G1, G2, G3 e G4, serão apresentadas nos tópicos a seguir. Foram selecionados apenas alguns índices para a discussão e análise, todos os outros índices se encontram no Apêndice A deste relatório.

5.2.1 Magnitude das vazões médias (G1)

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de magnitude das vazões médias estão apresentados na Figura 14. Os demais resultados deste grupo encontram-se disponíveis no Apêndice A.

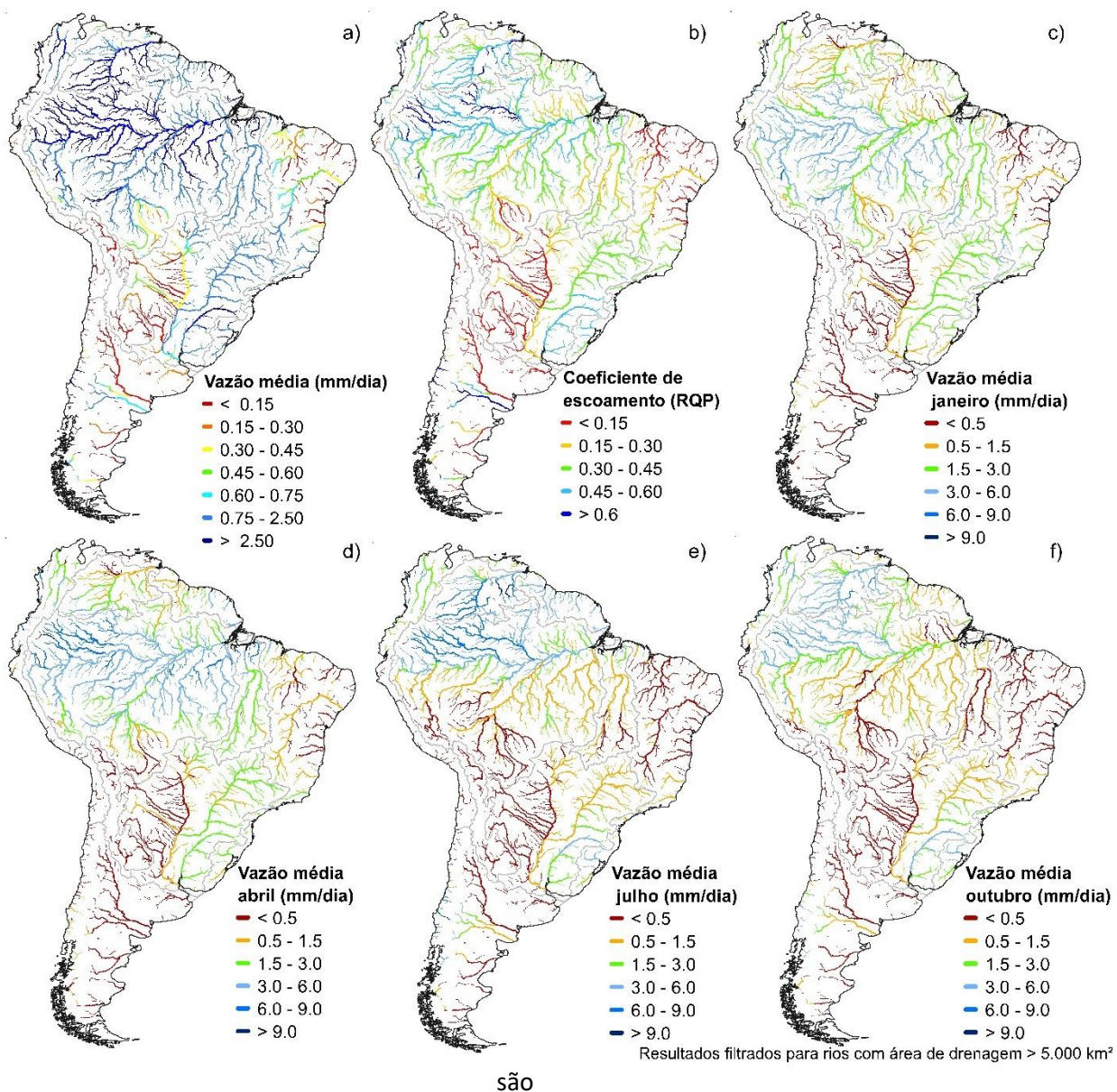


Figura 14. Índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões médias (G1).

Os resultados da vazão média podem ser visualizados na Figura 14a, onde em geral, as maiores vazões médias são encontradas nas cabeceiras (devido a vazão ser obtida em mm considerando assim a área de drenagem de cada trecho de Rio) dos afluentes do Rio Amazonas e uma das menores na região nordeste, no Rio Parnaíba. Este índice pode estar diretamente relacionado ao índice pluviométrico, pois a região amazônica é uma das mais chuvosas da América do Sul e o nordeste do Brasil sendo uma das regiões menos chuvosas, como ilustrado no mapa de precipitação da Figura 6b. Na região sul da Cordilheira dos Andes temos uma transição entre rios com vazões médias baixas ($< 0,15\text{mm}$) e altas ($> 2,5\text{ mm}$), isso ocorre pois temos uma região com alto índice pluviométrico na região mais ao sul, ilustrada na Figura 6b, que fica ao lado do deserto da Patagônia, que possui um baixo índice pluviométrico.

O coeficiente de escoamento (RQP) é apresentado na Figura 14b. Em geral, nas regiões mais úmidas (como indica o mapa climático da Figura 6a) obtemos maiores valores deste índice e em regiões mais áridas obtemos valores menores do RQP. Temos o exemplo do Rio Negro, com RQP $> 0,6$ e está localizado em uma região de clima úmido, e do Rio Parnaíba, com RQP $< 0,15$, que está localizado numa região mais árida. Provavelmente a água que entra através chuva no sistema hídrico do Rio Parnaíba tem uma maior porcentagem sendo evaporada do que na região do Rio Negro. No Rio São Francisco temos que o RQP diminui de montante para jusante, sendo maior em sua cabeceira do que em sua foz, isso pode ser devido a transição da zona climática em que o rio se localiza, sua cabeceira está localizada numa zona de clima Aw e a montante, se aproximando da foz, entra no clima semiárido BSh, de acordo com o mapa da classificação climática da Figura 6a. O Rio Negro (Argentina) possui um alto RQP ($>0,6$) e está localizado próximo ao Rio Colorado (Argentina) que possui um baixo RQP ($< 0,15$), os rios são próximos, porém o RQP muda drasticamente, uma provável explicação para isso pode ser encontrada nos mapas de precipitação média anual (Figura 6b) e no mapa climático (Figura 6a) onde a cabeceira do Rio Negro (Argentina) está localizada em uma zona com índices pluviométricos (3000-3400 mm) maiores e os trechos de rio a jusante em regiões com clima menos árido do que toda a região do Rio Colorado (Argentina) (com índice pluviométrico de 0-400 mm).

Nas vazões médias mensais apresentadas na Figura 14c, d, e e f, as vazões têm magnitudes diferentes ao longo dos meses e variam de acordo com o regime das chuvas mensais da região em que se encontram. No estudo de Almeida et al. (2015) são apresentados mapas com os regimes de chuvas mensais para todos os estados do Brasil, e comparando-os com os resultados das vazões médias mensais esse padrão da variação das vazões com a variação da chuva pode ser observado. Por exemplo, na região do Rio Branco (estado de Roraima), o mês de maior índice pluviométrico é julho e o de menor é janeiro, que correspondem aos meses de maior vazão média mensal e menor vazão média mensal, respectivamente. Nas regiões do Rio Parnaíba e do Rio Paraguai não há representação da diferença nas vazões ao decorrer dos meses pois os índices pluviométricos dessas regiões são baixos em relação as outras regiões, e em suas épocas mais chuvosas não há aumento nas vazões que sejam suficientes para serem representados na escala escolhida dos mapas apresentados na Figura 14.

5.2.2 Magnitude das vazões extremas (G2)

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões extremas estão apresentados na Figura 15. Os demais resultados deste grupo encontram-se disponíveis no Apêndice A.

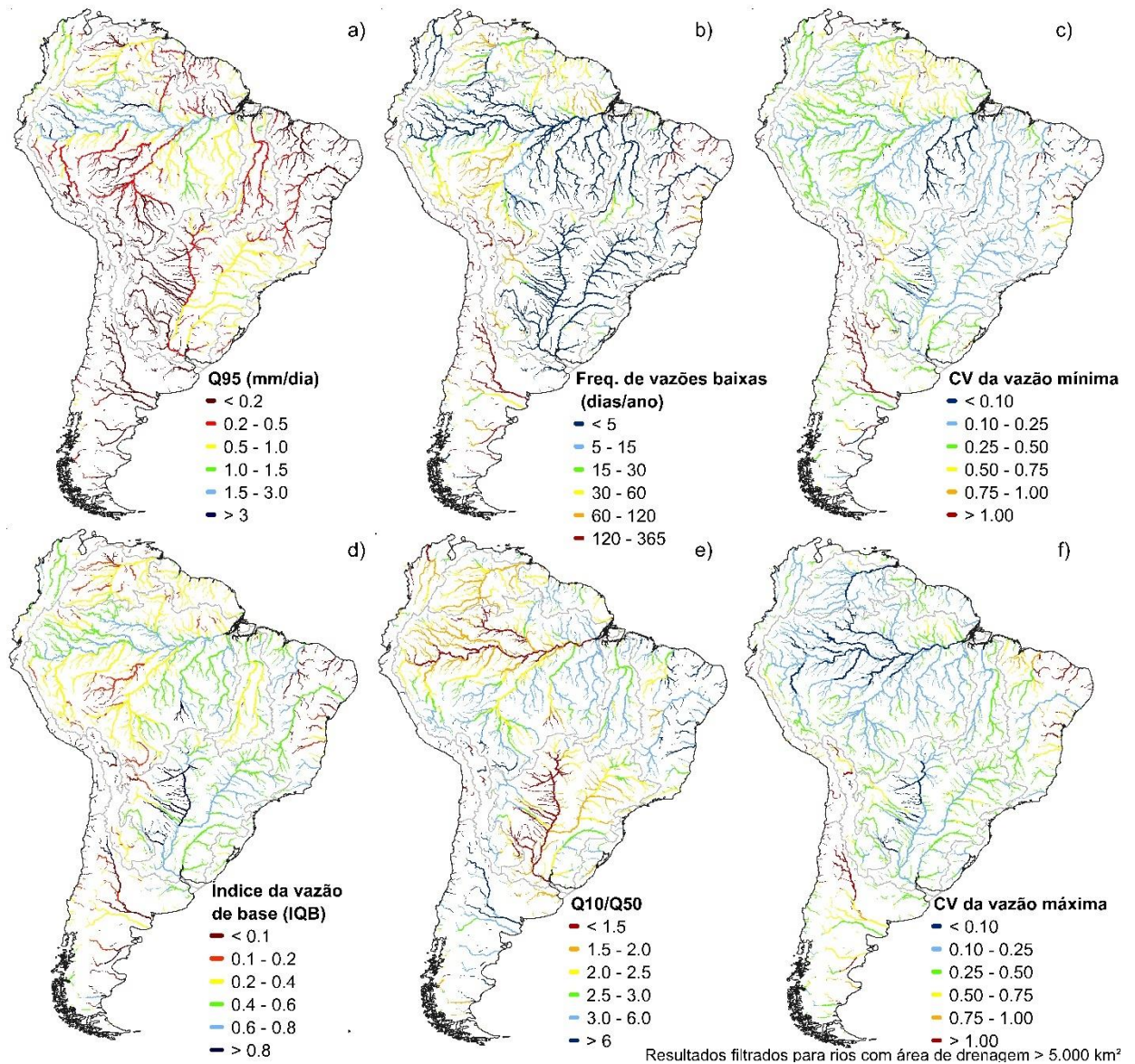


Figura 15. Índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões extremas (G2).

Na análise dos resultados obtidos da vazão de referência mínima Q_{95} (Figura 15) este índice pode estar relacionado ao índice pluviométrico e zona climática da região. Quanto menor o índice pluviométrico e a região onde a bacia que o rio se localiza é mais árida, menor é a Q_{95} .

Para a frequência de vazões baixas, representada na Figura 15b, temos que este índice indica quantas vezes no ano ocorre, em média, vazões baixas (menores que 0,2 vezes abaixo da vazão média). Rios com valores baixos deste índice podem indicar que possuem vazões regularizadas, ou que a diferença da vazão média para as vazões mais baixas registradas no ano seja numa proporção maior que 20%. Valores baixos deste índice estão diretamente relacionados, pela definição do cálculo deste índice, com valores baixos do índice da inclinação da curva de permanência, que será apresentado na Figura 17d.

O coeficiente de variação da vazão mínima (Figura 15c) representa o quanto a menor vazão média de 1 dia pode variar ao longo dos anos, quanto maior este índice provavelmente será mais difícil de estabelecer um panorama de situação de escassez hídrica. O Rio Juruena tem um índice baixo ($< 0,10$) e em seu hidrograma, na Figura 9, há uma maior estabilidade das vazões mínimas ao longo dos anos. O Rio Uruguai possui um índice maior (entre 0,25 e 0,50) e em seu hidrograma, na Figura 9, temos uma maior variação da vazão mínima ao longo dos anos.

A Figura 15d mostra a variabilidade espacial do Índice de Vazão de Base (IQB). Valores mais elevados do IQB podem indicar rios com alta contribuição da vazão de base em suas vazões. Valores altos do IQB são encontrados no Rio Juruena, que se localiza em uma região de alta capacidade hídrica, de acordo com o mapa de potencialidade hídrica da Figura 6d. Analisando os resultados, este índice tem um comportamento inverso ao índice Q10/Q50, quanto menor a Q10/Q50, maior o IQB. Este índice também é negativamente correlacionado com o índice de inclinação da curva de permanência de vazões.

Na análise do índice Q10/Q50 (Figura 15) os locais onde a vazão de cheia é expressiva se comparada com a vazão mediana, como por exemplo na região nordeste do Brasil. No Rio Amazonas, Rio Negro e Rio Paraguai temos que a Q10 é cerca de 1,5x maior que a Q50, o que pode indicar que as vazões de cheias não são muito destoantes das vazões medianas. Na região sul do Brasil temos rios com valores altos da Q10/Q50 (entre 3,0 e 6,0), o que indicam que as vazões máximas são cerca de 3 a 6 vezes maiores que a mediana das vazões.

O coeficiente de variação da vazão máxima (Figura 15f) apresenta um comportamento inverso do índice Q10/Q50, representando provavelmente maior incerteza em previsão de vazões de cheias. No Rio Amazonas temos um índice baixo ($< 0,10$) e em seu hidrograma, na Figura 9, há uma maior estabilidade das vazões altas, o comportamento inverso é obtido no hidrograma do Rio Parnaíba.

5.2.3 Sazonalidade de extremos (G3)

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de sazonalidade de extremos estão apresentados na Figura 16. Os demais resultados deste grupo encontram-se disponíveis no Apêndice A.

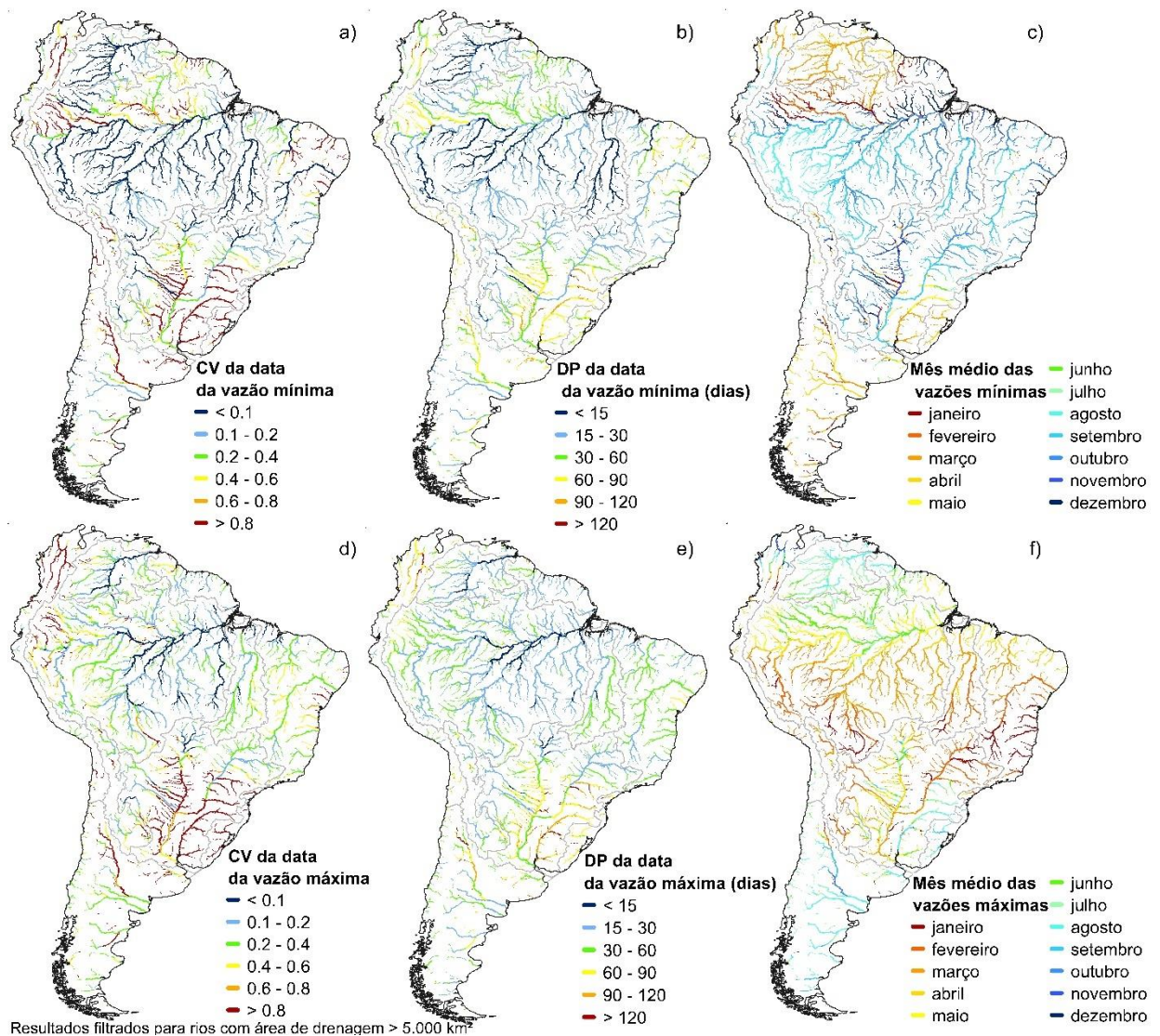


Figura 16. Índices hidrológicos do grupo sazonalidade de extremos (G3).

Neste grupo de índices obtemos o coeficiente de variação e o desvio padrão das datas em que ocorrem com mais frequência a vazão mínima (Figura 16a e 19d) a vazão máxima (Figura 16b e 19e). Estes índices indicam a previsibilidade das datas de ocorrência das vazões máximas e mínimas. Quanto maior o desvio padrão e o coeficiente de variação nesses índices, mais imprevisível se torna a data das vazões mínimas e máximas. Na Figura 16c e 19f estão apresentados os mapas dos meses em que ocorrem com mais frequência as vazões mínimas/máximas.

Na Figura 16 o Rio Uruguai e os afluentes dos rios Paraguai e Paraná têm valores altos do coeficiente de variação e do desvio padrão tanto para as datas de vazões mínimas quanto para as máximas. Em trechos do Rio Uruguai as vazões máximas e mínimas podem ocorrer com uma diferença de até 3 meses, ou seja, pode acontecer que em alguns anos a vazão mínima ocorra em abril e em outros anos ocorra em junho. O comportamento inverso pode ser observado no Rio Amazonas, onde provavelmente suas vazões mínimas e máximas ocorrem no mesmo mês ao longo dos anos.

5.2.4 Variabilidade das vazões no tempo (G4)

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de variabilidades das vazões no tempo estão apresentados na Figura 17. Os demais resultados deste grupo encontram-se disponíveis no Apêndice A.

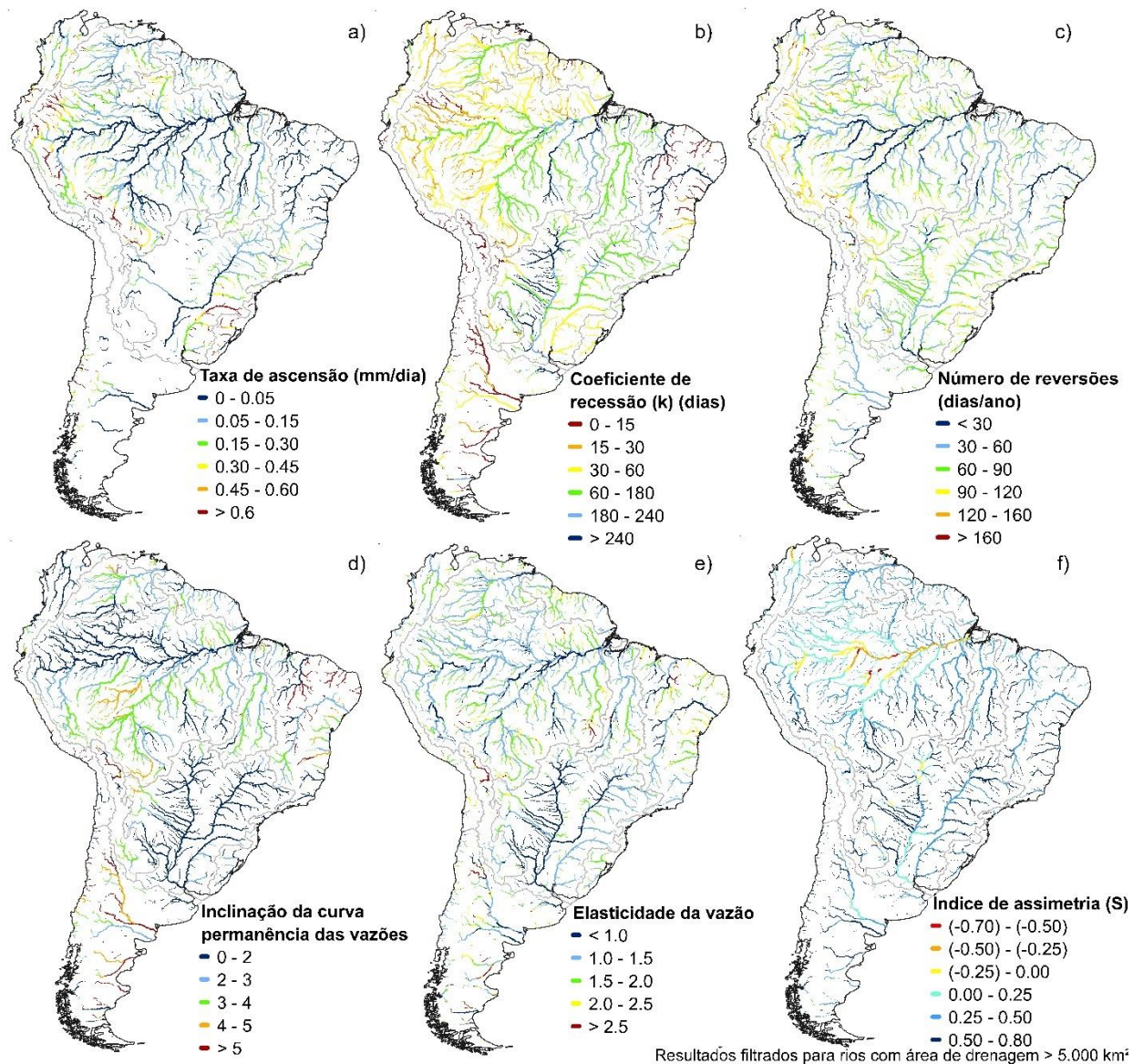


Figura 17. Índices hidrológicos do grupo de variabilidade das vazões no tempo (G4).

Nos índices de taxas de ascensão (Figura 17a) temos que a maioria dos rios representados possuem menos variação quanto as mudanças diárias no aumento das vazões. Rios que podem ser destacados com maiores variações são o Rio Uruguai (principalmente em sua cabeceira) e o Rio Branco, no estado de Roraima.

Na Figura 17b são apresentados os resultados do índice do coeficiente de recessão (k). Comparando o índice k com a Figura 6d, que ilustra as regiões de potencialidade hídrica, algumas regiões com o valor de k alto possuem potencialidade hídrica alta, como o Rio Juruena e alguns afluentes do Rio São Francisco. Alguns afluentes do Rio Juruena possuem o índice k baixo (entre

0 a 15 dias) e um IQB baixo ($< 0,1$) e localizam-se em região de baixa potencialidade hídrica. Valores altos deste índice podem indicar que os rios possuem esvaziamento lento do aquífero de contribuição das vazões. Este índice tem uma correlação positiva com o índice IQB, que foi apresentado na Figura 15d.

O índice do número de reversões, apresentado na Figura 17c, representa uma mudança no de acréscimo ou decréscimo das vazões dos rios. Se compararmos os hidrogramas (Figura 9) do Rio Amazonas, que obteve valores baixos deste índice (< 30 dias/ano), com o do Rio Uruguai, que obteve valores mais altos (entre 60 e 90 dias/ano), no hidrograma do Rio Uruguai temos mais variações abruptas das vazões em relação ao hidrograma do Rio Amazonas.

Valores altos do índice inclinação da curva de permanência de vazões (Figura 17d) podem se relacionar com valores baixos do índice IQB, indicando regiões hidrográficas de resposta rápida, como no Rio Purus e no Rio Gurgéia (afluente do Rio Parnaíba). Essa relação também foi discutida por Addor et al. (2017). Este índice também pode se correlacionar negativamente com o índice Q10/Q50, em muitos rios como o Rio Amazonas, Rio Uruguai, Rio Paraguai, Rio Paraná, Rio Negro, entre outros. Os resultados para este índice foram semelhantes aos apresentados por Chagas et al. (2020).

No índice de elasticidade da vazão (Figura 17e) temos que quanto maior o valor deste índice, uma pequena variação da chuva gera uma grande variação na vazão. Podemos destacar o Rio Xingu e o Rio Guaporé, com o valor do índice de elasticidade alto em suas cabeceiras. Este índice pode possuir uma correlação positiva com o índice da inclinação da curva de permanência de vazões, como nos rios Uruguai, Rio Paraguai, Rio Paraná e Rio Amazonas. Os resultados para este índice foram semelhantes aos apresentados por Chagas et al. (2020) e David et al. (2019), onde este índice foi obtido com séries de vazões observadas.

Na Figura 17f são apresentados os resultados do índice de assimetria do hidrograma. Quanto menor o valor desse índice (próximos e abaixo de 0), maior o indicativo de ser uma região com planícies inundáveis. Nos rios Amazonas, Rio Purus e Rio Cuiabá temos índices de assimetria do hidrograma menores que 0 e em seus hidrogramas (Figura 9) temos a assimetria negativa, o que é um indicativo de regiões com planícies inundáveis. Na Figura 6c temos um mapa que indica que esses rios se localizam nessas regiões. Os resultados desse índice foram similares aos apresentados por Fleischmann et al. (2016), que obtiveram o S através de séries de vazões observadas.

Na figura Figura 18 está apresentado o índice de Autocorrelação (Acorr). Através da figura temos em destaque efeitos de clima mais ou menos sazonal na região dos rios. Temos o efeito destacado da extensão do rio, onde rios extensos tendem a ter um comportamento com autocorrelação maior do que rios curtos. Além de destacar áreas inundáveis, onde por exemplo, o Rio Araguaia passa de verde para azul logo após a grande extensão inundável. O sul da Amazônia, em geral, é sazonal, mas podemos destacar como Rio Purus e Rio Juruá ficam ainda mais correlacionados por causa da planície de inundação, em comparação com o Rio Xingu.

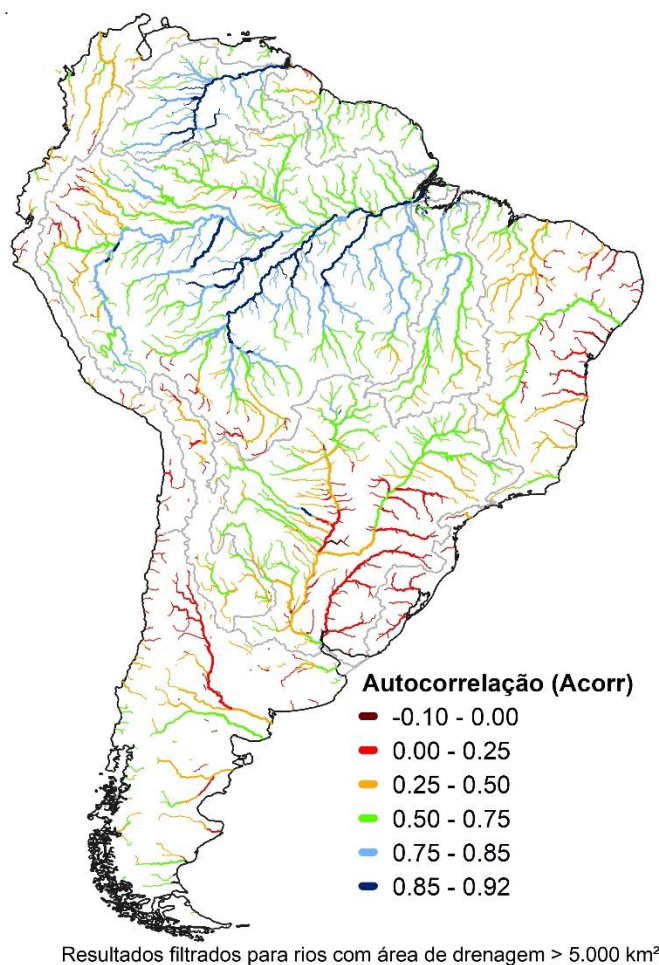


Figura 18. Índice hidrológico de Autocorrelação (Acorr).

5.3 BASE DE DADOS

Para a base de dados foi elaborado um arquivo ESRI *shapefile* com **trechos de rios discretizados na modelagem hidrológica realizada com o MGB-SA**, de comprimento médio de 15 km, da América do Sul e seus respectivos **73 índices hidrológicos** como seus atributos. Esta base de dados pode nos dar uma visão espacial das características do regime de vazões dos rios. A base de dados se encontra disponível para download (arquivo “IPH-ANA-HGE-SR-B2”) no portal do grupo de pesquisa Hidrologia de Grande Escala (HGE) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS, através do link https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos-hydrologic_indices_sa/. O manual de utilização da base de dados está disponibilizado no arquivo “IPH-ANA-HGE-SR-M2”.

As Tabela 6 e Tabela 7 apresentam as descrições dos conteúdos das colunas de características da tabela de atributos do ESRI *shapefile* dos índices hidrológicos dos rios da América do Sul.

Tabela 6. Descrição dos conteúdos das colunas de características da tabela de atributos do ESRI shapefile dos índices hidrológicos dos rios da América do Sul.

Upst_Area_	Área de drenagem do trecho de rio	km ²
Shape_Leng	Comprimento do trecho de rio	km
UC	Minibacia correspondente da discretização da modelagem hidrológica	-
Valores -9999999	Valores de substituição onde não foram obtidos índices hidrológicos	-

Tabela 7. Descrição dos conteúdos das colunas de índices da tabela de atributos do ESRI shapefile dos índices hidrológicos dos rios da América do Sul.

Sigla	Índice Hidrológico	Unidade
Qm	Vazão média diária	mm/dia
RQP	Coefficiente de Escoamento	-
SFDC	Inclinação da curva de permanência das vazões	-
Q95	Vazão mínima de referência Q95	mm/dia
Q5	Vazão máxima de referência Q5	mm/dia
high_q_freq	Frequência de vazões altas	dias/ano
high_q_dur	Duração de vazões altas	dias
low_q_freq	Frequência de vazões baixas	dias/ano
low_q_dur	Duração de vazões baixas	dias
zero_q_freq	Frequência de vazões igual a zero	%
K	Coefficiente de recessão da vazão de base	-
IA	índice de aridez (evapo/precip)	-
S	índice de assimetria do hidrograma	-
IQB	Índice de vazão de base	-
EQP	Elasticidade da vazão	-
Q10_Q50	Vazão máxima de referência Q10 normalizada pela vazão média Q50	-
M_jan, M_fev,..., M_dez	Vazão média diária para cada mês	mm/dia

Sigla	Índice Hidrológico	Unidade
E_1_1, E_1_3,..., E_1_90	Vazão mínima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	mm/dia
E_1_1_D, E_1_3_D,..., E_1_90_D	Desvio padrão da Vazão mínima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	mm/dia
E_1_1_CV, E_1_3_CV,..., E_1_90_CV	Coefficiente de variação da Vazão mínima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	-
E_2_1, E_2_3,..., E_2_90	Vazão máxima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	mm/dia
E_2_1_D, E_2_3_D,..., E_2_90_D	Desvio padrão da Vazão máxima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	mm/dia
E_2_1_CV, E_2_3_CV,..., E_2_90_CV	Coefficiente de variação da Vazão máxima de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias	-
T_1	Data da vazão mínima	data
T_1_D	Desvio padrão da Data da mínima	dia
T_1_CV	Coefficiente de variação da Data da mínima	-
T_2	Data da vazão máxima	data
T_2_D	Desvio padrão da Data da máxima	dia
T_2_CV	Coefficiente de variação da Data da máxima	-
G_1	Taxa de ascensão	mm/dia
G_1_D	Desvio padrão da Taxa de ascensão	mm/dia
G_1_CV	Coefficiente de variação da Taxa de ascensão	-
G_2	Taxa de recessão	mm/dia
G_2_D	Desvio padrão da Taxa de recessão	mm/dia
G_2_CV	Coefficiente de variação da Taxa de recessão	-
G_3	Número de reversões	dias/ano
G_3_D	Desvio padrão do Número de reversões	dia
G_3_CV	Coefficiente de variação do Número de reversões	-
AnoH_Min	Mês de início do ano hidrológico de mínimas	data
AnoH_Max	Mês de início do ano hidrológico de máximas	data
Acorr	Autocorrelação	-

6 CONCLUSÃO

Este relatório apresenta a caracterização do regime natural de vazões dos rios da América do Sul através da análise de índices hidrológicos, calculados a partir de séries de vazões estimadas via modelagem hidrológica. Foi realizada a análise da acurácia desses índices hidrológicos, comparando-os com índices calculados a partir de séries de vazões observadas. Também foi desenvolvida uma base de dados com esses índices hidrológicos.

Os resultados obtidos para a análise dos índices hidrológicos nos permitiram observar padrões de comportamento do regime de vazões dos rios, relacionados como por exemplo a clima e hidrogeologia, além de relações entre os índices, por exemplo o índice de vazão de base (IQB) tem uma correlação negativa ao índice de vazão máxima de referência normalizada Q_{10}/Q_{50} , e como o índice do coeficiente de recessão (k) e o índice IQB se relaciona com as regiões de alta potencialidade hídrica.

Nos resultados obtidos para a acurácia da modelagem hidrológica, foram calculados o erro relativo (ER), erro absoluto (EA) e correlação (r) em 1329 pontos (estações fluviométricas). A mediana da correção de 15 índices hidrológicos analisados obteve o valor de 0,73. Dentre os índices com melhor correlação e menor mediana de erro relativo se destacam a vazão média, com mediana de erro de 24% e correlação $r = 0,89$, a vazão mínima de referência Q_{95} , com mediana de erro de 27% e correlação $r = 0,83$, e o coeficiente de escoamento com mediana de erro de 34% e $r = 0,77$. Para 56 índices hidrológicos analisados a média dos valores das medianas do ER de 56 índices é de 33,2%.

Para a base de dados foi elaborado um arquivo ESRI *shapefile* com trechos de rios, de comprimento médio de 15 km, da América do Sul e seus respectivos 73 índices hidrológicos como seus atributos. Esta base de dados pode nos dar uma visão espacial das características do regime de vazões dos rios. A base de dados está disponível em plataforma *online* de livre acesso.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Addor, N., Newman, A. J., Mizukami, N., and Clark, M. P. *The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies*, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 5293–5313, 2017.
- Addor, N., Nearing, G., Prieto, C., Newman, A. J., Le Vine, N., & Clark, M. P. *A ranking of hydrological signatures based on their predictability in space*. *Water Resources Research*, 54(11), 8792-8812. 2018.
- Akhter, Muhammad Saleem; Shamseldin, Asaad Yahia; Melville, Bruce William. *Investigation of climate change impacts on flow regime in the Lucas Creek catchment using multiple CMIP5 ensembles*. *Urban Water Journal*, v. 16, n. 5, p. 389-401. 2019.
- Almeida, Rafael Alvarenga et al. *Precipitação pluvial média mensal e anual nas regiões político-administrativas do Brasil*. *Engenharia na Agricultura*, v. 23, n. 2, p. 169-175. 2015.
- ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). *Imagens da região hidrográfica do Rio Uruguai*. 2020a. Disponível em: https://www.ana.gov.br/imagens/imagens-divisao-hidrografica/imagens-regiao-hidrografica-uruguai/urug_008-d-rs0365-Rio-uruguai-divisa-sc-rs-zig-koch.png/image_view_fullscreen. Acesso em: jun 2020.
- ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). *Imagens da região hidrográfica do Rio São Francisco*. 2020b. Disponível em: https://www.ana.gov.br/noticias/ana-realiza-audiencia-sobre-manuais-de-contabilidade-e-gestao-de-ativos-da-transposicao-do-sao-francisco/sfrn_074-d-ba0811-Rio-sao-francisco-paulo-afonso-ba-zig-koch.jpg/image_view_fullscreen. Acesso em: jun 2020.
- ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico). *HidroSat – Monitoramento Hidrológico por satélite*. 2020c. Disponível em: <http://hidrosat.ana.gov.br/SaibaMais/Sobre>. Acesso em: 04 jun 2020.
- Armanini, D. G. et al. *Benthic macroinvertebrate flow sensitivity as a tool to assess effects of hydropower related ramping activities in streams in Ontario (Canada)*. *Ecological Indicators*, v. 46, p. 466-476. 2014.
- Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., Miralles, D. G., de Jeu, R. A. M., Sampurno Bruijnzeel, L. A., McVicar, T. R., & Schellekens, J. *Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments*. *Water Resources Research*, 49(12), 7843–7863. 2013. doi:10.1002/2013wr013918.
- Beck, Hylke E. et al. *MSWEP V2 global 3-hourly 0.1 precipitation: methodology and quantitative assessment*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 100, n. 3, p. 473-500, 2019.
- Berner, E.K., Berner, R.A., 2012. *Global Environment. Water, air, and geochemical cycles.*, Second Edi. ed. Princeton University Press, New Jersey.
- Bharati, Luna et al. *Past and future variability in the hydrological regime of the Koshi Basin, Nepal*. *Hydrological Sciences Journal*, v. 61, n. 1, p. 79-93. 2016.

- Biancamaria, Sylvain; Lettenmaier, Dennis P.; Pavelsky, Tamlin M. *The SWOT mission and its capabilities for land hydrology*. In: *Remote sensing and water resources*. Springer, Cham, 2016. p. 117-147. 2016.
- Bierkens, M. F. P., Bell, V. A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L. E., David, C. H., de Roo, A., Döll, P., Drost, N., Famiglietti, J. S., Flörke, M., Gochis, D. J., Houser, P., Hut, R., Keune, J., Kollet, S., Maxwell, R. M., Reager, J. T., Samaniego, L., Sudicky, E., Sutanudjaja, E. H., van de Giesen, N., Winsemius, H., and Wood, E. F.: *Hyper-resolution global hydrological modelling: what is next?*. *Hydrol. Process.*, 29, 310–320, <https://doi.org/10.1002/hyp.10391>, 2015
- Bierkens, M. F. P.: Global hydrology 2015: State, trends, and directions, *Water Resour. Res.*, 51, 4923–4947, <https://doi.org/10.1002/2015wr017173>, 2015.
- Black, A. R. et al. *DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive*. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 15, n. 5, p. 427-446, 2005.
- Bosch, D.D., Arnold, J.G., Allen, P., Lim, K., Shik, Y., 2017. *Temporal variations in baseflow for the Little River Experimental Watershed in South Georgia, USA*. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 10, 110-121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.02.002>.
- Bravo, J. M., Allasia, D., Paz, A. R., Collischonn, W., and Tucci, C. E. M. *Coupled Hydrologic-Hydraulic Modeling of the Upper Paraguay River Basin*. *J. Hydrol. Eng.*, 17, 635–646, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000494](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000494).
- Brockwell, P. J., Brockwell, P. J., Davis, R. A., & Davis, R. A. (2016). *Introduction to time series and forecasting*. Springer. Bunn, Stuart E.; Arthington, Angela H. *Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity*. *Environmental management*, v. 30, n. 4, p. 492-507. 2002.
- Câmara, A. C. F. C. *Análise da vazão máxima autorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB)*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. UFRGS, Porto Alegre - RS. 219 p. 2003.
- Chagas, V. B., Chaffe, P. L., Addor, N., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., Paiva, R. C., & Siqueira, V. A. *CAMELS-BR: Hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil*. <https://doi.org/10.5194/essd-2020-67>. 2020.
- Collischonn, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. Tese de doutorado, IPH-UFRGS. 277p. 2001.
- Collischonn, W.; Allasia, D.; Da Silva, B.C.; Tucci, C.E.M. *The mgb-iph model for large-scale rainfall—runoff modelling*. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), pp. 878–895. 2007.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. *Mapa de domínios e subdomínios hidrogeológicos do Brasil: águassubterrâneas – Escala: 1:2.500.000*. Rio de Janeiro. 2007
- David, P. C., D. Y., Chagas, V. B. P., Luiz, P., & Chaffe. *Uso De Assinaturas Hidrológicas Para Classificação De Bacias Hidrográficas Do Brasil*. XXIII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos. 2019.

- Do Vasco, Anderson Nascimento; Netoo, Antenor De Oliveira Aguiar; Da Silva, Marínoe Gonzaga. *The influence of dams on ecohydrological conditions in the São Francisco River Basin, Brazil*. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 19, n. 4, p. 556-565, 2019.
- Döll, P., & Schmied, H. M. *How is the impact of climate change on river flow regimes related to the impact on mean annual runoff? A global-scale analysis*. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014037. 2012.
- Dong, Ningpeng et al. *Water resources management in a reservoir-regulated basin: Implications of reservoir network layout on streamflow and hydrologic alteration*. *Journal of Hydrology*, p. 124903. 2020.
- Eckhardt K. 2005. *How to construct recursive digital filters for baseflow separation*. *Hydrological Processes* 19: 507–515. DOI:10.1002/hyp.5675
- EPE. *Plano Nacional De Energia – PNE 2030*. Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-PNE-2030>. Acesso em 17 de junho de 2021.
- Euser, Tanja et al. *A framework to assess the realism of model structures using hydrological signatures*. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, v. 9, n. 11. 2012
- Fan, F. M., Collischonn, W., Quiroz, K. J., Sorribas, M. V., Buarque, D. C., and Siqueira, V. A. 2016. *Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates*, *J. Flood Risk Manag.*, 9, 278–288, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12177>, 2016.
- Fan, Y.: *Groundwater in the Earth’s critical zone: Relevance to large-scale patterns and processes: Groundwater at large scales*. *Water Resour. Res.*, 51(5), 3052–3069, doi:10.1002/2015WR017037, 2015.
- Fan, F. M.; Collischonn, W. *Integração do Modelo MGBIPH com Sistema de Informação Geográfica*. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, p. 243-254. 2014.
- Fan, Y., Li, H. and Miguez-Macho, G. *Global Patterns of Groundwater Table Depth*. *Science*, 339(940), 1–5, doi:10.1126/science.1229881. 2013.
- Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Sorribas, M. V., & Pontes, P. R. M. *On river-floodplain interaction and hydrograph skewness*. 2016. *Water Resources Research*, 52(10), 7615–7630. doi:10.1002/2016wr019233
- Gao, Yongxuan et al. *Development of representative indicators of hydrologic alteration*. *Journal of Hydrology*, v. 374, n. 1-2, p. 136-147. 2009.
- Harris, MB., Tomas, WM., Mourão, GM., Da Silva, CJ., Guimarães, E., Sonoda, F. and Fachim, E., 2005. *Desafios para proteger o Pantanal brasileiro: ameaças e iniciativas em conservação*. *Megadiversidade*, vol. 1, no. 1, p. 156-164.
- Hingray, B. et al. *Signature-based model calibration for hydrological prediction in mesoscale Alpine catchments*. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, v. 55, n. 6, p. 1002-1016. 2010

- Jardim, P. F., Melo, M. M. M., Ribeiro, L. D. C., Collischonn, W., & Paz, A. R. D. (2020). A modeling assessment of large-scale hydrologic alteration in south american Pantanal due to upstream dam operation. *Frontiers in Environmental Science*. Lausanne. Vol. 8 (Oct. 2020), Article 567450, 15 p. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.567450>.
- Jehn, F. U. et al. *Using hydrological and climatic catchment clusters to explore drivers of catchment behavior*. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 3, p. 1081-1100. 2020.
- Junk WJ. 2007. *Freshwater fishes of South America: their biodiversity, fisheries, and habitats: a synthesis*. *Aquatic Ecosystem Health & Management* 10: 228–242.
- Kuentz, A., Arheimer, B., Hundecha, Y., & Wagener, T. *Understanding hydrologic variability across Europe through catchment classification*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2863-2879. 2017.
- Lehner, B. and Döll, P.: *Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands*, *J. Hydrol.*, 296, 1–22, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>
- Lisboa, L. *Sistema para análise das outorgas de captação de água e diluição de efluentes na bacia do Rio Piracicaba*. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. UFV, Viçosa - MG. 109 p. 2014.
- López-Ballesteros, A., Senent-Aparicio, J., Martínez, C., & Pérez-Sánchez, J. *Assessment of future hydrologic alteration due to climate change in the Aracthos River basin (NW Greece)*. *Science of The Total Environment*, 139299. 2020.
- Mathews, R., Richter, B.D. *Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmental flow setting*. *Journal of the American Water Resources Association* 43, 1400–1413. 2007.
- Mcmillan, H.; Westerberg, I.; Branger, F. *Five guidelines for selecting hydrological signatures*. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 26, p. 4757–4761. 2017.
- Melles S J, Jones N E and Schmidt B J. *Evaluation of current approaches to stream classification and a heuristic guide to developing classifications of integrated aquatic networks* *Environ. Manage.* 53 549–66. 2014.
- Morais, Tarciso. *Ministro não descarta novas usinas hidrelétricas na Amazônia*. 2020. Disponível em: <https://renovamidia.com.br/ministro-nao-descarta-novas-usinas-hidreletricas-na-amazonia/>. Acesso em: jun 2020.
- Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Collischonn, W., Bonnet, M. P., Frappart, F., Calmant, S., Bulhões Mendes, C. A. *Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin*. *Water Resour. Res.*, 49, 1226–1243, 2013. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>.
- Parzen, E., 1963. On spectral analysis with missing observations and amplitude modulation. *Sankhya: The Indian Journal of Statistics, Series A*, pp.383-392.
- Peel, M. C., B. L. Finlayson, and T. A. McMahon. *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, 2007.

- Penman, A. D. M. *Shear characteristics of a saturated silt, measured in triaxial compression*. Geotechnique, 3(8), 312-328. 1953.
- Pfannerstill, M., Guse, B., & Fohrer, N. *Smart low flow signature metrics for an improved overall performance evaluation of hydrological models*. Journal of Hydrology, 510, 447–458. 2014. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.12.044
- Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks, and J. C. Stromberg. 1997. *The natural flow regime*. BioScience 47:769–784
- Pontes, P. R. M., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., de Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Siqueira, V. A., Jardim, P. F., Sorribas, M. V., Collischonn, W. *MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS*. Environ. Modell. Softw., 94, 1–20, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>.
- Pontes, P., Collischonn, W., Fan, F., Paiva, R., Buarque, D. *Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 20(4), 888-904. 2015.
- Pott, A., & Pott, V. J. (2004). *Features and conservation of the Brazilian Pantanal wetland*. Wetlands Ecology and Management, 12(6), 547–552. doi:10.1007/s11273-005-1754-1
- Ribeiro, Larissa de Castro. *Caracterização do Regime de Vazões Naturais de Rios da América do Sul Utilizando Modelagem Hidrológica*. 2021. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braun, D. P., & Powell, J. *A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network*. Regulated Rivers: Research & Management: An International Journal Devoted to River Research and Management, 14(4), 329-340. 1988.
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. *A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems*. Conservation Biology. 1996. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1327.1739.1996.10041163.x>
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R. M., & Limbrunner, J. F. *Climate elasticity of streamflow in the United States*. 2001. Water Resources Research, 37(6), 1771-1781.
- Sawicz, K. A., Kelleher, C., Wagener, T., Troch, P., Sivapalan, M., & Carrillo, G. *Characterizing hydrologic change through catchment classification*. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 10(5). 2014.
- Sawicz, K., Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P. A., and Carrillo, G. *Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 2895–2911, 2011. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2895-2011>.
- Shiklomanov, Igor A.; Rodda, John C. (Ed.). World water resources at the beginning of the twenty-first century. Pg 9. Cambridge University Press. 2004.
- Siddiqui, Sharmin F. et al. *Classifying flow regimes of the Amazon basin*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, v. 31, n. 5, p. 1005-1028, 2021.

- Siqueira, V. A. et al. Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*. Göttingen: Copernicus. Vol. 22, n. 9 (set. 2018), pp. 4815-4842. 2018.
- Sivapalan, Murugesu. *Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology*. *Hydrological Processes*, v. 17, n. 15, p. 3163-3170. 2003.
- Soares, Vilhena. *Nascentes de rios do pantanal podem secar alertam especialistas*. 2020. Disponível em: <https://ecoa.org.br/nascentes-de-rios-do-pantanal-podem-secar-alertam-especialistas/>. Acesso em: jun 2020.
- Sood, A. and Smakhtin, V.: *Global hydrological models: a review*, *Hydrol. Sci. J.*, 60, 549–565, <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.950580>, 2015.
- The Nature Conservancy. *Indicators of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual*. 2009.
- Thornthwaite, C. W. *An approach toward a rational classification of climate*. *Geographical review*, 38(1), 55-94. 1948.
- Timpe, K., & Kaplan, D. *The changing hydrology of a dammed Amazon*. *Science Advances*. 2017. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700611>.
- Virkki, V. et al. Environmental flow envelopes: quantifying global, ecosystem–threatening streamflow alterations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, [s. l.], n. May, p. 1–31, 2021. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-2021-260>
- Vogel, R. M., & Kroll, C. N. *Estimation of baseflow recession constants*. *Water resources management*, 10(4), 303-320. 1996.
- Wood, E. F., Roundy, J. K., Troy, T. J., van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F. P., Blyth, E., de Roo, A., Doll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., van de Giesen, N., Houser, P., Jaffe, P. R., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D. P., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., and Whitehead, P. *Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water*, *Water Resour. Res.*, 47, W05301, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010wr010090>.
- Yadav, M., Wagener, T., and Gupta, H. *Regionalization of constraints on expected watershed response*, *Adv. Water Resour.*, 30, 1756–1774. 2007.
- Yang, Xue et al. *Dependence of regionalization methods on the complexity of hydrological models in multiple climatic regions*. *Journal of Hydrology*, v. 582, p. 124357. 2020.
- Yilmaz, Koray K.; Gupta, Hoshin V.; Wagener, Thorsten. *A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model*. *Water Resources Research*, v. 44, n. 9. 2008.
- Yokoo, Y., & Sivapalan, M. (2011). *Towards reconstruction of the flow duration curve: development of a conceptual framework with a physical basis*. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(9), 2805-2819.
- Zhang, Z., Wagener, T., Reed, P., and Bhushan, R. Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrologic indices regionalization and multiobjective optimization, *Water Resour. Res.*, 44, W00B04, 2008. doi:10.1029/2008WR006833.

APÊNDICE A

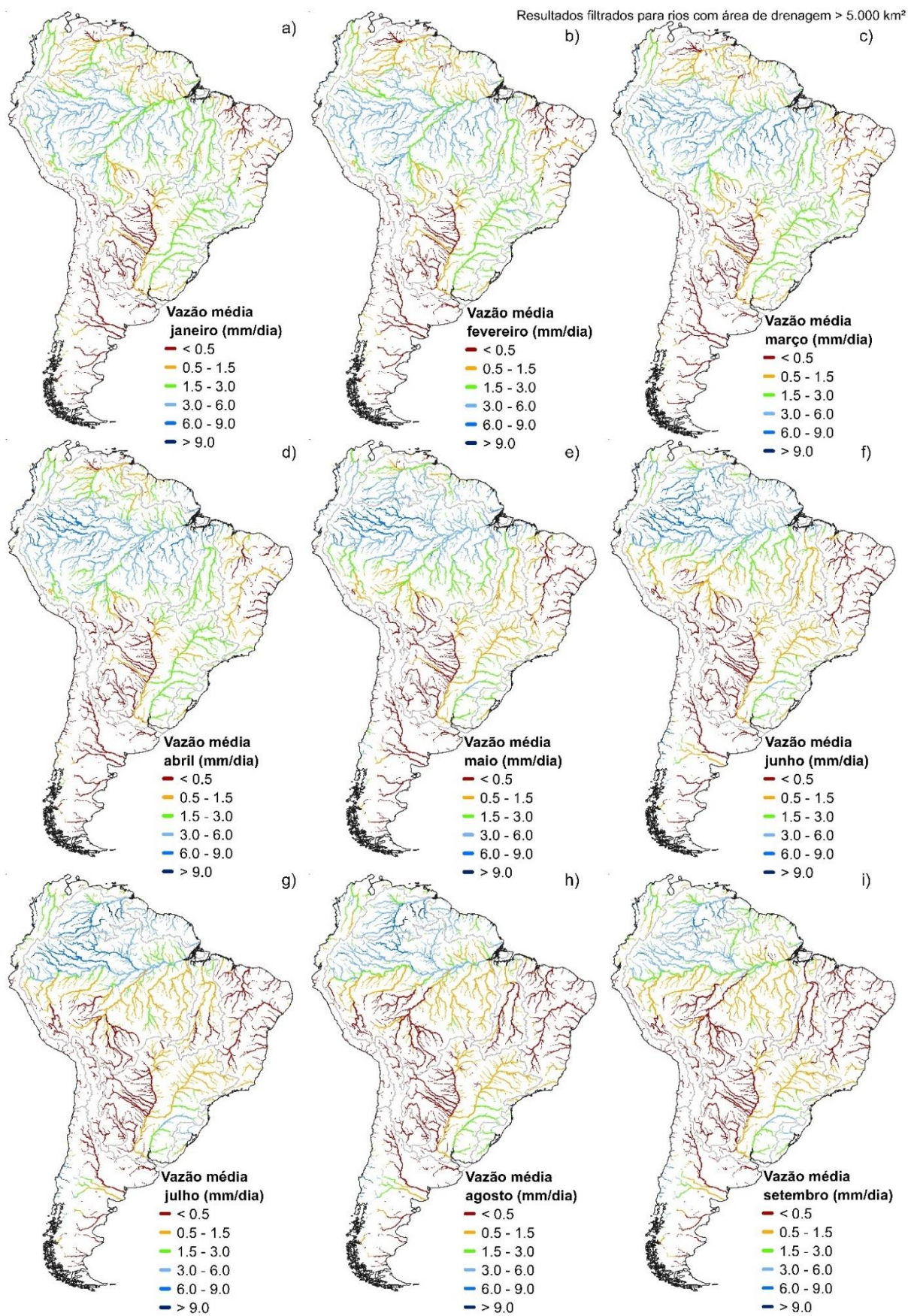


Figura 19. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões médias (G1) – parte 1/2.

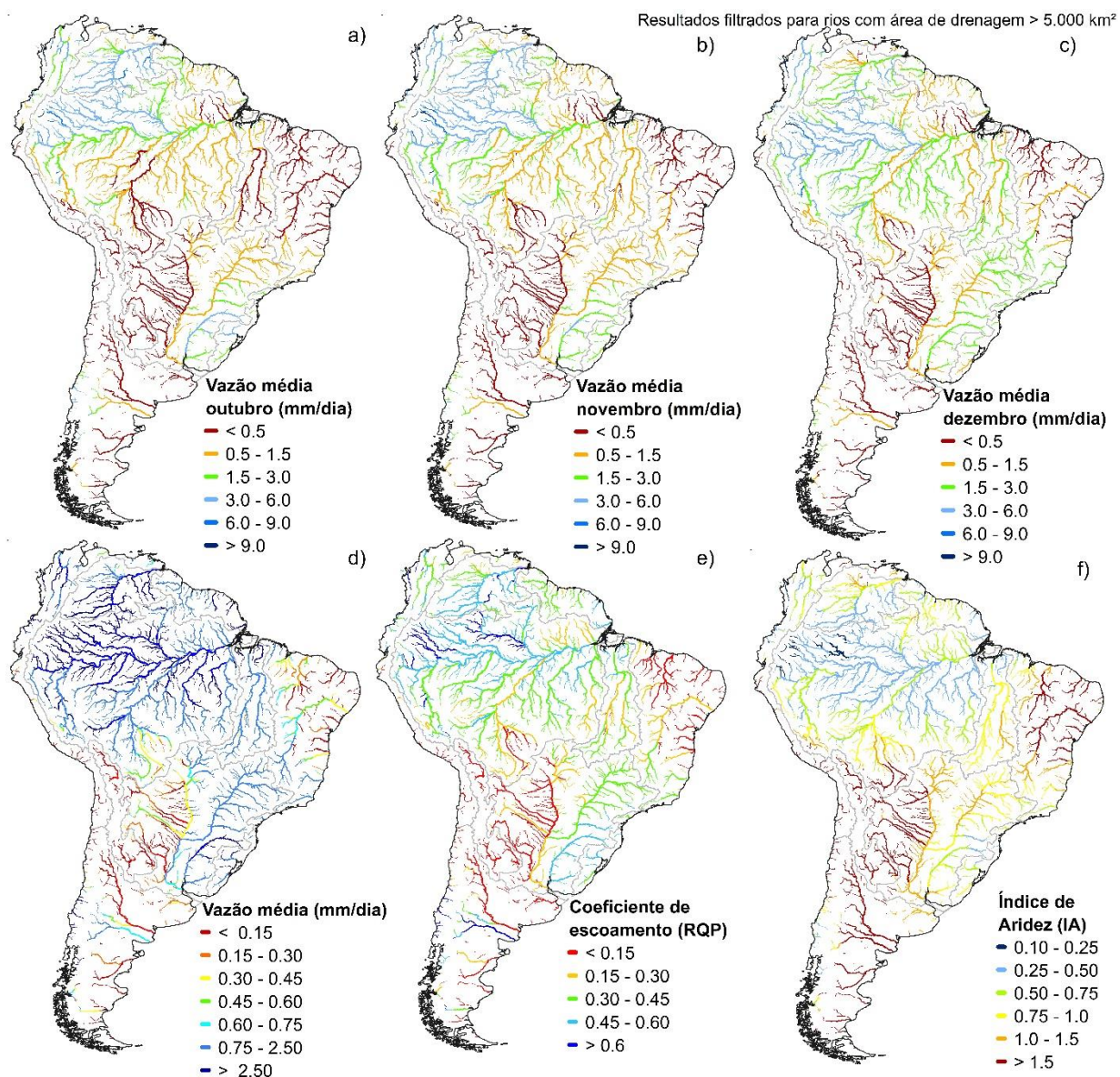


Figura 20. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões médias (G1) – parte 2/2.

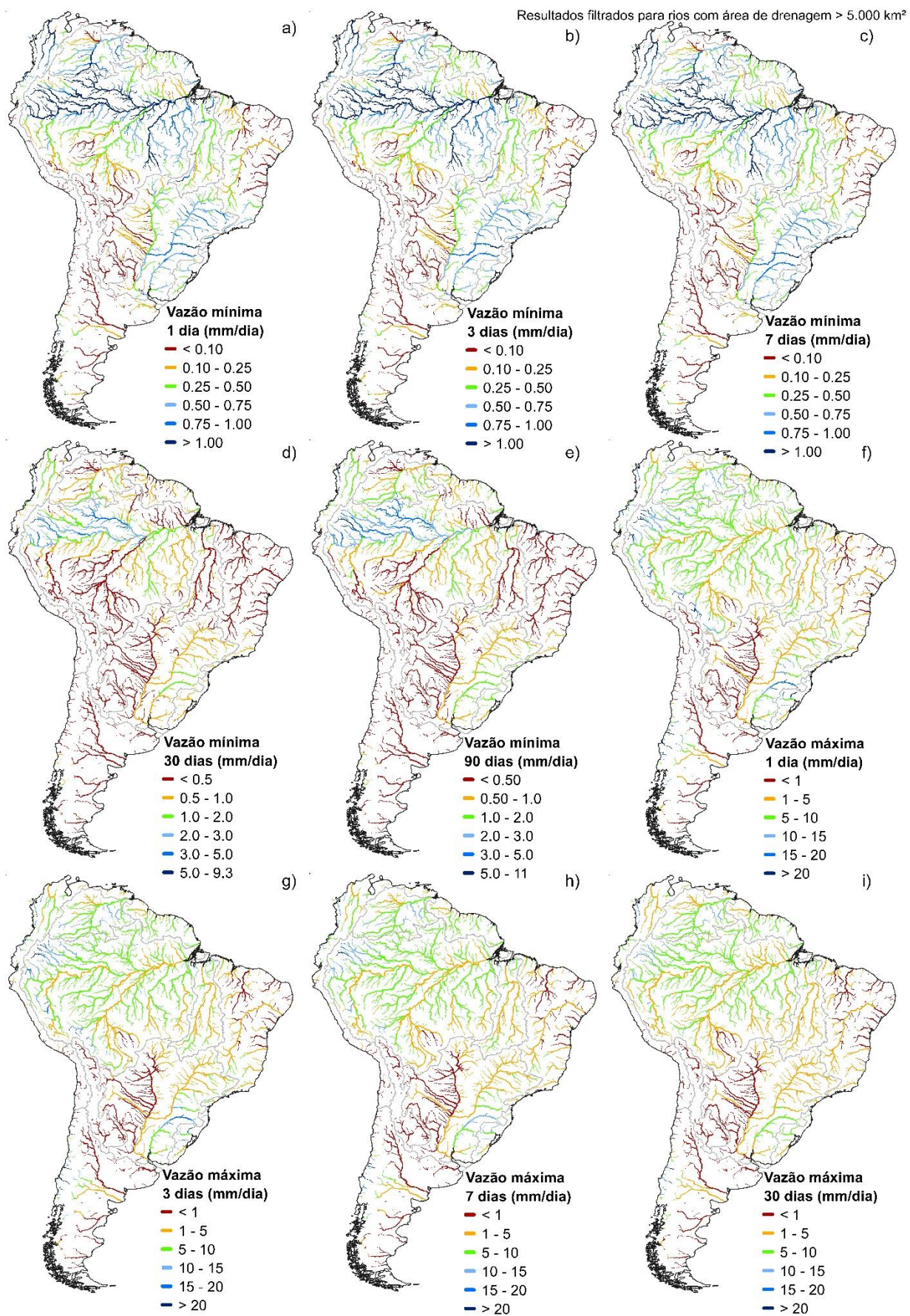


Figura 21. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões extremas (G2) – parte 1/2.

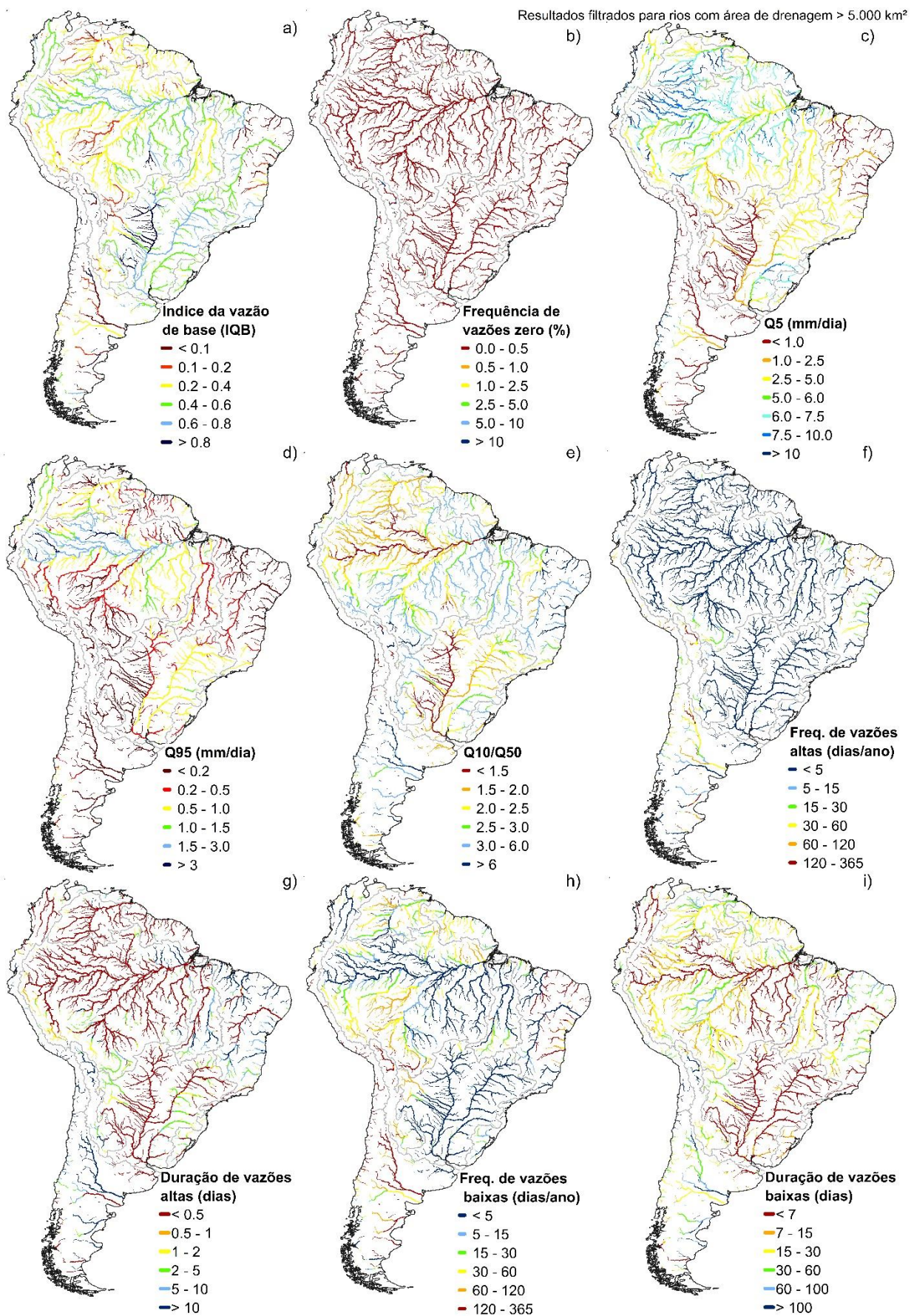


Figura 22. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões extremas (G2) – parte 2/2.

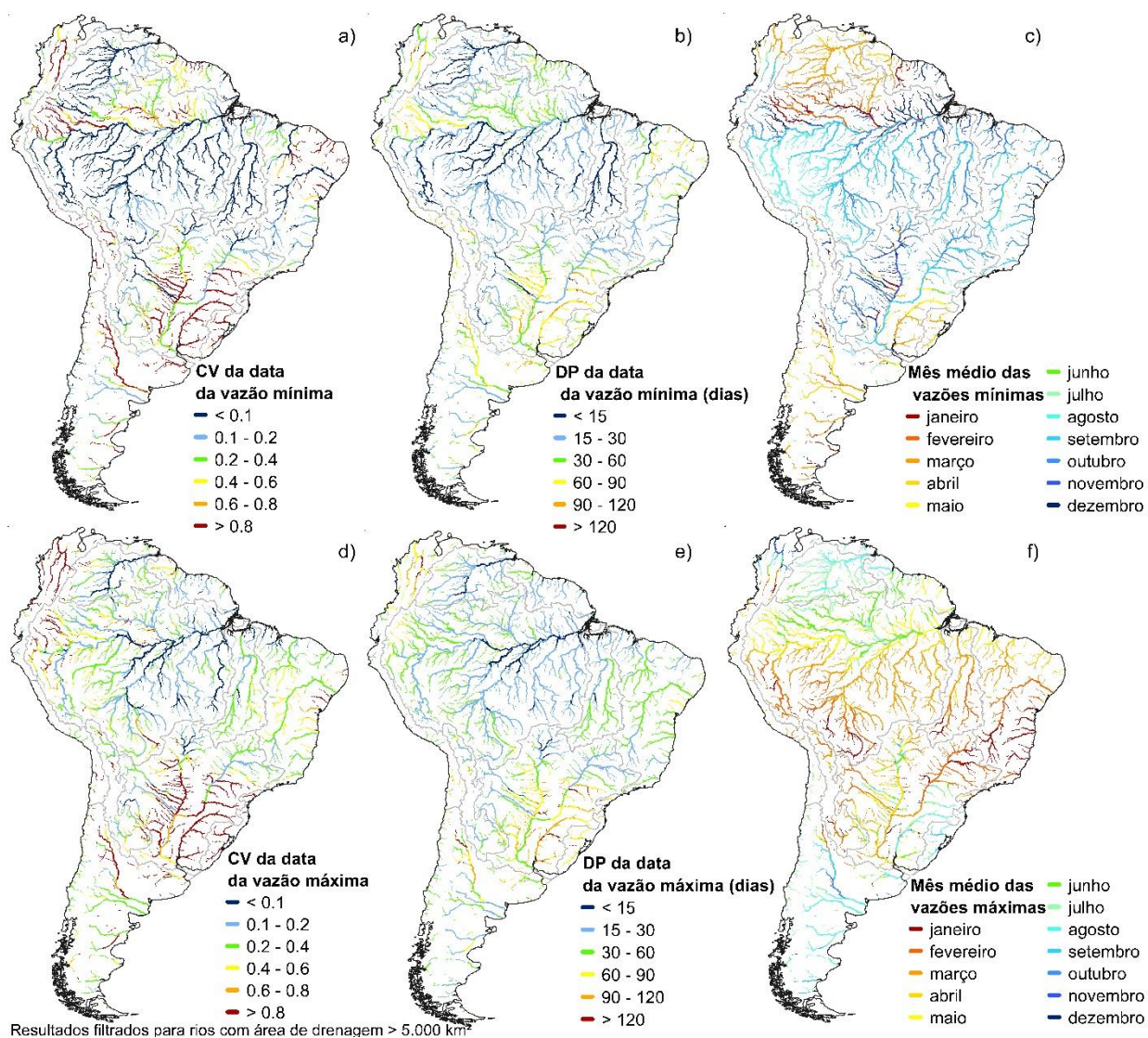


Figura 23. Índices hidrológicos do grupo de sazonalidade de extremos (G3) – parte 1/1.

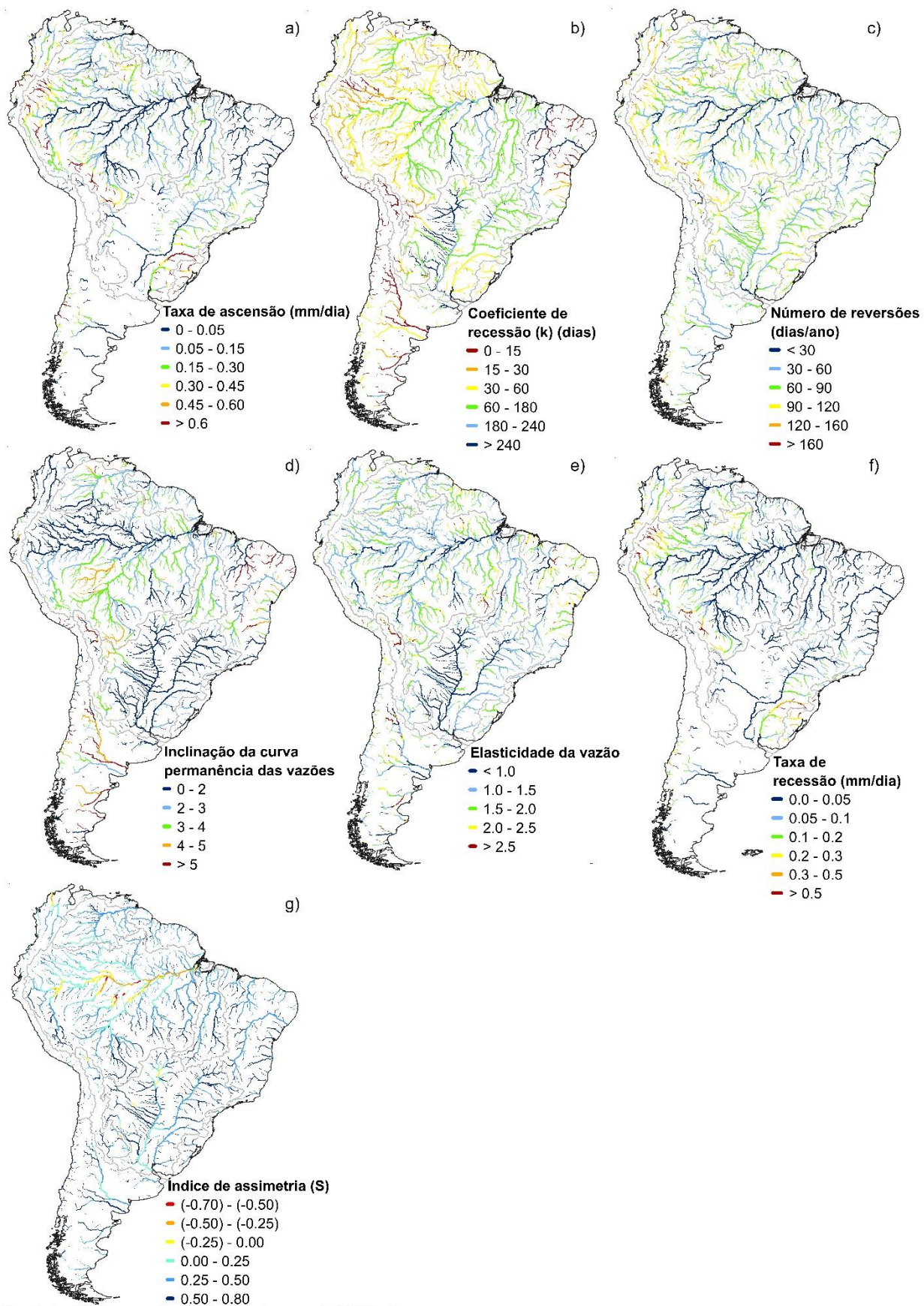


Figura 24. Índices hidrológicos do grupo de variabilidade das vazões no tempo (G4) – parte 1/1.

APÊNDICE B

Tabela 8. Mediana do erro relativo (ER) de 56 índices hidrológicos.

ÍNDICE HIDROLÓGICO	MEDIANA DO ERRO RELATIVO-ER (%)
Vazão média (Qm)	24.34
Coefficiente de Escoamento (RQP)	33.88
Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)	36.15
Vazão mínima de referência Q ₉₅	49.29
Vazão máxima de referência Q ₅	27.37
Frequência de vazões altas	4.62
Duração de vazões altas	16.98
Frequência de vazões baixas	22.11
Duração de vazões baixas	31.00
Frequência de vazões igual a zero	0.00
Coefficiente de recessão da vazão de base (k)	152.87
Índice de assimetria do hidrograma (s)	96.69
Índice de vazão de base (IQB)	56.32
Elasticidade da vazão (EQP)	43.92
Vazão máxima de referência normalizada Q10/Q50	5.50
Média da vazão diária mensal de janeiro	27.11
Média da vazão diária mensal de fevereiro	25.13
Média da vazão diária mensal de março	22.74
Média da vazão diária mensal de abril	20.41
Média da vazão diária mensal de maio	14.63
Média da vazão diária mensal de junho	12.06
Média da vazão diária mensal de julho	10.69
Média da vazão diária mensal de agosto	11.78
Média da vazão diária mensal de setembro	13.34
Média da vazão diária mensal de outubro	15.63
Média da vazão diária mensal de novembro	21.76
Média da vazão diária mensal de dezembro	29.00
Vazão mínima de 1 dia	39.52
Vazão mínima de 3 dias	38.80
Vazão mínima de 7 dias	37.82
Vazão mínima de 30 dias	33.08
Vazão mínima de 90 dias	27.65
Coefficiente de Variação da vazão mínima de 1 dia	34.12
Coefficiente de Variação da vazão mínima de 3 dias	30.00
Coefficiente de Variação da vazão mínima de 7 dias	29.96
Coefficiente de Variação da vazão mínima de 30 dias	30.91
Coefficiente de Variação da vazão mínima de 90 dias	32.58
Vazão máxima de 1 dia	17.94
Vazão máxima de 3 dias	20.82

ÍNDICE HIDROLÓGICO	MEDIANA DO ERRO RELATIVO-ER (%)
Vazão máxima de 7 dias	23.77
Vazão máxima de 30 dias	24.06
Vazão máxima de 90 dias	21.98
Coeficiente de Variação da vazão máxima de 1 dia	39.67
Coeficiente de Variação da vazão máxima de 3 dias	37.80
Coeficiente de Variação da vazão máxima de 7 dias	35.73
Coeficiente de Variação da vazão máxima de 30 dias	33.92
Coeficiente de Variação da vazão máxima de 90 dias	38.35
Desvio Padrão da data da vazão mínima	39.90
Coeficiente de Variação da data da vazão mínima	20.52
Desvio Padrão da data da vazão máxima	41.24
Coeficiente de Variação da data da vazão máxima	23.89
Taxa de ascensão	14.24
Taxa de recessão	22.15
Número de reversões	82.34
Coeficiente de Variação da taxa de ascensão	49.86
Coeficiente de Variação da taxa de recessão	43.96
Coeficiente de Variação do número de reversões	98.54
Média (%)	33.17