

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL

LARISSA DE CASTRO RIBEIRO

CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VAZÕES NATURAIS DE RIOS DA  
AMÉRICA DO SUL UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA

PORTO ALEGRE

2021

LARISSA DE CASTRO RIBEIRO

CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VAZÕES NATURAIS DE RIOS DA  
AMÉRICA DO SUL UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestra.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva

PORTO ALEGRE

2021

### CIP - Catalogação na Publicação

Ribeiro, Larissa de Castro  
CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VAZÕES NATURAIS DE RIOS  
DA AMÉRICA DO SUL UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA /  
Larissa de Castro Ribeiro. -- 2021.  
123 f.  
Orientador: Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. caracterização de vazões. 2. índices  
hidrológicos. 3. escala continental. I. Paiva, Rodrigo  
Cauduro Dias de, orient. II. Título.

LARISSA DE CASTRO RIBEIRO

CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VAZÕES NATURAIS DE RIOS DA  
AMÉRICA DO SUL UTILIZANDO MODELAGEM HIDROLÓGICA

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à  
obtenção do grau de mestra.

Aprovado em: Porto Alegre, 29 de JUNHO de 2021.

---

Prof. Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva – PPGRHSA/UFRGS  
Orientador

---

Prof. Dr. Walter Collischonn – PPGRHSA/UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Pedro Luiz Borges Chaffe – UFSC  
Examinador

---

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho – UFC  
Examinador

---

Dr. Mino Viana Sorribas – Convidado  
Examinador

## Agradecimentos

Durante a caminhada no desenvolvimento do meu mestrado fui presenteada com o apoio de muitas pessoas especiais, que me incentivaram, ajudaram, mostraram amizade, compaixão e carinho. Conheci muitas pessoas extraordinárias e reforcei minha admiração pelas pessoas que já estavam presentes em minha vida.

Sou grata às instituições onde desenvolvi meu mestrado – a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). Também sou grata à CAPES por ter financiado minha pesquisa. Um agradecimento especial à Agência Nacional de Águas (ANA), pelas bases de dados que são disponibilizadas de forma acessível, e por eu ter tido a oportunidade de participar do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”, podendo ter conhecido seu corpo técnico com profissionais de excelência.

Gostaria de agradecer ao grupo HGE (Hidrologia de Grande Escala), em que fiz não somente colegas de trabalho, mas grandes amigos que me ajudaram muito, agradeço ao Sly, Aline, Renata, Sofia, Alice, Hugo, Cléber, Ayan, Pedro, Rafael, Leonardo, em especial o João Paulo Fialho Brêda e o Vinicius Siqueira.

Agradeço aos amigos que fiz na pós-graduação, em especial à Jéssica (que me acolheu como uma mãe junto com o Gabriel), Thainá e Duda (que foram como irmãs), Thais, Regina, Cayo, Julio, Marina, Bruno, Danrlei, Thiago Zé, Benício, Dani, Fran, aos amigos do GPDEN, Tubarão, NECOD e Saneamento.

Minha gratidão ao Professor Walter Collischonn e ao Dr. Mino Sorribas, que são pesquisadores sublimes, e me deram muito apoio e ensinamentos.

Ao meu Orientador Rodrigo Cauduro dias de Paiva, que tenho uma grande admiração. Que obtive todo apoio e compressão, que me aconselhou que a saúde física e mental (ainda mais neste momento de pandemia da Covid-19) é o que mais importa. Agradeço aos inestimáveis conhecimentos e ensinamentos que me ele me passou.

Agradeço aos meus amigos do coração Lorena, Rodrigo, Julianne, Nara, Kellen, Byatriz, Bruna e Suiami, que estarão sempre comigo.

Sou muito grata ao Leonardo, Raquel e Ademir, que me acolheram como parte da família, me apoiaram e me acompanharam nessa jornada.

Obrigada à minha família, avó, mãe, pai, irmãos, cunhadas e sobrinhos, meu primo Guilherme, e minha tia Jô.

Muito obrigada!

## RESUMO

Os rios prestam importantes serviços ambientais relacionados à preservação e sustentação dos ecossistemas aquáticos, possuem um papel importante no ciclo hidrológico de bacias hidrográficas e sustentam atividades socioeconômicas como o abastecimento de água de cidades, suprimento para a indústria, agricultura, navegação e geração de energia elétrica. Entender o comportamento dos rios é de suma importância, pois a mudança em suas características pode causar impactos, e a análise do comportamento dos rios nos dá um panorama da disponibilidade hídrica. O comportamento dos rios pode ser compreendido e caracterizado através do estudo do **regime de vazões**, que é descrito pelo padrão das características das **séries de vazões** de um rio, como a magnitude, previsibilidade e variabilidade das vazões. Este trabalho teve o objetivo de realizar a **caracterização do regime natural de vazões** dos rios da **América do Sul**, analisando seu comportamento médio através de **índices hidrológicos**, realizar a análise da **acurácia** de índices hidrológicos estimados a partir de vazões obtidas por **modelagem hidrológica** e desenvolver uma **base de dados** com esses índices. Para a obtenção dos índices hidrológicos foram utilizadas séries de vazões naturais diárias estimadas por modelagem hidrológica, empregando o uso do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), numa **série de vazões** de 1980 a 2014 (**35 anos**), e posteriormente foram calculados 73 índices hidrológicos. Para a análise da acurácia da modelagem hidrológica, foram calculados os índices com séries de vazões observadas, os quais foram comparados com os índices estimados através de erro relativo, erro absoluto e correlação. Os índices hidrológicos observados foram obtidos utilizando vazões de postos fluviométricos na América do Sul, após passar por uma filtragem de qualidade, resultando no total de 1329 postos. A base de dados foi construída através da elaboração de mapas com os principais índices hidrológicos analisados e os índices dos rios foram disponibilizados em plataforma *online* no formato de arquivo ESRI *shapefile*. 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 próprios índices. O erro relativo foi calculado para os 1329 pontos (correspondentes aos postos fluviométricos) para 56 índices selecionados para essa análise, com isso obtivemos que a média das medianas dos erros calculados dos índices hidrológicos é de **33,2%**. Com a base de dados podemos obter uma visão espacial do comportamento dos rios, inclusive de rios que ainda não têm informações sobre o regime de vazões. Assim, podemos concluir que as séries de vazões estimadas por modelagem hidrológica possuem representações **satisfatórias** dos índices hidrológicos apresentados. Dentre as contribuições deste trabalho, podemos destacar a apresentação dos índices hidrológicos e sua base de dados, que poderão ser utilizados como uma ferramenta para o conhecimento de processos hidrológicos na América do Sul.

**Palavras-chave:** caracterização de vazões; índices hidrológicos; escala continental.

## ABSTRACT

Rivers provide important environmental services related to the preservation and support of aquatic ecosystems, play an important role in the hydrological cycle of watersheds and support socioeconomic activities such as city water supply, industrial supply, agriculture, navigation and electricity generation. Understanding the behavior of rivers is of paramount importance, as changes in their characteristics can cause impacts, and the analysis of river behavior gives us an overview of water availability. The behavior of rivers can be understood and adequate through the study of the flow regime, which is described by the pattern of flow characteristics of a river, such as magnitude, predictability and variability of flows. This work aimed to characterize the natural flow regime of rivers in South America, analyzing their average parameters of hydrological indices, performing an analysis of the accuracy of hydrological indices estimated from data flows by hydrological modeling and to develop a database with these indexes. To obtain the hydrological indices, series of daily natural flows estimated by hydrological modeling were used, using the Large Basin Hydrological Model (MGB), in a series of flows from 1980 to 2014 (35 years), and were subsequently calculated 73 hydrological indices. For the analysis of the accuracy of the hydrological modeling, the indices were calculated with series of observed flows, which were compared with the indices estimated through relative error, absolute error and correlation. The observed hydrological indices were obtained using flow rates from fluvimetric stations in South America, after passing through a quality filtering, resulting in a total of 1329 stations. The database was built through the elaboration of maps with the main hydrological indices analyzed and the river indices were made available on an online platform in the ESRI shapefile file format. The results obtained for the analysis of hydrological indices allowed us to observe patterns of behavior of the river flow regime, related, for example, to climate and hydrogeology, as well as relationships between the indices themselves. The relative error was calculated for 1329 points (corresponding to fluvimetric stations) for 56 indices selected for this analysis, with this we obtained that the average of the medians of the calculated errors of the hydrological indices is 33.2%. With the database we can obtain a spatial view of the behavior of rivers, including rivers that still do not have information on the flow regime. Thus, we can conclude that the series of flows estimated by hydrological modeling have satisfactory representations of the presented hydrological indices. Among the contributions of this work, we can highlight the presentation of hydrological indices and their database, which can be used as a tool for understanding hydrological processes in South America.

**Keywords:** stream flow characterizing; hydrologic indices; continental scale.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
2.1 REGIME DE VAZÕES NATURAIS.....	17
2.2 OBSERVAÇÃO E ESTIMATIVA DE VAZÃO .....	18
2.2.1 Medições de vazões <i>in situ</i> .....	18
2.2.2 Regionalização de vazões .....	19
2.2.3 Modelagem hidrológica.....	20
2.2.4 Sensoriamento Remoto .....	22
2.3 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VAZÕES .....	24
2.3.1 Índices Hidrológicos .....	26
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
3.1 VAZÕES ESTIMADAS POR MODELAGEM HIDROLÓGICA .....	32
3.2 VAZÕES OBSERVADAS DOS POSTOS FLUVIOMÉTRICOS PARA ANÁLISE DA ACURÁCIA DA ESTIMATIVAS DOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS	33
3.2.1 Filtro de seleção de vazões observadas dos postos fluviométricos .....	34
3.3 MAPAS CLIMÁTICOS E HIDROGEOLÓGICOS.....	36
3.4 ÍNDICES HIDROLÓGICOS.....	37
3.4.1 Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro .....	39
3.4.2 Vazão mínima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias.....	40
3.4.3 Vazão máxima de 1, 2, 3, 7, 30 e 90 dias .....	40
3.4.4 Data da vazão mínima.....	40
3.4.5 Data da vazão máxima .....	41
3.4.6 Taxa de ascensão.....	41
3.4.7 Taxa de recessão .....	41
3.4.8 Número de reversões .....	42
3.4.9 Índice da vazão de base (IQB).....	42
3.4.10 Coeficiente de recessão da vazão de base (k) .....	43

3.4.11	Coefficiente de escoamento ( $R_{QP}$ ) .....	43
3.4.12	Inclinação da curva de permanência das vazões ( $S_{FDC}$ ).....	44
3.4.13	Índice de assimetria do hidrograma (S) .....	45
3.4.14	Elasticidade da vazão ( $E_{QP}$ ) .....	46
3.4.15	Índice de aridez (IA).....	46
3.4.16	Vazão média ( $Q_m$ ).....	47
3.4.17	Frequência e duração de vazões altas, baixas e vazões zero.....	47
3.4.18	Vazão máxima de referência ( $Q_5$ ) .....	48
3.4.19	Vazão mínima de referência ( $Q_{95}$ ).....	48
3.4.20	Vazão máxima de referência normalizada ( $Q_{10}/Q_{50}$ ) .....	49
3.5	ANÁLISE DA ACURÁCIA DOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS ESTIMADOS ATRAVÉS DE VAZÕES SIMULADAS .....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>52</b>
4.1	ANÁLISE DA ACURÁCIA DOS ÍNDICES HIDROLÓGICOS .....	53
4.1.1	Visão geral da acurácia .....	56
4.2	ÍNDICES HIDROLÓGICOS.....	62
4.2.1	Magnitude das vazões médias ( $G_1$ ).....	62
4.2.2	Magnitude das vazões extremas ( $G_2$ ) .....	64
4.2.3	Sazonalidade de extremos ( $G_3$ ) .....	66
4.2.4	Variabilidade das vazões no tempo ( $G_4$ ).....	68
4.3	BASE DE DADOS .....	70
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> .....	<b>73</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>90</b>
	<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>93</b>

## LISTA DE FIGURAS

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. ....	13
Figura 2. O regime de vazões e suas características principais. ....	17
Figura 3. Desempenho das vazões simuladas na América do Sul utilizando o MGB para a) correlação, b) KGE e c) NSE. Fonte: Siqueira et al. (2018). ....	22
Figura 4. Classificação do regime de vazões da América do Sul (Adaptado de Hainess et al., 1988). ....	25
Figura 5. Tipos dos rios da América do Sul baseada em classificação supervisionada. (Adaptado de Ouellet Dallaire et al., 2018). ....	26
Figura 6. Fluxograma geral da proposta metodológica trabalho. ....	31
Figura 7. Discretização dos rios em 33 mil trechos, obtidos na modelagem hidrológica da América do Sul. ....	33
Figura 8. Postos fluviométricos utilizados para as análises deste trabalho. ....	35
Figura 9. 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). ....	36
Figura 10. Exemplo de ano hidrológico de mínimas. ....	38
Figura 11. Exemplo de ano hidrológico de máximas. ....	38
Figura 16. Exemplos de hidrogramas de vazões estimadas por modelagem hidrológica de rios da América do Sul. ....	52
Figura 12. Resultado do cálculo de alguns índices hidrológicos do grupo G2, e seus respectivos erros absolutos (EA). ....	53
Figura 13. Resultado do cálculo de alguns índices hidrológicos do grupo G4, e seus respectivos erros absolutos (EA). ....	55
Figura 14. Média dos erros dos índices separados por grupos. ....	56
Figura 15. Bacias hidrográficas da América do Sul. ....	58
Figura 17. Índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões médias (G1). ....	63
Figura 18. Índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões extremas (G2). ....	65

Figura 19. Índices hidrológicos do grupo sazonalidade de extremos (G3). .....	67
Figura 20. Índices hidrológicos do grupo de variabilidade das vazões no tempo (G4). .....	68
Figura 21. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões médias (G1) – parte 1/2. ....	84
Figura 22. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões médias (G1) – parte 2/2. ....	85
Figura 23. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões extremas (G2) – parte 1/2. ....	86
Figura 24. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões extremas (G2) – parte 2/2. ....	87
Figura 25. Índices hidrológicos do grupo de sazonalidade de extremos (G3) – parte 1/1. ....	88
Figura 26. Índices hidrológicos do grupo de variabilidade das vazões no tempo (G4) – parte 1/1. ....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 33 Índices de Alteração Hidrológica (Adaptado de Gao et al., 2009).....	27
Tabela 3. Assinaturas Hidrológicas e suas relações com características hidrológicas de bacias. ....	29
Tabela 4. Base de dados das vazões observadas utilizadas. ....	34
Tabela 4. Índices hidrológicos separados em grupos (Adaptado de Black et al., 2005). 39	
Tabela 7. Valores de referência para o índice da vazão de base. ....	42
Tabela 8. Valores de referência para o coeficiente de recessão da vazão de base. ....	43
Tabela 9. Valores de referência para o coeficiente de escoamento. ....	44
Tabela 10. Valores de referência para a inclinação da curva de permanência das vazões. ....	45
Tabela 11. Valores de referência para a elasticidade da vazão. ....	46
Tabela 12. Valores de referência para o índice de aridez. ....	47
Tabela 13. Valores de referência para a vazão média. ....	47
Tabela 14. Valores de referência para a frequência e duração de vazões altas e baixas. 48	
Tabela 15. Valores de referência para a vazão máxima de referência $Q_5$ . ....	48
Tabela 16. Valores de referência para a vazão mínima de referência $Q_{95}$ .....	49
Tabela 17. Valores de referência para a vazão máxima de referência $Q_{10}/ Q_{50}$ . ....	49
Tabela 19. Correlação calculada de alguns dos índices hidrológicos.....	57
Tabela 18. Erro relativo (%) dos índices hidrológicos para bacias hidrográficas da América do Sul. ....	60
Tabela 18. Correlação calculada de alguns dos índices hidrológicos.....	91

## 1 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, Paraguai, Uruguai, 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).

Em relação às atividades socioeconômicas, muitos rios da América do Sul possuem grandes reservatórios com múltiplos usos, como geração de energia, agricultura, indústria e abastecimento de água das cidades. Dentre esses usos se destaca a geração de energia elétrica através de hidrelétricas, que são responsáveis por cerca de 80% do abastecimento de energia no Brasil em 2017 (EPE, 2018) e 50% na América do Sul (Rudnick et al., 2014).

Por possuir muitos rios transfronteiriços e que ultrapassam divisões entre estados e províncias dentro dos próprios países, em diferentes condições ambientais, sociais, culturais, econômicas e políticas, as dificuldades da gestão de recursos hídricos na América do Sul se tornam ainda maiores. Sendo assim, informações hidrológicas em escala continental e de livre acesso seriam uma ferramenta para a gestão integrada de recursos hídricos na América do Sul.

Os rios possuem características hidrológicas que podem variar ao longo do tempo, como em escalas diária, 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.

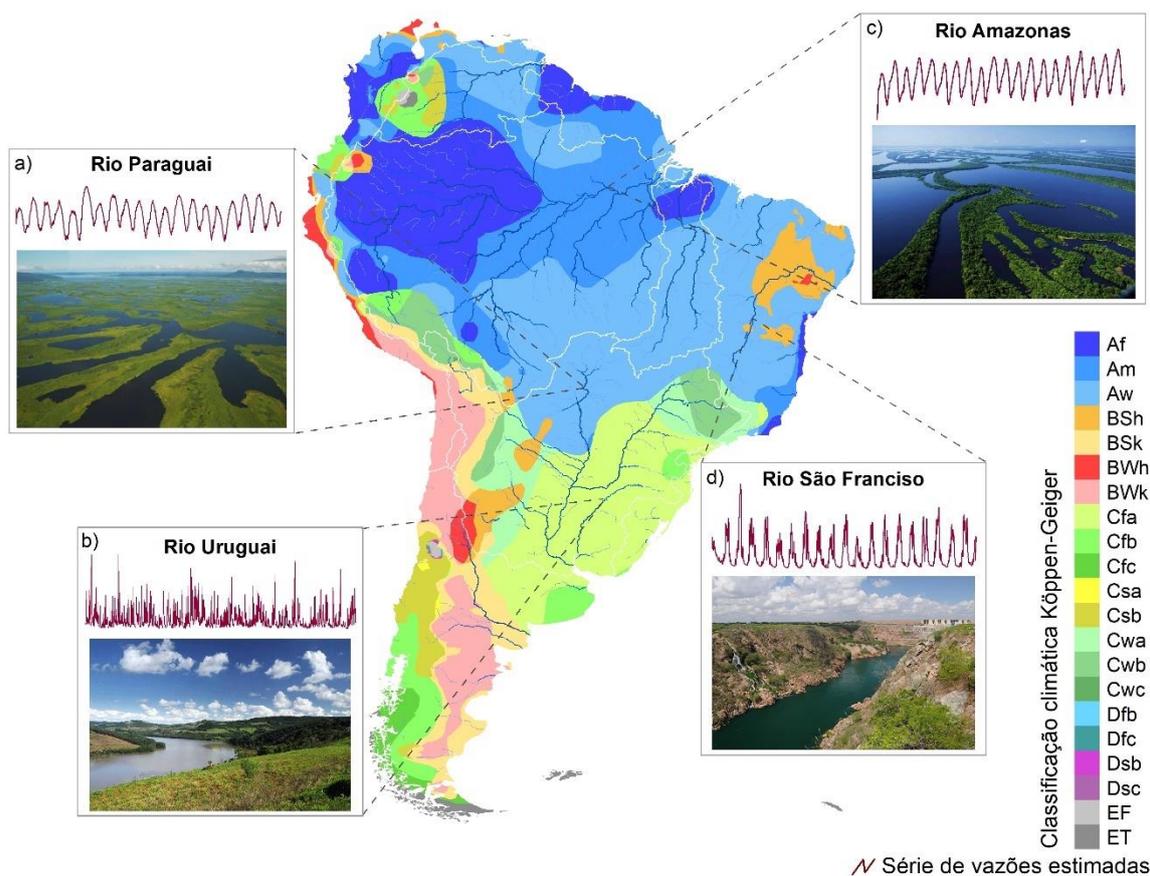


Figura 1. Rios da América do Sul. a) Rio Paraguai. Fonte: Soares, 2020; b) Rio Uruguai. Fonte: ANA, 2020a; c) Rio Amazonas. Fonte: Morais, 2020; d) Rio São Francisco. Fonte: ANA, 2020b.

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).

Séries de vazão podem ser obtidas através de medições *in situ*, porém, na América do Sul muitos dos rios não são monitorados ou os dados de vazões existentes possuem baixa representatividade temporal (Calmant, 2006). Estas limitações para obter dados de vazões *in situ* se devem a aspectos físicos, técnicos e financeiros (Tucci, 2002). 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 **IHA** (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.

Índices hidrológicos também foram avaliados para a calibração de parâmetros de modelos hidrológicos, minimizando a diferença de assinaturas obtidas de dados observados e dados simulados (Hingray et al., 2010; Pfannerstill et al., 2014; Hallouin, 2019) e analisar a consistência da estrutura de modelos chuva-vazão em reproduzir comportamentos hidrológicos (Euser et al., 2012).

A comunidade científica vem apresentando estudos de caracterização de rios e bacias, associando índices hidrológicos a características fisiográficas e climáticas, em escala continental e global. Em geral, a caracterização é realizada somente em locais monitorados que possuem medições de vazões (David et al., 2019; Jehn et al., 2020; Chagas et al. 2020), e com vazões médias mensais estimadas por modelagem hidrológica (Ouellet Dallaire et al., 2018), o que o limita a caracterização. Contudo, estes trabalhos possuem limitações como a caracterização pontual do regime hidrológico e a não capacidade de diferenciar rios grandes de pequenos, além disso não apresentam índices hidrológicos que representem a taxa de mudança e a regularidade de ocorrência das vazões, que são fundamentais para os estudos da preservação dos ecossistemas aquáticos (Poff et al., 1997).

Ainda não há estudos que caracterizam o regime de vazões da América do Sul através de índices hidrológicos numa escala que represente rios pequenos, utilizando séries de

vazões diárias. Também não há estudos que avaliam o desempenho de modelagem hidrológica ao representar o regime natural de vazões dos rios através dos índices hidrológicos. Entretanto, avanços recentes de Siqueira et al. (2018), demonstraram a capacidade atual da modelagem hidrológica continental na América do Sul, na representação de séries de vazões com acurácia similar ao normalmente obtido em modelagem hidrológica em escala de bacias. Este desenvolvimento traz novas oportunidades para estudos de caracterização de regime hidrológico dos rios.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar e mapear o regime hidrológico de rios da América do Sul utilizando índices hidrológicos. Tais índices foram calculados a partir de séries de vazões naturais estimadas por modelagem hidrológica 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. Para reduzir o risco de má interpretação dos dados, descrevemos as principais limitações dos índices calculados avaliando o desempenho da modelagem hidrológica na reprodução do regime hidrológico natural dos rios através desses índices. Também será apresentada uma base de dados, disponibilizada em plataforma online, construída através da elaboração de mapas e um arquivo com os rios da América do Sul e seus índices hidrológicos no formato *shapefile ESRI*.

Este estudo visa contribuir para o conhecimento de processos hidrológicos da região da América do Sul e entendimento de como o regime hidrológico se relaciona estes processos, através da análise das características dos regimes de vazões dos rios. Neste contexto, surgem as seguintes questões, que serão abordadas neste trabalho:

- Como características climáticas e hidrogeológicas influenciam no regime de vazões naturais dos rios?
- O que a acurácia dos índices hidrológicos estimados por modelagem hidrológica nos diz sobre o modelo hidrológico utilizado?

## OBJETIVOS

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar o regime hidrológico dos rios da América do Sul com base em séries históricas de vazões naturais estimadas por modelagem hidrológica em escala continental.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliação da modelagem hidrológica continental na representação de índices hidrológicos;
- Caracterizar o regime natural de vazões na América do Sul através de mapas de índices hidrológicos e compreender fatores e processos hidrológicos dominantes;
- Desenvolver base de dados com os índices hidrológicos dos grandes rios da América do Sul.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 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.

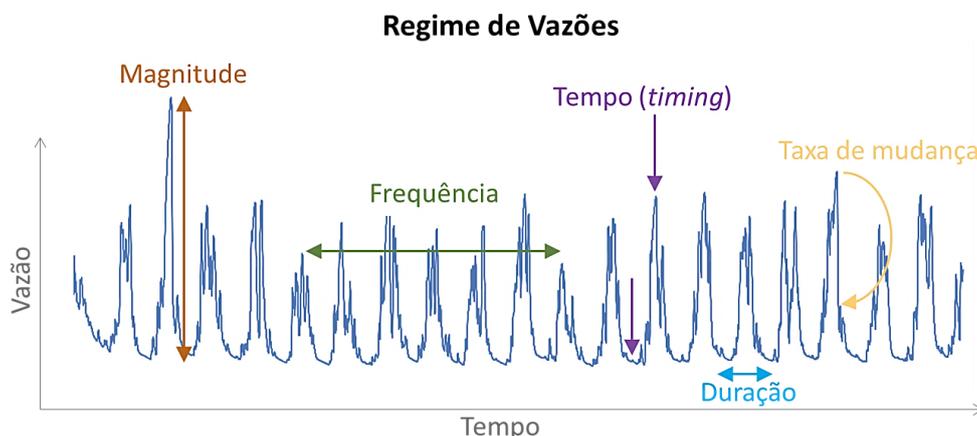


Figura 2. O regime de vazões e suas características principais.

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. Neste trabalho, o regime natural de vazões será caracterizado através de índices hidrológicos.

## 2.2 OBSERVAÇÃO E ESTIMATIVA DE VAZÃO

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, aplicados principalmente para regiões com poucos pontos de monitoramento e que necessitam dessas informações. Nos itens a seguir descrevemos os principais métodos.

### 2.2.1 Medições de vazões *in situ*

Métodos para a determinação da vazão através de medições podem ser mais simples como o uso de flutuadores, mais preciso como o molinete, ou mais sofisticado como o uso de doppler acústico (ADCP), dentre outros. Cada método tem sua limitação de uso, estimativa de erro de medição da vazão e custo-benefício, cabe ao hidrólogo estabelecer o método mais adequado em sua análise. Os dados de vazões observadas, em geral, são coletados através de postos fluviométricos e disponibilizados por plataformas ou instituições operadoras.

Na América do Sul, embora os principais grandes rios sejam monitorados por postos fluviométricos, muitos rios ainda não são e alguns postos fluviométricos possuem dados de vazões com baixa representatividade temporal (Tucci, 2002). Existem vários fatores atribuídos à estas limitações, como a grande cobertura espacial com baixa densidade de estações (Calmant, 2006), difícil acesso a algumas localidades e dificuldades técnicas e financeiras. Estas medições *in situ* tendem a apresentar erros de aproximadamente 6% a 20%, segundo Clark et al. (2008) e Herschy (2002).

As medições de vazão *in situ* são extremamente necessárias para a consolidação de estudos hidrológicos fluviométricos, pois podem ser utilizadas para avaliar a acurácia de métodos de estimativas de vazão, tendo como ideal a rede de monitorando de vazões

existente ser continuamente atendida com manutenção e melhoria nas técnicas de medição e ser expandida para locais não monitorados.

### 2.2.2 Regionalização de vazões

Regionalização pode ser definida, na hidrologia, como a transferência de informação de uma região para outra com semelhante comportamento hidrológico (Bloschl and Sivapalan, 1995; Tucci, 2002). Esta informação pode ocorrer na forma de dados, variáveis hidrológicas, função ou parâmetro. Desta forma, torna-se possível obter a vazão de uma bacia não monitorada a partir das informações pontuais de uma bacia monitorada na mesma região.

Os métodos de regionalização podem ser classificados em: Métodos que regionalizam os parâmetros da distribuição estatística, Métodos que regionalizam o evento com um determinado risco e Métodos que regionalizam uma curva adimensional de probabilidades, denominado método da cheia-índice ou *index-flood* (Tucci, 1993; Naghettini e Pinto, 2007).

Para o método de equações de regressão, podendo ser regionais e globais, que são estimadas com base nas variáveis explicativas de área de drenagem ou precipitação, aplicadas em regiões homogêneas, a CPRM (Serviço Geológico do Brasil) realizou estudos de regionalização de vazões mínimas em diversas bacias hidrográficas do Brasil, como a bacia do Alto São Francisco (Pinto e Alves, 2001), Bacias dos rios Itapicuru, Vaza Barris, Real, Inhambupe, Pojuca, Sergipe, Japaratuba, Subaúma e Jacuípe (Virães, 2013), as bacias litorâneas de Pernambuco e Alagoas (Santos, 2015) e Rio Paraíba do Sul (Melo e Villas Boas, 2017). Nesses estudos, a maioria das equações regionais apresentou um desempenho de resultados com desvio padrão dentro de um limite de erro pré-estabelecido de 25%.

Os métodos de regionalização, em geral, dependem do agrupamento das bacias com similar comportamento hidrológico para que se possa estender os dados regionalizados (Yang et al., 2020). Porém, o agrupamento de bacias com comportamento similar apresenta limitações quando na região não há bacias monitoradas com dados suficientes próximas, e não há a homogeneidade nos atributos fisiográficos e meteorológicos da bacia, por exemplo. A proximidade geográfica não garante a semelhança das bacias hidrográficas e isso não leva necessariamente ao agrupamento de locais hidrológicamente semelhantes. Além disso, as séries de vazões das bacias próximas

monitoradas nem sempre são temporalmente representativas para que se possa utilizar esses métodos com consistência hidrológica (Obregon et al., 1999; Ouarda, 2001).

### **2.2.3 Modelagem hidrológica**

A modelagem visa a representação matemática simplificada de um sistema real, dessa forma, a modelagem hidrológica busca representar processos e descrever o comportamento hidrológico de uma área de interesse. Essas representações do comportamento hidrológico quando reproduzem os processos físicos com base na teoria, são chamados de modelos hidrológicos de base física. Quando essas representações não obtêm uma base física dominante, mas faz o uso de parâmetros calibráveis para ajustar estas representações, são chamados de modelos conceituais (Collischonn, 2001).

Os modelos hidrológicos também podem ser classificados como concentrados ou distribuídos, segundo Tucci (1998). Modelos concentrados consideram todas as variáveis de entrada e de saída como homogêneas e representativas para toda área da bacia. Já os modelos distribuídos consideram que existe uma discretização espacial nas variáveis e parâmetros do modelo.

Nesse sentido, existem modelos que variam em sua complexidade, possuindo diferentes bases teóricas para dar suporte ao fim que foram desenvolvidos. Assim, o modelo a ser utilizado depende do problema a ser avaliado e as saídas do modelo desejadas, para tanto, devem ser consideradas as escalas temporais e espaciais, associadas aos dados disponíveis ou viabilidade de obtenção dos dados necessários.

Os modelos podem ser aplicáveis a pequenas e grandes escalas. Dentro das grandes escalas, as estimativas de vazões comumente são feitas com a aplicação de modelos hidrológicos em escalas continentais e global (Bierkens, 2015; Donnelly et al., 2016; Siqueira et al., 2018) devido a constantes avanços em produtos de sensoriamento remoto, os quais fornecem parâmetros de entrada para estes modelos com boa consistência espacial e temporal. A seguir são apresentados alguns modelos hidrológicos comumente utilizados em estudos de grande escala:

a) SWAT: é um modelo hidrológico conceitual semi-distribuído e temporalmente contínuo, dividido em sub-bacias posteriormente subdivididas em unidades de resposta hidrológica (URHs), com um passo de tempo diário, desenvolvido para simular o impacto de alterações do uso e manejo do solo em bacias hidrográficas de diferentes escalas (Arnold et al., 2012);

b) WaterGAP3: é um modelo conceitual, de balanço hídrico espacialmente distribuído, com resolução espacial em uma grade global de 5 arco-minutos. O modelo é explicitamente projetado para explicar a interferência humana no regime hidrológico natural através da regulação do fluxo e captações de água. Este modelo foi aplicado em uma ampla variedade de estudos de impacto de mudanças globais, por exemplo, inundações e secas (Lehner et al., 2006) e regimes de vazão de rios (Schneider et al., 2013; Döll e Müller Schmied, 2012);

c) LISFLOOD: é um modelo hidrológico chuva-vazão capaz de simular os processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, em escala temporal diária, desenvolvido pelo grupo de inundações do Projeto de Riscos Naturais do Joint Research Centre (JRC) da Comissão Europeia (Van der Knijf et al., 2010);

d) HTESSSEL: é uma melhoria do modelo TESSEL (Van den Hurk et al. 2000), que incluem uma nova hidrologia do solo com escoamento mais realista, uma revisão da parametrização da neve e da evaporação do solo descoberto e uma climatologia mensal variável da indexação da área foliar (IAF) com base nos dados do MODIS (Balsamo et al., 2010);

e) MGB (Modelo de Grandes Bacias): é um modelo semi-distribuído, aplicável para grandes bacias com área maior que 1000 km<sup>2</sup>, em que a bacia hidrográfica é discretizada em minibacias subdivididas em unidades de resposta hidrológica (URHs), e o intervalo de tempo utilizado em geral é o diário (Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn et al., 2007; Fan e Collischonn, 2014; Pontes et al., 2015).

Através de modelagem hidrológica continental utilizando o modelo MGB Siqueira et al. (2018) geraram séries de vazões diárias para as bacias hidrográficas da América do Sul consideradas satisfatórias, com valor médio de 0,6 para o coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE - avalia a eficiência da modelagem variando de 1, que é ótimo, 0 que a previsão não é perfeita e menor que zero e maior que  $-\infty$  que indica que as estimativas são ruins) a com boa eficiência de Kling-Gupta (KGE - é uma fração do NSE e pode variar entre +1 e  $-\infty$ , sendo que quanto mais próximo de 1 mais acurácia possui o modelo), principalmente em grandes rios e áreas úmidas, como ilustra a Figura 3. Comparando esses resultados do MGB com os dos modelos globais HTESSSEL/CaMa-Flood, LISFLOOD e WaterGAP3, esses modelos apresentaram valores negativos de NSE em um grande número de postos fluviométricos (> 60%) e apresentaram desempenhos altamente variáveis quando avaliados em múltiplas estações em grandes bacias.

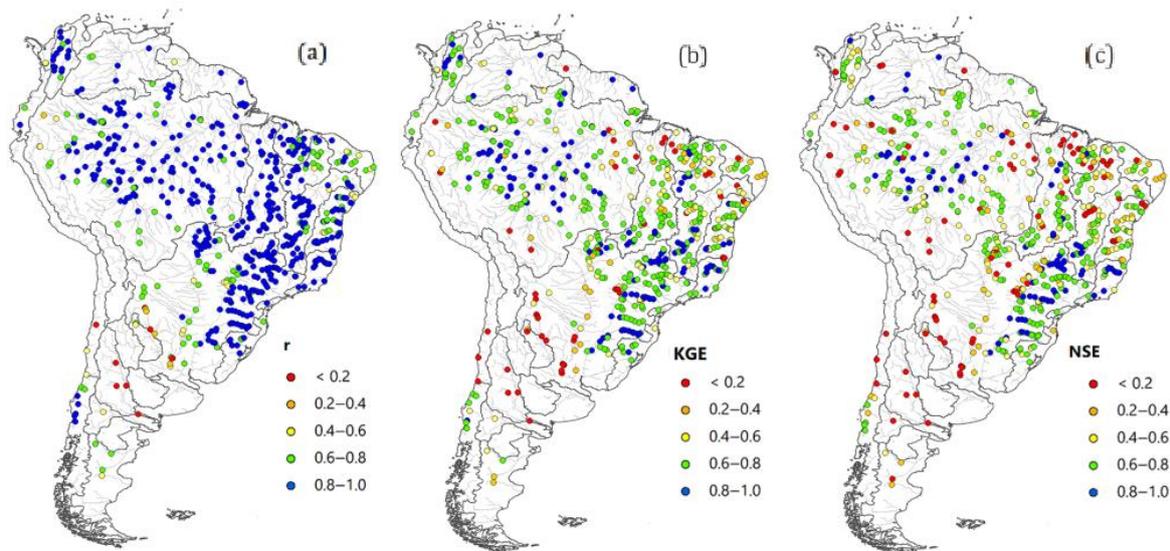


Figura 3. Desempenho das vazões simuladas na América do Sul utilizando o MGB para a) correlação, b) KGE e c) NSE. Fonte: Siqueira et al. (2018).

Estudos utilizando modelagem chuva-vazão (Engeland e Hisdal, 2009; Peterham et al., 2011; Gudmundsson et al., 2012), em outros países, apresentam evidências de que estimativa de vazões mínimas apresentam erros relevantes. Segundo o estudo apresentado por Wongchuig et al. (2020) modelos hidrológicos globais estimam vazões com erros que podem ser da ordem de 52% a 103% (erro de raiz quadrático médio – RMSE) para a região da América do Sul, utilizando os modelos HTESSSEL, LISFLOOD e WaterGAP, com o modelo MGB (Siqueira et al., 2018) os erros foram da ordem de 20 a 80 %, sendo a mediana em torno de 50%. Neste contexto Wongchuig et al (2019) utilizando o modelo MGB demonstraram que o uso de assimilação de dados permite uma melhoria das acurácias nas vazões simuladas, corrigindo o viés na simulação, onde obtiveram melhoras nas vazões diárias simuladas de 40% na validação e NSE de 0,45 e KGE de 0,64.

#### 2.2.4 Sensoriamento Remoto

Existem vários graus de processamento envolvidos na transformação de informações primárias detectadas por produtos do sensoriamento remoto em vazão dos rios, podendo ser obtida indiretamente através de parâmetros hidráulicos como níveis d'água, largura do rio e declividade da linha d'água. Os produtos do sensoriamento remoto também podem ser utilizados na calibração e assimilação em modelos hidráulicos e hidrológicos, empregados no desenvolvimento de curvas-chave junto a medições de vazão in situ (Gleason and Durand, 2020).

Parâmetros hidráulicos como a largura de rios e extensão de água podem ser obtidas dos produtos dos sensores de missões como a LandSAT, MODIS, Sentinel 1, Rapideye, GOES, Alos Palsar e Sentinel 2. O nível da superfície d'água podem ser obtidas de sensores altimétricos como JASON, Topex/Poseidon, Envisat, Saral/Altika, Sentinel, ICESAT 1 e 2.

Através da altimetria espacial é possível obter dados de cota de rios e lagos, sendo possível criar postos fluviométricos virtuais, com equipamentos a bordo de Satélites como o ENVISAT, SARAL-ALTIKA, JASON-2 e JASON-3. Estas informações altimétricas são obtidas através de equipamentos a bordo destes satélites chamados de altímetros. No caso do JASON-2, seu altímetro de radar é denominado POSEIDON-3. No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) apresenta o portal HidroSat (ANA, 2020c), que reúne diversos postos fluviométricos virtuais em localidades onde existe o cruzamento sobre os corpos hídricos das trajetórias desses satélites.

A próxima missão de monitoramento das águas superficiais e topografia de oceanos (SWOT – Surface Water and Ocean Topography), programada para lançamento em 2021, visa melhorar significativamente estimativas espaciais de vazões dos rios (Biancamaria et al., 2016). A missão SWOT reúne comunidades de oceanógrafos e hidrólogos, parceiros internacionais e norte-americanos e franceses para desenvolver esta missão de satélite para fazer o primeiro levantamento global das águas superficiais da Terra, observar os detalhes da topografia da superfície do oceano e medir como as massas de água mudam ao longo do tempo (NASA, 2020) e fornecer dados que podem ser usadas na estimativa das vazões dos rios (Pavelsky et al. 2014), e tem um potencial significativo para melhorar os modelos de previsão de inundações (Frasson et al., 2019).

Durand et al. (2016) desenvolveram algoritmos específicos para transformar essas informações do sensoriamento remoto em estimativas de vazões, e realizando experimentos chegaram a estimar que os erros dessas vazões podem ser da ordem de mais ou menos 35%.

### 2.3 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 trabalho 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).

Uma caracterização global do regime natural de vazões de rios monitorados foi apresentada por Hainess et al. (1988), onde os rios foram classificados espacialmente em 15 grupos. Dentre estes, a América do Sul foi dividida em 9 grupos, como ilustra a Figura 4. Esta classificação foi realizada através de agrupamento de regiões com comportamento similar, utilizando dados de vazões médias mensais. A descrição dos grupos que englobam a América do Sul é apresentada a seguir. O verão foi considerado começando em dezembro para o hemisfério sul e junho para o hemisfério norte.

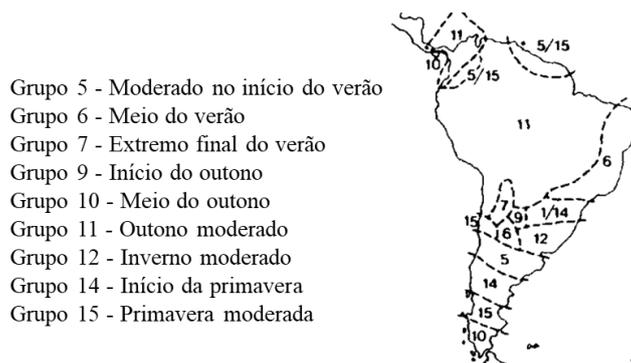


Figura 4. Classificação do regime de vazões da América do Sul (Adaptado de Hainess et al., 1988).

Ouellet Dallaire et al. (2018) apresentam um base de dados com uma caracterização global dos rios denominado GloRiC (Global River Classification), a qual é disponibilizada em formato ESRI *shapefile*, a classificação na América do Sul foi recortada e ilustrada na Figura 5. Na metodologia foi utilizada a base de dados de vazão média mensal e características da bacia do HydroSHEDS (Lehner et al. 2008). A classificação dos rios foi realizada de forma supervisionada em 3 classes: a) hidrológica; b) fisioclimática, e c) geomórfica, e não supervisionada. Os autores salientam que na ausência de dados diários de vazão, os tipos dos rios apresentados dependem da vazão mensal média de longo prazo, tornando os resultados menos específicos para análises de magnitude e sazonalidade de extremos de vazões.

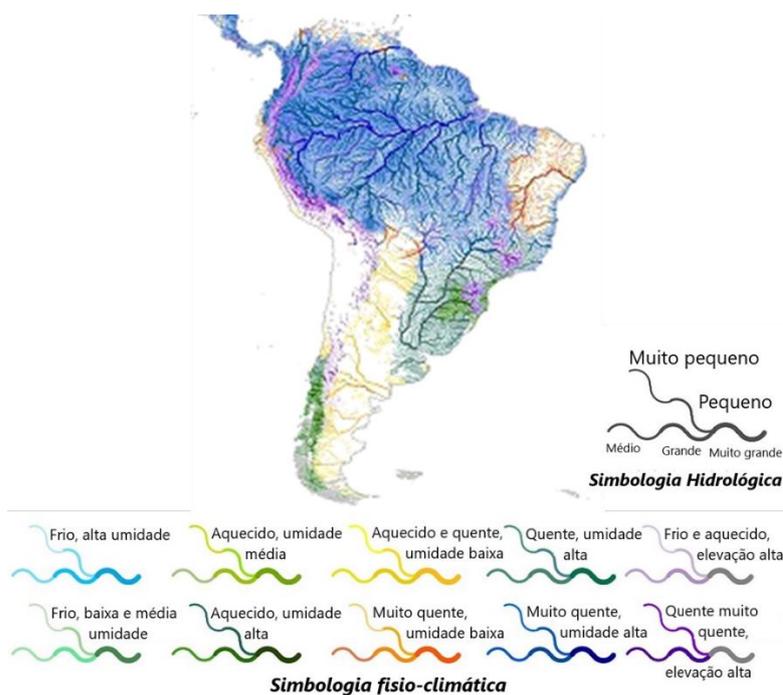


Figura 5. Tipos dos rios da América do Sul baseada em classificação supervisionada. (Adaptado de Ouellet Dallaire et al., 2018).

Estes trabalhos são grandes contribuições no conhecimento do regime hidrológico global, porém não apresentam, por exemplo, caracterização da magnitude e duração de cheias e secas, taxa de mudança nas vazões como ascensão e reversões, que são importantes na caracterização do regime de vazões de regiões com tanta diversidade hidrológica e climática, como as grandes bacias da América do Sul, e para estudos que analisam respostas ecológicas às mudanças no regime de vazões (Poff et al., 1997).

### 2.3.1 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 (IHA)**, **assinaturas hidrológicas** e **vazões de referência**, que são discutidos 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, apresentados na Tabela 1, 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.

Tabela 1. 33 Índices de Alteração Hidrológica (Adaptado de Gao et al., 2009)

Vazão média de janeiro	Vazão média de dezembro	Número de dias com vazão 0
Vazão média de fevereiro	Vazão mínima de 1 dia	Índice de vazão de base
Vazão média de março	Vazão mínima de 3 dias	Data da vazão mínima
Vazão média de abril	Vazão mínima de 7 dias	Data da vazão máxima
Vazão média de maio	Vazão mínima de 30 dias	Frequência de pulsos baixos
Vazão média de junho	Vazão mínima de 90 dias	Duração de pulsos baixos
Vazão média de julho	Vazão máxima de 1 dia	Frequência de pulsos altos
Vazão média de agosto	Vazão máxima de 3 dias	Duração de pulsos altos
Vazão média de setembro	Vazão máxima de 7 dias	Taxa de ascensão
Vazão média de outubro	Vazão máxima de 30 dias	Taxa de recessão
Vazão média de novembro	Vazão máxima de 90 dias	Número de reversões

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 mensais; magnitude das vazões extremos; sazonalidade das vazões extremas; 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. Além de serem índices para avaliar alterações, também são considerados como índices hidrológicos que resumem alguns aspectos do regime de vazões dos rios.

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 2 apresenta uma relação entre algumas assinaturas hidrológicas com características do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Tabela 2. Assinaturas Hidrológicas e suas relações com características hidrológicas de bacias.

<b>Assinatura hidrológica</b>	<b>Característica hidrológica relacionada</b>	<b>Referência</b>
Coefficiente 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  $Tr$  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., 2020a).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho, apresentada no fluxograma da Figura 6, consistiu primeiramente 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.

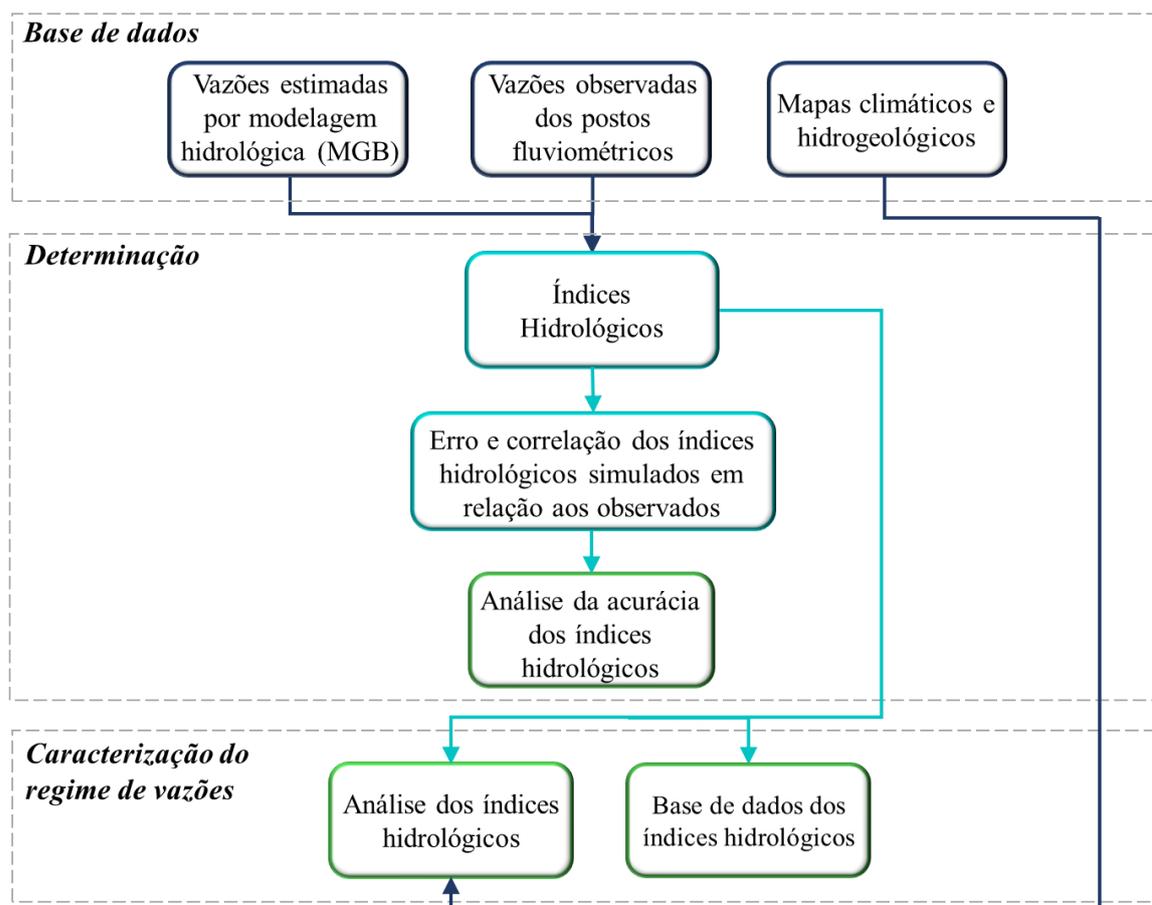


Figura 6. Fluxograma geral da proposta metodológica trabalho.

### 3.1 VAZÕES ESTIMADAS POR MODELAGEM HIDROLÓGICA

Neste estudo, 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 convertidas 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.

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.

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.

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 7, com comprimento médio de 15 km. Desta forma, será possível caracterizar o regime de vazões em dezenas de milhares de locais.

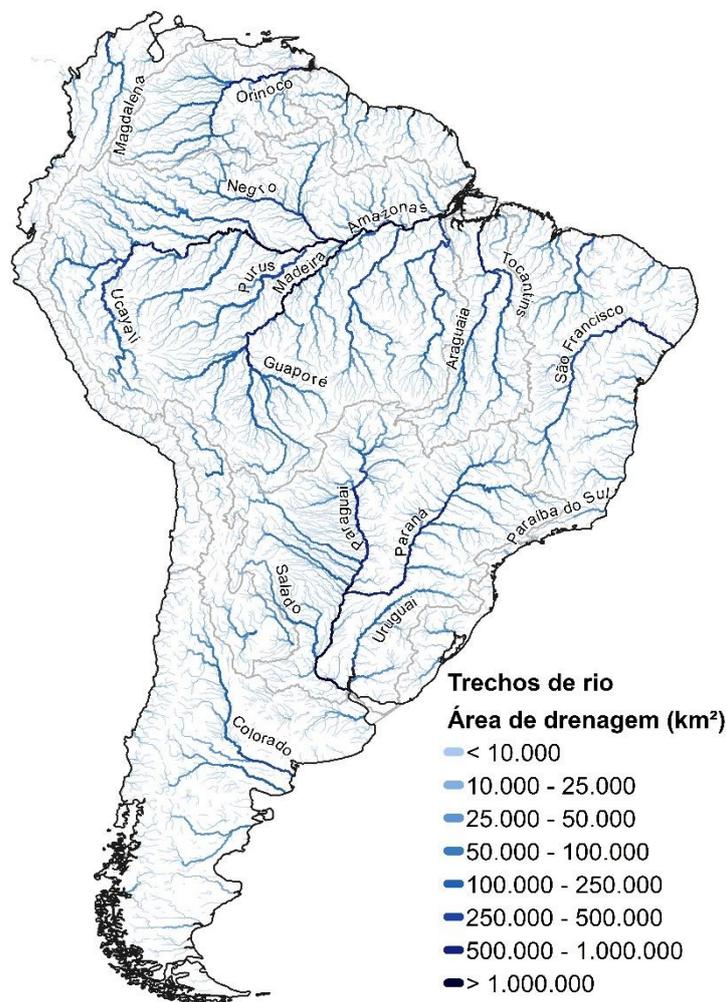


Figura 7. Discretização dos rios em 33 mil trechos, obtidos na modelagem hidrológica da América do Sul.

### 3.2 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 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 3. As séries de vazões observadas foram utilizados neste trabalho como referência para a avaliação da acurácia dos resultados obtidos para os índices hidrológicos com as vazões estimadas.

Tabela 3. Base de dados das vazões observadas utilizadas.

<b>Serviço hidrológico</b>	<b>Fonte de dados</b>	<b>Quantidade de postos</b>
Agência Nacional de Águas - ANA (Brasil)	ANA/Brazil: <a href="http://www.snirh.gov.br/hidroweb">http://www.snirh.gov.br/hidroweb</a>	1104
Operador Nacional do Serviço Elétrico – ONS (Brasil)	ONS/Brazil: <a href="http://ons.org.br/">http://ons.org.br/</a>	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: <a href="http://www.ore-hybam.org">http://www.ore-hybam.org</a>	17
<i>Instituto Nacional del Agua - INA (Argentina)</i>	INA/Argentina: <a href="http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar">http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar</a>	33
<i>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (Colômbia)</i>	IDEAM/Colombia: <a href="http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion">http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion</a>	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>	<a href="http://www.bafg.de/GRDC/">http://www.bafg.de/GRDC/</a>	5
<i>Dirección General de Aguas - DGA (Chile)</i>	DGA/Chile: <a href="http://snia.dga.cl/BNAConsultas">http://snia.dga.cl/BNAConsultas</a>	10
<b>Total</b>		<b>1329</b>

### 3.2.1 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 3, 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) m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s ocorrem na vizinhança de falhas ou se a vazão no dia anterior for maior do que 50 m<sup>3</sup>/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 neste trabalho.

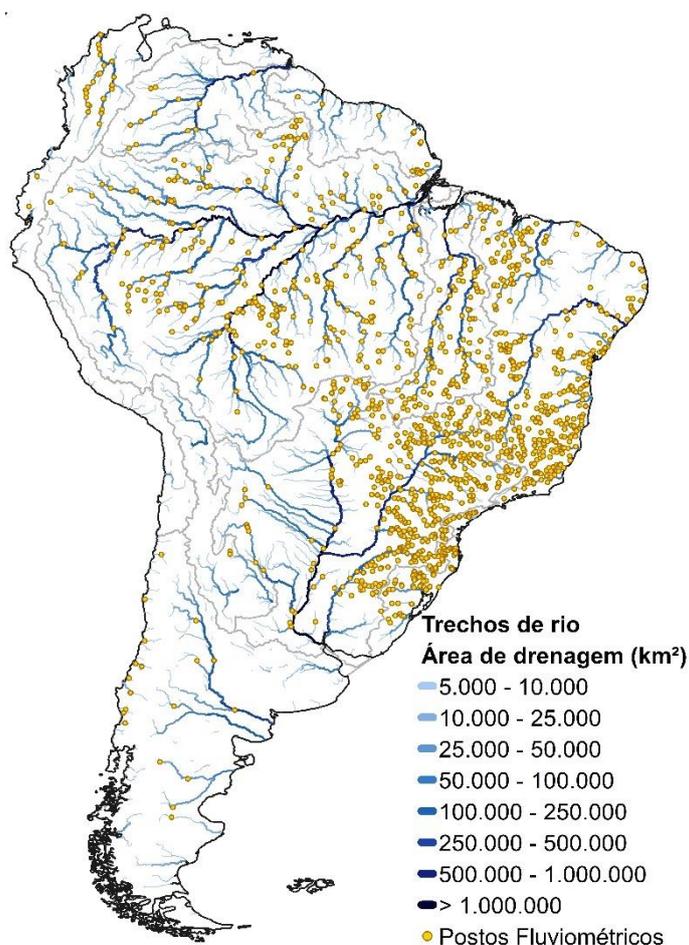


Figura 8. Postos fluviométricos utilizados para as análises deste trabalho.

### 3.3 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 9, como ferramenta para compreender o comportamento dos rios em relação a alguns índices hidrológicos.

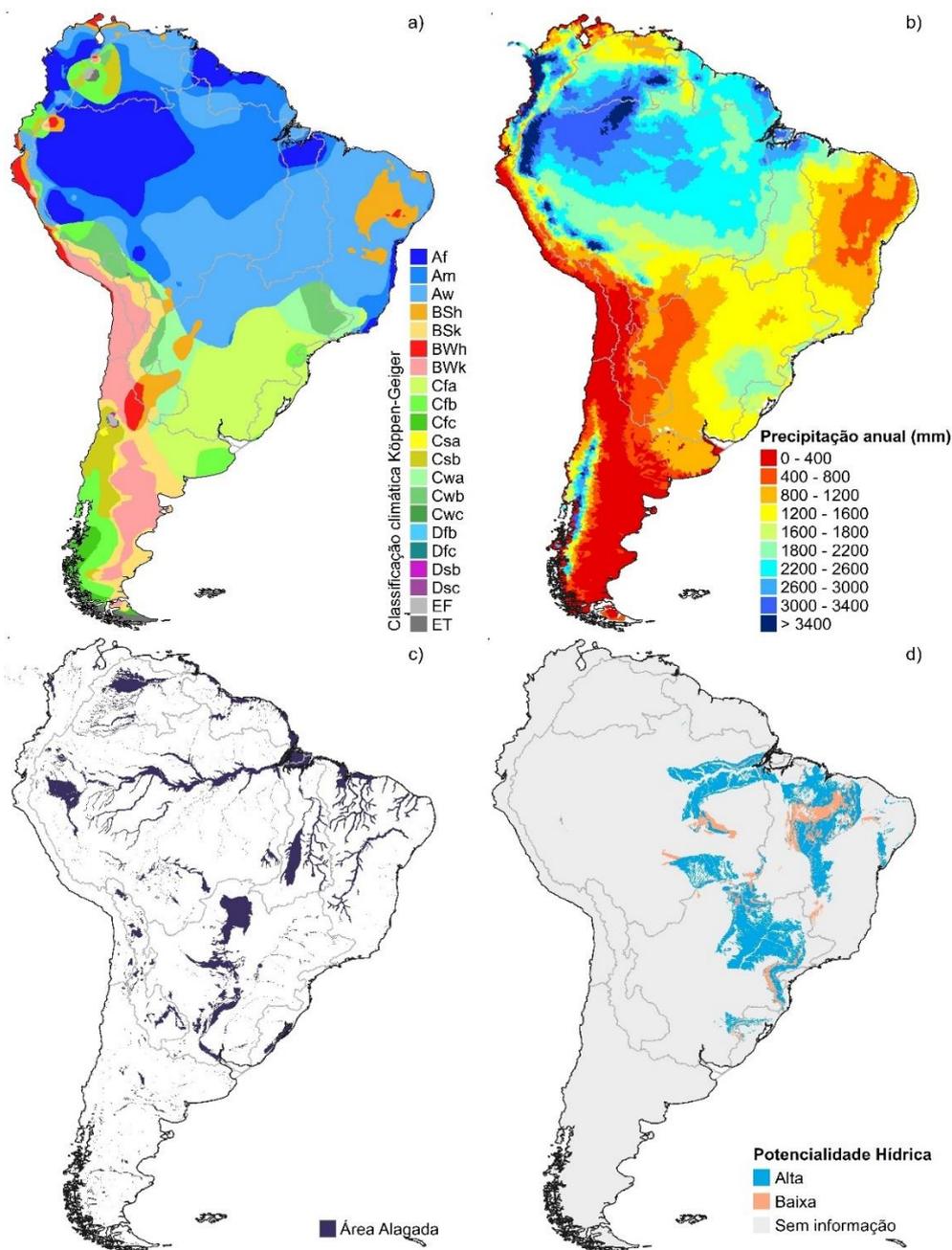


Figura 9. Mapas da América do Sul mostrando a) Classificação climática de Köppen-Geiger, adaptado de Peel et al. (2007), b) Chuva média anual em mm obtida do MSWEP v2.0. Fonte: Adaptado de Beck et al. (2019), c) Áreas alagadas e regiões baixas obtida do Global Lakes and Wetlands Database (GLWD-3), adaptado de Lehner e Döll (2004) e d) Potencialidade hídrica do Mapa de domínios e subdomínios hidrogeológicos do Brasil. Fonte: Adaptado de CPRM (2007).

### 3.4 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 Apêndice C deste trabalho e no repositório do GITHUB: [https://github.com/Larissacr/hydrological\\_signatures](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.

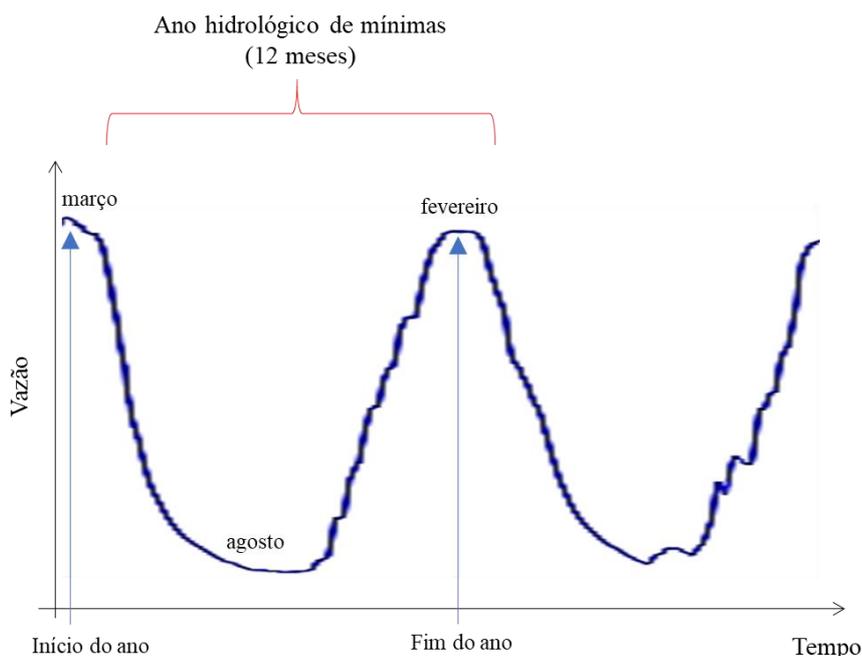


Figura 10. Exemplo de ano hidrológico de mínimas.

O ano hidrológico de máximas, ilustrado na Figura 11, 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.

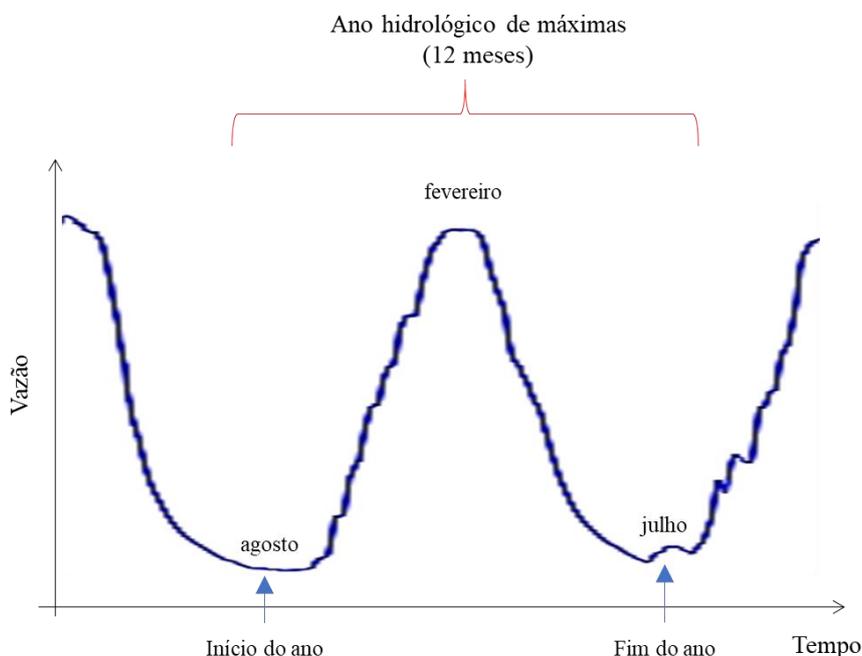


Figura 11. Exemplo de ano hidrológico de máximas.

Os índices hidrológicos calculados neste trabalho são descritos como 27 dos IHA apresentados na Tabela 1, 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 trabalho. As descrições metodológicas de como foram calculados cada índice hidrológico encontram-se nos tópicos seguintes.

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 na Tabela 4.

Tabela 4. Índices hidrológicos separados em grupos (Adaptado de Black et al., 2005).

<b>Grupo</b>	<b>Índice hidrológico</b>
G1 - Magnitude das vazões médias	Média da vazão diária mensal de janeiro a dezembro
	Vazão média ( $Q_m$ )
	Coeficiente 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)	
Coeficiente de recessão da vazão de base (k)	

### 3.4.1 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.

### **3.4.2 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.

### **3.4.3 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.

### **3.4.4 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.

#### **3.4.5 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.

#### **3.4.6 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.

#### **3.4.7 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.

### 3.4.8 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.

### 3.4.9 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). A Tabela 5 apresenta valores de referência para este índice. 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.

Tabela 5. Valores de referência para o índice da vazão de base.

<b>Região</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Brasil	0,4 a 0,97	-	David et al. (2019)
Brasil	0,5 a 0,8	-	Chagas et al. (2020)
América do Sul	0,49 a 0,77	-	Beck et al. (2013)
América do Sul	0,45 a 0,78	-	Beck et al. (2015)

### 3.4.10 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. A Tabela 6 apresenta valores de referência para este índice. 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  $t-1$ .

Tabela 6. Valores de referência para o coeficiente de recessão da vazão de base.

Região	Valores	Unidade	Referência
América do Sul	25 a 3,7	dias	Beck et al. (2013)
América do Sul	16,7 a 3,1	dias	Beck et al. (2015)

### 3.4.11 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. A Tabela 7 apresenta valores de referência para este

índice. 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.

Tabela 7. Valores de referência para o coeficiente de escoamento.

<b>Região</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Brasil	0 a 1,09	-	David et al. (2019)
Brasil	0,15 a 0,55	-	Chagas et al. (2020)
América do Sul	0,06 a 0,60	-	Beck et al. (2015)

#### 3.4.12 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 ( $S_{FDC}$ ) 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). A Tabela 8 apresenta valores de referência para este índice. 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%.

Tabela 8. Valores de referência para a inclinação da curva de permanência das vazões.

Região	Valores	Unidade	Referência
Brasil	0,4 a 7,5	-	David et al. (2019)
Brasil	1,2 a 2,9	-	Chagas et al. (2020)

### 3.4.13 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;  $\Delta Q$  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  $\Delta Q$  é negativo; e pos indica o número de intervalos de tempo em que  $\Delta Q$  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).

### 3.4.14 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 interanual 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. A Tabela 9 apresenta valores de referência para este índice.

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

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.

Tabela 9. Valores de referência para a elasticidade da vazão.

Região	Valores	Unidade	Referência
Brasil	0,2 a 5,0	-	David et al. (2019)
Brasil	1 a 2,3	-	Chagas et al. (2020)

### 3.4.15 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 áridas. A Tabela 10 apresenta valores de referência para este índice. 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.

Tabela 10. Valores de referência para o índice de aridez.

<b>Região</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Brasil	0,3 a 2,3	-	David et al. (2019)
Brasil	0,5 a 1	-	Chagas et al. (2020)

### 3.4.16 Vazão média (Q<sub>m</sub>)

Este índice representa a vazão média mensal. A Tabela 11 apresenta valores de referência para este índice. 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<sub>m</sub> é a vazão média; Q é a vazão diária; e N é o número de dias da série temporal de vazões.

Tabela 11. Valores de referência para a vazão média.

<b>Região</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Brasil	3 a 5	mm/dia	Chagas et al. (2020)

### 3.4.17 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. A Tabela 12 apresenta valores de referência para este índice. 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.

Tabela 12. Valores de referência para a frequência e duração de vazões altas e baixas.

<b>Região</b>	<b>Índice</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Brasil	Frequência de vazões altas	0,1 a 15	%	Chagas et al. (2020)
	Duração de vazões altas	0,1 a 5	dias/ano	
	Frequência de vazões baixas	0,1 a 100	%	
	Duração de vazões baixas	0,1 a 20	dias/ano	

#### 3.4.18 Vazão máxima de referência (Q<sub>5</sub>)

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). A Tabela 4 apresenta valores de referência para este índice.

Tabela 13. Valores de referência para a vazão máxima de referência Q<sub>5</sub>.

<b>Região</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Brasil	1,5 a 7,0	mm/dia	Chagas et al. (2020)
América do Sul	0,29 a 12,88	mm/dia	Beck et al. (2015)

#### 3.4.19 Vazão mínima de referência (Q<sub>95</sub>)

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). A Tabela 14 apresenta valores de referência para este índice.

Tabela 14. Valores de referência para a vazão mínima de referência  $Q_{95}$ .

<b>Região</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Brasil	0 a 2,6*	mm	David et al. (2019)
Brasil	0,10 a 0,65	mm/dia	Chagas et al. (2020)
América do Sul	0,01 a 0,88	mm/dia	Beck et al. (2015)

\* Valores para  $Q_{90}$

### 3.4.20 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). A Tabela 15 apresenta valores de referência para este índice.

Tabela 15. Valores de referência para a vazão máxima de referência  $Q_{10}/Q_{50}$ .

<b>Região</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Referência</b>
Brasil	1 a 9,9	mm	David et al. (2019)

## 3.5 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.

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

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,  $A$  [km<sup>2</sup>] 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.

## 4 RESULTADOS

Os resultados deste trabalho são apresentados em três tópicos principais: 4.1) Análise da acurácia de índices hidrológicos estimados a partir de vazões obtidas por modelagem hidrológica; 4.2) Análise dos índices hidrológicos e 4.3) 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 12 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 3.1 deste trabalho), para que possam ser usados como ferramenta para compreender o comportamento dos rios em relação a alguns índices hidrológicos.

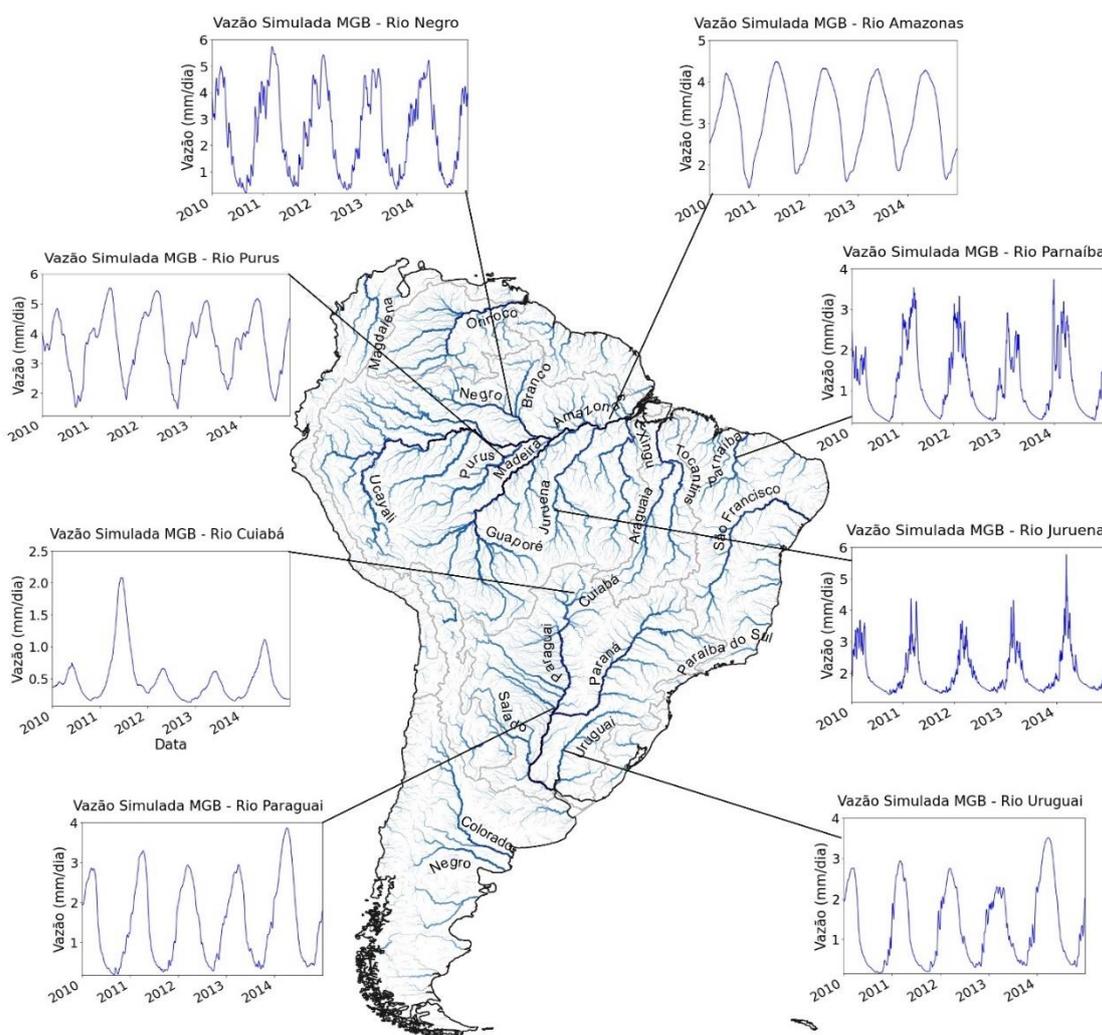


Figura 12. Exemplos de hidrogramas de vazões estimadas por modelagem hidrológica de rios da América do Sul.

#### 4.1 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.

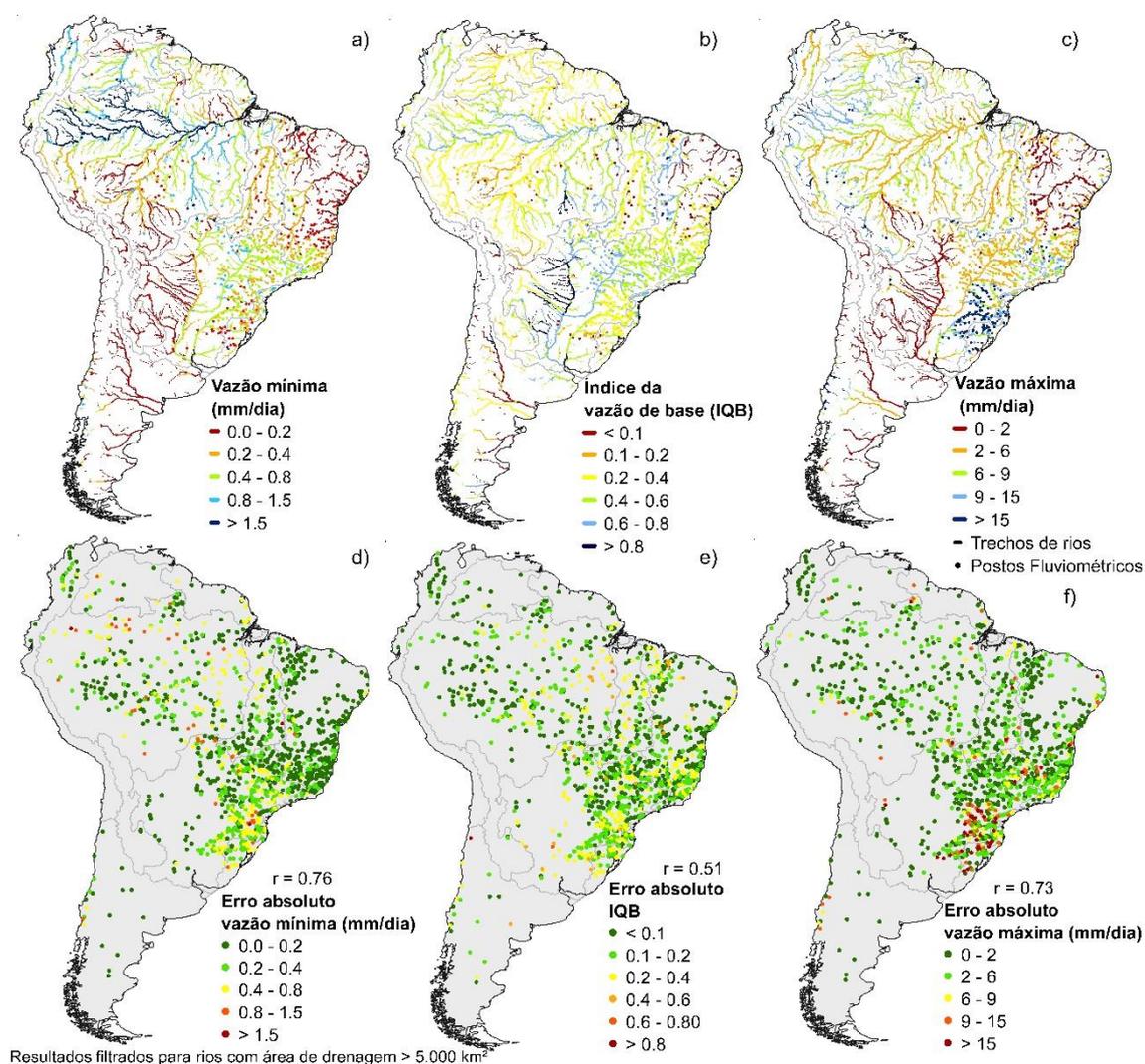


Figura 13. Resultado do cálculo de alguns índices hidrológicos do grupo G2, e seus respectivos erros absolutos (EA).

Para o índice de vazão mínima, ilustrado na Figura 13a, 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 13d 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 9a). A região do Sul do Brasil está localizada em região climática subtropical úmida Cfa.

Na Figura 13b 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 13d) nos permite visualizar que a maioria dos pontos apresenta erro absoluto de menos de 0,2.

No índice de vazão máxima, ilustrado na Figura 13c, 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 13f, destacamos a região Sul do Brasil com concentração de erros de maior magnitude.

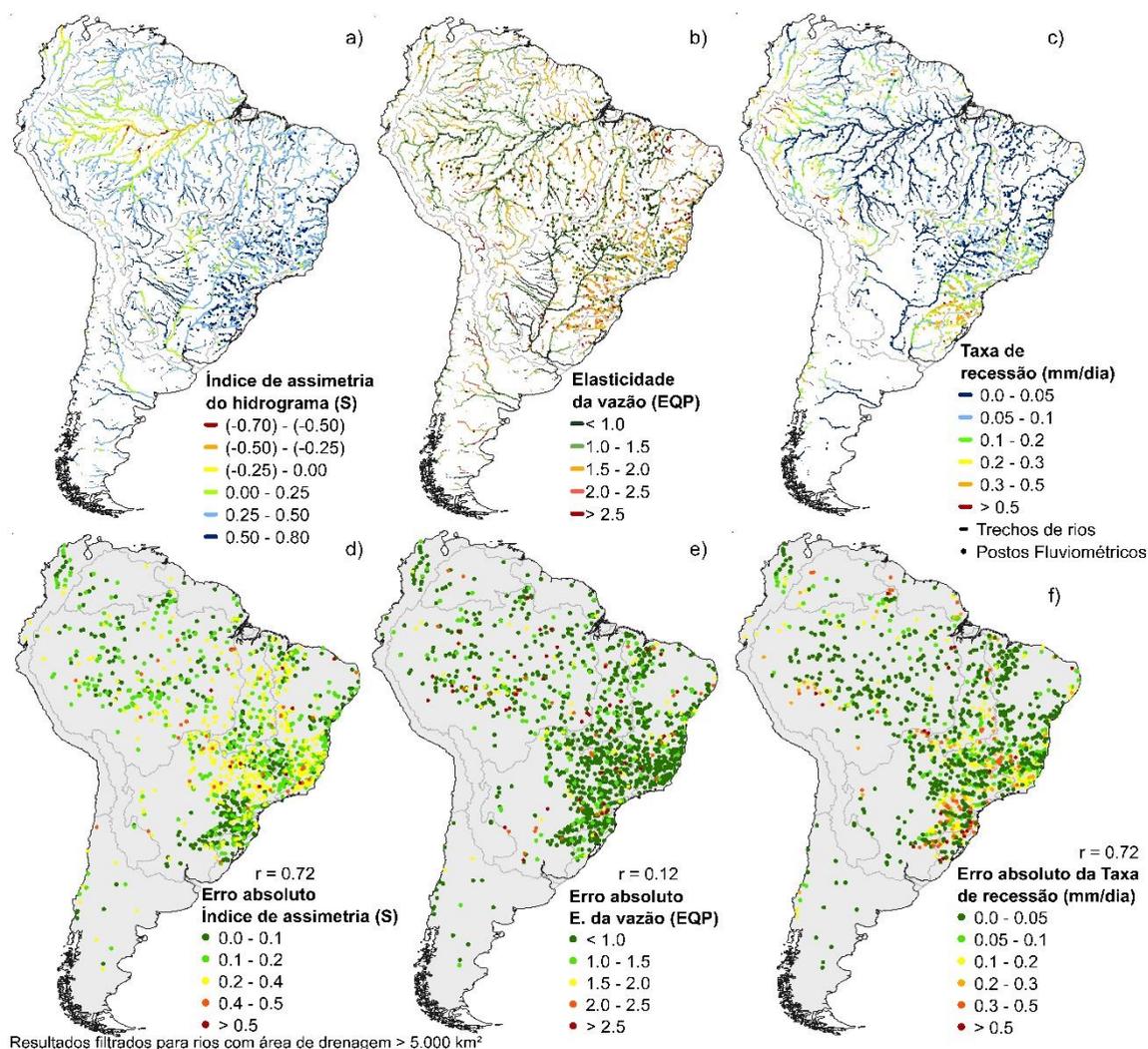


Figura 14. Resultado do cálculo de alguns índices hidrológicos do grupo G4, e seus respectivos erros absolutos (EA).

Na Figura 14a 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 14d). Esta região não possui muitas áreas alagadas (Figura 9c). 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 14b, 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 14e).

No índice da taxa de recessão, ilustrado na Figura 14c, 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 9a). Estas regiões também são as que têm a maior densidade de postos fluviométricos utilizados para esta análise.

#### 4.1.1 Visão geral da acurácia

Para termos uma visão geral da acurácia dos índices calculados a partir das vazões simuladas, obtivemos as médias das medianas dos erros relativos (ER) em relação aos grupos em que os índices hidrológicos foram categorizados G1, G2, G3 e G4, apresentadas na Figura 15.

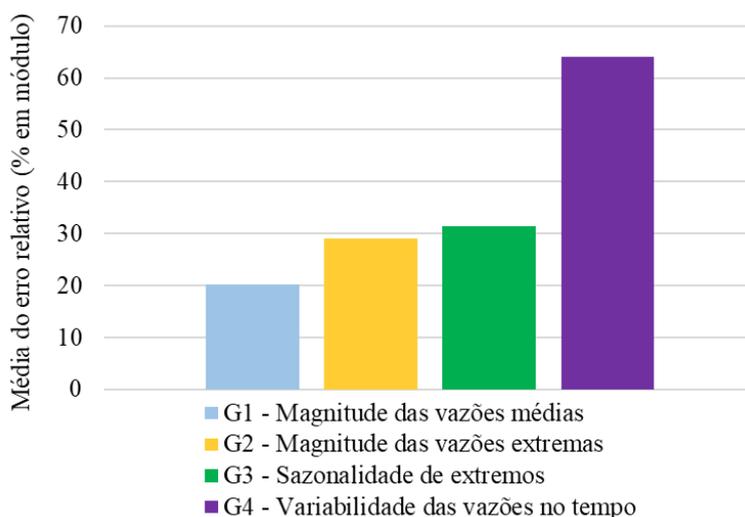


Figura 15. Média dos erros dos índices separados por grupos.

Nesta análise por grupos, temos que o grupo G4 obteve a maior média 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 18 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 16 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 16. Correlação calculada de alguns dos índices hidrológicos.

Índice hidrológico	Mediana do erro relativo - ER (%)	Correlação
Vazão média	24,34	0,89
Coefficiente de Escoamento (RQP)	33,88	0,77
Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)	36,15	0,04
Vazão máxima de referência Q <sub>5</sub>	27,37	0,83
Vazão mínima de referência Q <sub>95</sub>	49,29	0,83
Vazão mínima de 1 dia	39,50	0,76
Coefficiente de variação da vazão mínima de 1 dia	34,10	0,20
Vazão máxima de 1 dia	17,90	0,73
Coefficiente 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
<b>Mediana</b>	<b>34,10</b>	<b>0,73</b>

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 17 apresenta a mediana do erro relativo (ER) de índices hidrológicos em módulo (%) para bacias hidrográficas da América do Sul. A Figura 16 ilustra as bacias hidrográficas utilizadas para esta análise.



Figura 16. Bacias hidrográficas da América do Sul.

Na Tabela 17 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

Q10/Q50 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 17. 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 17. Mediana do erro relativo (%) dos índices hidrológicos para bacias hidrográficas da América do Sul.

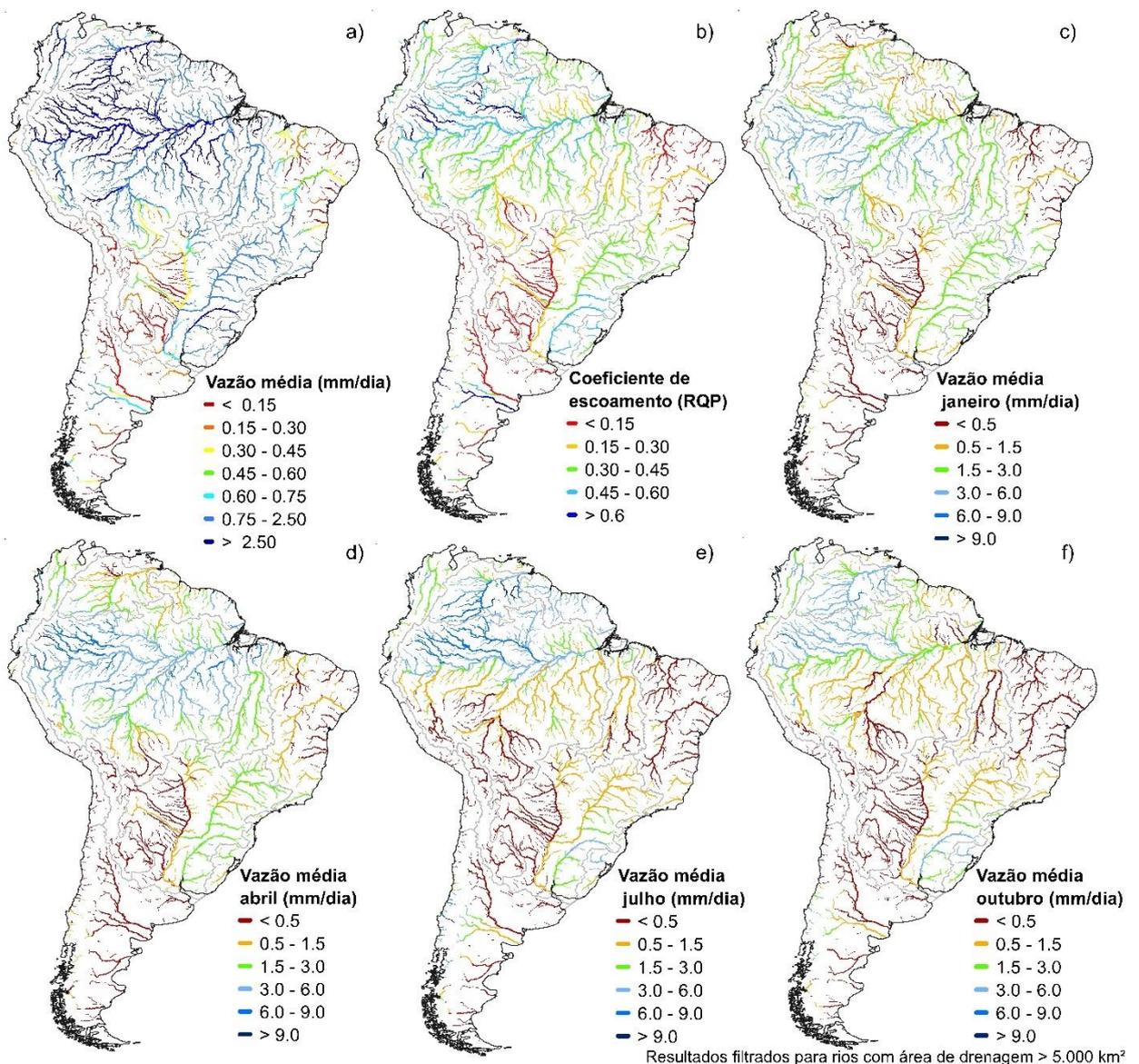
Índice hidrológico	Mediana do erro relativo de cada índice hidrológico em módulo (%)						
	São Francisco	Tocantins-Araguaia	Colorado	Magdalena	Negro (Argentina)	Orinoco	Prata
Vazão média	20.64	21.00	82.60	17.55	6.83	45.53	20.17
Coefficiente de Escoamento (RQP)	36.92	33.54	74.90	17.95	184.17	36.24	32.35
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

## 4.2 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.

### 4.2.1 Magnitude das vazões médias (G1)

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



são

Figura 17. Índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões médias (G1).

Os resultados da vazão média podem ser visualizados na Figura 17a, 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 9b. 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 9b, que fica ao lado do deserto da Patagônia, que possui um baixo índice pluviométrico.

O coeficiente de escoamento (RQP) é apresentado na Figura 17b. Em geral, nas regiões mais úmidas (como indica o mapa climático da Figura 9a) obtemos maiores valores deste índice e em regiões mais áridas obtemos valores menores do RQP. Temos o exemplo do Rio Negro, com  $\text{RQP} > 0,6$  e está localizado em uma região de clima úmido, e do Rio Parnaíba, com  $\text{RQP} < 0,15$ , 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 9a. 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 9b) e no mapa climático (Figura 9a) 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 17c, 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 17.

#### **4.2.2 Magnitude das vazões extremas (G2)**

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões extremas estão apresentados na Figura 18. Os demais resultados deste grupo encontram-se disponíveis no Apêndice A.

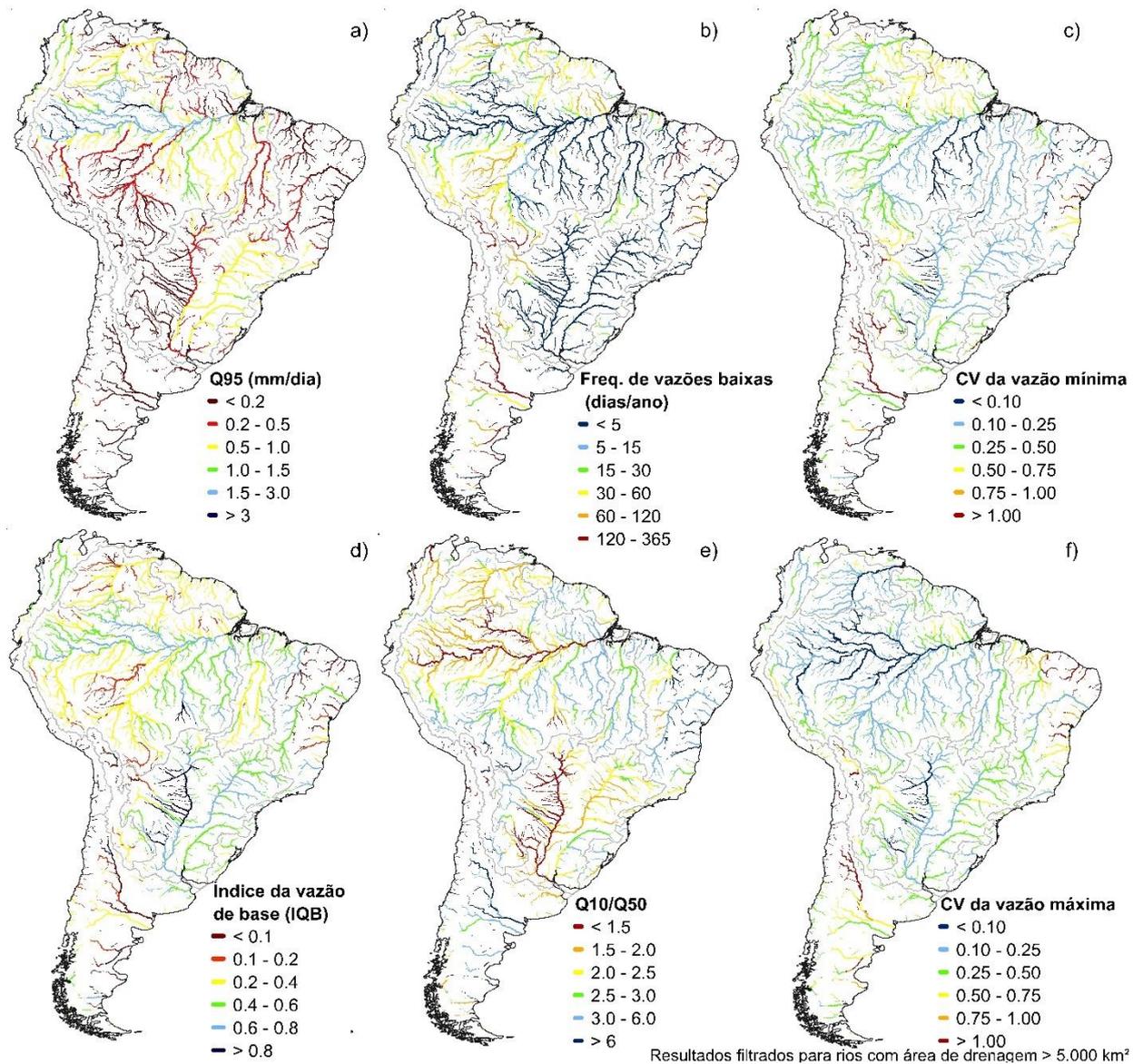


Figura 18. Índices hidrológicos do grupo de magnitude de vazões extremas (G2).

Na análise dos resultados obtidos da vazão de referência mínima  $Q_{95}$  (Figura 18) 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 18b, 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 apresentada na Figura 20d.

O coeficiente de variação da vazão mínima (Figura 18c) 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 12, 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 12, temos uma maior variação da vazão mínima ao longo dos anos.

A Figura 18d 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 9d. 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 18) 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 18f) 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 12, há uma maior estabilidade das vazões altas, o comportamento inverso é obtido no hidrograma do Rio Parnaíba.

### **4.2.3 Sazonalidade de extremos (G3)**

Os resultados selecionados para análise dos índices hidrológicos do grupo de sazonalidade de extremos estão apresentados na Figura 19. Os demais resultados deste grupo encontram-se disponíveis no Apêndice A.

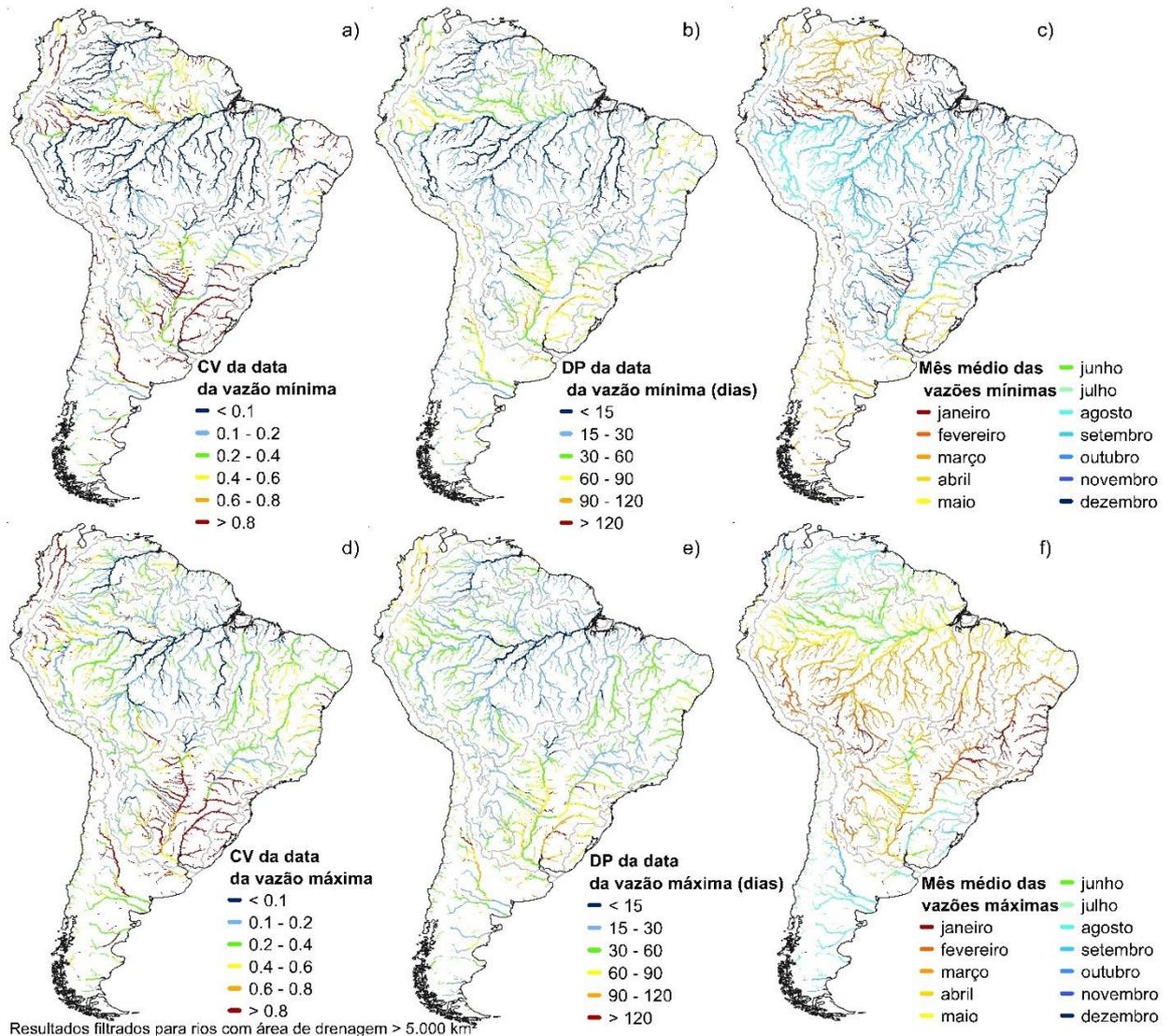


Figura 19. Índices hidrológicos do grupo sazonalidade de extremos (G3).

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 19a e 19d) a vazão máxima (Figura 19b 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 19c e 19f estão apresentados os mapas dos meses em que ocorrem com mais frequência as vazões mínimas/máximas.

Na Figura 19 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.

#### 4.2.4 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 20. Os demais resultados deste grupo encontram-se disponíveis no Apêndice A.

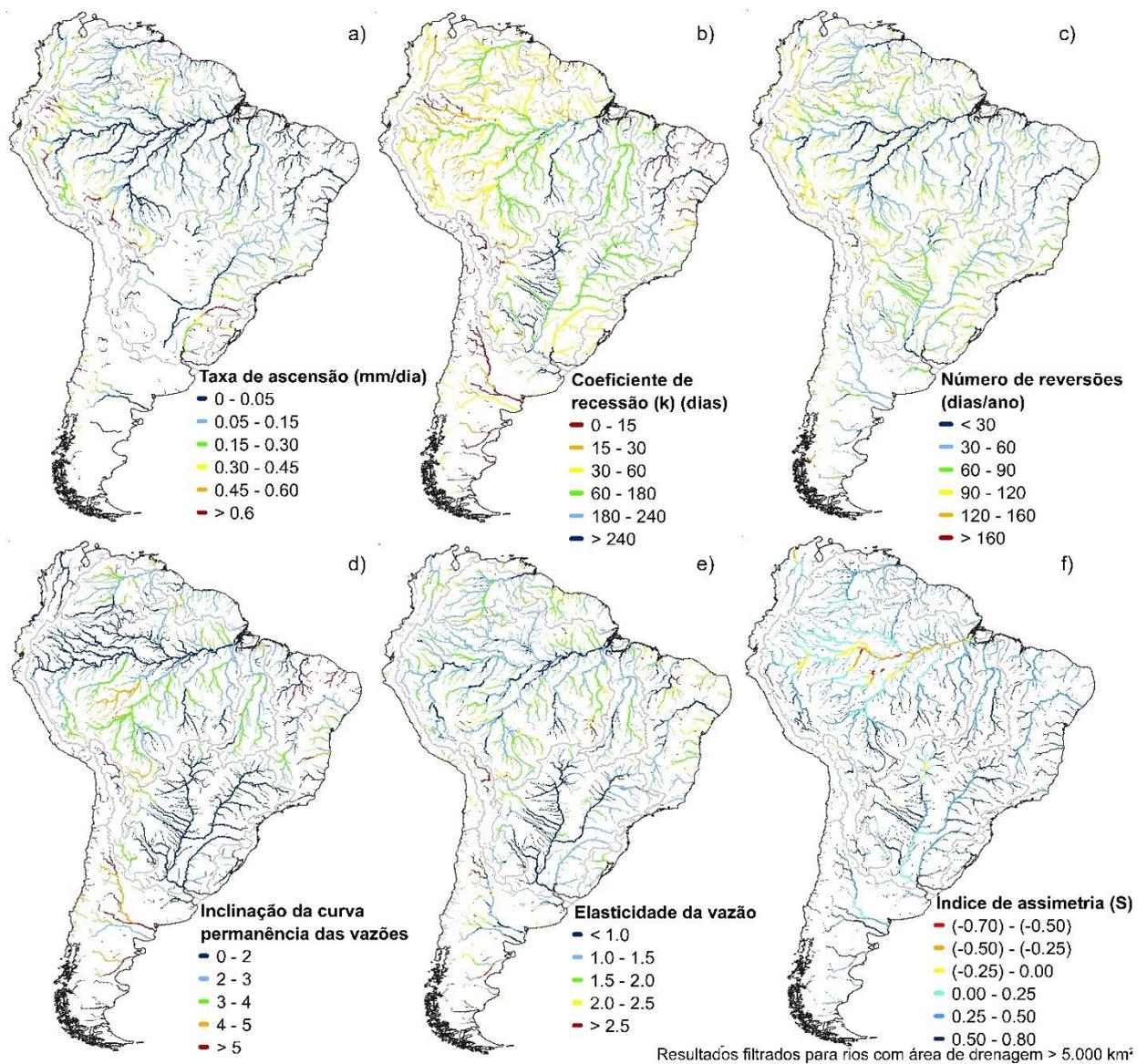


Figura 20. Índices hidrológicos do grupo de variabilidade das vazões no tempo (G4).

Nos índices de taxas de ascensão (Figura 20a) 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 20b são apresentados os resultados do índice do coeficiente de recessão ( $k$ ). Comparando o índice  $k$  com a Figura 9d, 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 18d.

O índice do número de reversões, apresentado na Figura 20c, representa uma mudança no de acréscimo ou decréscimo das vazões dos rios. Se compararmos os hidrogramas (Figura 12) 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 20d) 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 20e) 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 20f 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 12) temos a assimetria negativa, o que é um indicativo de regiões com planícies inundáveis. Na Figura 9c 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.

#### 4.3 BASE DE DADOS

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, inclusive de rios que ainda não têm esse tipo de informação hidrológica. A base de dados se encontra disponível para download 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/](https://www.ufrgs.br/hge/modelos-e-outros-produtos-hydrologic_indices_sa/).

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve o objetivo de realizar a caracterização do regime natural de vazões dos rios da América do Sul através do cálculo e análise de índices hidrológicos. Também foi realizada a análise da acurácia de índices hidrológicos estimados a partir de vazões obtidas por modelagem hidrológica e desenvolvida uma base de dados com esses índices.

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, inclusive de rios que ainda não têm esse tipo de informação hidrológica. A base de dados está disponível em plataforma *online* de livre acesso.

Na introdução deste trabalho foram levantadas as perguntas: 1) Como características climáticas e hidrogeológicas influenciam no regime de vazões naturais dos rios?; 2) O que a acurácia dos índices hidrológicos estimados por modelagem hidrológica nos diz sobre o modelo hidrológico utilizado?. Para a pergunta número 1, a resposta pode estar na análise dos índices hidrológicos calculados, onde foram observados padrões emergentes nos comportamentos de alguns índices sob diferentes características climáticas e hidrogeológicas. A resposta da pergunta 2 pode estar nos resultados da acurácia dos índices hidrológicos, calculados utilizando vazões estimadas pela modelagem hidrológica, empegando o modelo MGB, onde temos que, em geral

a acurácia foi considerada satisfatória, porém com menor precisão para os índices do grupo G4, que representam a variabilidade das vazões no tempo.

Com isto, podemos concluir que as séries de vazões estimadas por modelagem hidrológica possuem representações satisfatórias dos índices hidrológicos apresentados. Dentre as contribuições deste trabalho, podemos destacar a apresentação dos índices hidrológicos e sua base de dados. Este trabalho poderá ser utilizado como uma ferramenta para o conhecimento de processos hidrológicos e como suporte aos instrumentos de políticas de recursos hídricos dos países da América do Sul.

Para perspectivas futuras, este trabalho pode contribuir com a busca de respostas para perguntas como: 1) Quais são os fatores dominantes que regem os regimes de vazões dos rios da América do Sul; 2) Rios com características climáticas e hidrogeológicas semelhantes possuem um regime de vazões semelhante? Ademais, pode ser utilizado para avaliar a possibilidade de utilizar índices hidrológicos na calibração de modelos hidrológicos para as bacias da América do Sul em escalas regionais e continental.

## 6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

- 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). *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](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). *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](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). *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.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Kannan, N. *SWAT: Model use, calibration, and validation*. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. 2012.
- Balsamo, G., Dutra, E., Stepanenko, V. M., Viterbo, P., Miranda, P., & Mironov, D. *Deriving an effective lake depth from satellite lake surface temperature data: a feasibility study with MODIS data*. 2010
- Beck, H. E., De Roo, A., & van Dijk, A. I. *Global maps of streamflow characteristics based on observations from several thousand catchments*. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1478-1501. 2015.
- 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.
- Bloschl G, Sivapalan M. *Scale issues in hydrological modelling—a review*. Hydrological Processes 9: 251–290. 1995.
- Bloschl, G., Sivapalan, M., Savenije, H., Wagener, T., & Viglione, A. (Eds.). *Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press. 2013.
- 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).
- 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.
- Calmant, S., & Seyler, F. *Continental surface waters from satellite altimetry*. Comptes Rendus Geoscience, 338(14-15), 1113–1122. 2006. doi:10.1016/j.crte.2006.05.012
- 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.
- Clark, M.P., Rupp, D.E., Woods, R.A., Zheng, X., Ibbitt, R.P., Slater, A.G., Schmidt, J., Uddstrom, M.J., 2008. *Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model*. *Adv. Water Resour.* 31, 1309–1324. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.06.005>.
- Collischonn, W., & Fan, F. M. (2012). Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. *Hydrological Processes*, 27(18), 2614–2622. doi:10.1002/hyp.9391
- 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.
- Costanza, R., Wainger, L., Folke, C., and Mäler, K.-G. *Modeling Complex Ecological Economic Systems: Toward an Evolutionary, Dynamic Understanding of People and Nature*. *Ecosystem Management*, Springer New York, New York, NY, 148–163. 1993.
- 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.
- Donnelly, C., Andersson, J. C. M., and Arheimer, B. *Using flow signatures and catchment similarities to evaluate the E-HYPE multi-basin model across Europe*. *Hydrolog. Sci. J.-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 61, 255–273, 2016. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1027710>.

- Durand, Michael et al. *An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope*. *Water Resources Research*, v. 52, n. 6, p. 4527-4549, 2016.
- Eckhardt K. 2005. *How to construct recursive digital filters for baseflow separation*. *Hydrological Processes* 19: 507–515. DOI:10.1002/hyp.5675
- Engeland, K. and Hisdal, H.: *A Comparison of Low Flow Estimates in Ungauged Catchments Using Regional Regression and the HBV-Model*. *Water Resour. Manage.*, 23, 2567–2586, doi:10.1007/s11269-008-9397-7, 2009.
- 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.
- Farr, T. G. et al. *The shuttle radar topography mission*. *Rev. Geophys.* V 45. pg 1–33. 2007.
- 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
- Fleischmann, A., Paiva, R., Collischonn, W., Sorribas, M., Pontes, P. *On riverfloodplain interaction and hydrograph skewness*. *Water Resources Research* 52(10), 2016.
- Frasson, Renato Prata de Moraes et al. *Will the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) satellite mission observe floods?*. *Geophysical Research Letters*, v. 46, n. 17-18, p. 10435-10445. 2019.
- Gao, Yongxuan et al. *Development of representative indicators of hydrologic alteration*. *Journal of Hydrology*, v. 374, n. 1-2, p. 136-147. 2009.
- Gleason, C. J., & Durand, M. T. *Remote Sensing of River Discharge: A Review and a Framing for the Discipline*. *Remote Sensing*, 12(7), 1107. 2020.

- Gleeson, T., Moosdorf, N., Hartmann, J. and van Beek, L. P. H. *A glimpse beneath earth's surface: GLobal Hydrogeology MaPS (GLHYMPS) of permeability and porosity*, Geophys. Res. Lett., 41(11), 3891–3898, 2014. doi:10.1002/2014GL059856, 580.
- Gudmundsson, L., Tallaksen, L. M., Stahl, K., Clark, D. B., Dumont, E., Hagemann, S., & Voss, F. *Comparing large-scale hydrological model simulations to observed runoff percentiles in Europe*. Journal of Hydrometeorology, 13(2), 604-620. 2012.
- Haines, A. T., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. *A global classification of river regimes*. Applied Geography, 8(4), 255–272. doi:10.1016/0143-6228(88)90035-5. 1988.
- Hallouin, Thibault; Bruen, Michael; O'Loughlin, Fiachra E. *Calibration of hydrological models for ecologically-relevant streamflow predictions: a trade-off between performance and consistency*. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, p. 1-31, 2019.
- 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.
- Hersch, R.W., 2002. *The uncertainty in a current meter measurement*. Flow Meas. Instrum. 13, 281–284. [https://doi.org/10.1016/S0955-5986\(02\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0955-5986(02)00047-X).
- 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. *Using hydrological and climatic catchment clusters to explore drivers of catchment behavior*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 24, n. 3, p. 1081-1100. 2020b. Repository for all code related to this paper. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3630303>.
- 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. 2020a.
- 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.
- Ladson, A., Brown, R., Neal, B. and Nathan, R. *A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter*, 620 AJWR, 17(1), 2013. doi:10.7158/W12-028.2013.17.1.

- 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>
- Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, T., & Kaspar, F. *Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis*. Climatic Change, 75(3), 273-299. 2006.
- Lehner, B., Verdin, K., and Jarvis, A. New global hydrography derived from spaceborne elevation data, EOS, 89, 93–94, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>.
- 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 Arachos River basin (NW Greece)*. Science of The Total Environment, 139299. 2020.
- López-Ballesteros, Adrián et al. *Assessment of future hydrologic alteration due to climate change in the Arachos River basin (NW Greece)*. Science of The Total Environment, p. 139299. 2020.
- Lyne, V. & Hollick, M. *Stochastic timevariable rainfall-runoff modelling*. Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium, Perth, 10-12 September, Institution of Engineers National Conference Publication, No. 79/10, pp. 89-92. 1979.
- 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. *Linking hydrologic signatures to hydrologic processes: A review*. Hydrological Processes, 34(6), 1393-1409. 2020. <https://doi.org/10.1002/hyp.13632>
- 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.
- Melo, Jefferson Santana; Villa Boas, Mariana Dias. *Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 58*. Bacia do Paraíba do Sul. CPRM, 2017.
- 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.
- Naghattini, M.; Pinto, E. J. de A. *Hidrologia Estatística*. Belo horizonte: CRPM, 2007. 552p.

- NASA. *SWOT – Surface Water and Ocean Topography*. 2020. Disponível em: <https://swot.jpl.nasa.gov/mission.htm>. Acesso em abr 2020.
- Obregon, Esaul; Tucci, Carlos Em; Goldenfum, Joel A. Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes à Lagoa Mirim, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 4, n. 1, p. 57-75. 1999.
- Ouarda, T. B. M. J.; Girard, C.; Cavadias, G. S.; Bobée, B. *Regional Flood frequency estimation with canonical correlation analysis*. *Journal of Hydrology*, v. 254, n. 1-2, p. 157 - 173. 2001.
- Ouellet-Dallaire, C., Lehner, B., Sayre, R., & Thieme, M. *A multidisciplinary framework to derive global river reach classifications at high spatial resolution*. *Environmental Research Letters*. 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad8e9>.
- 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>.
- Pavelsky, T. M., Durand, M. T., Andreadis, K. M., Beighley, R. E., Paiva, R. C., Allen, G. H., & Miller, Z. F. *Assessing the potential global extent of SWOT river discharge observations*. *Journal of Hydrology*, 519, 1516-1525. 2014.
- 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.
- Petheram, C., Rustomji, P., Neal, B., & Woodman, A. (2011). *Regionalising low-flow responses in large tropical catchments: a comparison of rainfall-runoff modelling and regression approaches*. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December 2011
- 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
- Pinto, Eber José de Andrade; Alves, Margarida Maria Silva. *Regionalização de vazões das Sub-Bacias 40 e 41: Alto São Francisco*. CPRM, 2001.
- 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
- 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. 1998.
- 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.1523-1327.1996.10041163.x>
- Rudnick H., Barroso L. A., Cunha G., and Mocarquer S. 2014, *A Natural Fit, Electricity-Gas Integration Challenges in South America*, November/December 2014, IEEE Power & Energy Magazine.
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R. M., & Limbrunner, J. F. *Climate elasticity of streamflow in the United States*. 2001. Water Resources Research, 37(6), 1771-1781.
- Santos, I., Fill, H. D., Sugai, M., Buba, H., Kishi, R., Marone, E., & Lautert, L. *Hidrometria Aplicada. CEHPAR–Centro de hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza. Instituto de tecnologia para o Desenvolvimento*. 2001. Curitiba, Brasil.
- Santos, Keyla Almeida dos. *Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 39, bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Una, Goiana, Mundaú, Paraíba do Meio, Coruripe, Sirinhaém, São Miguel e Camaragibe*. CPRM, 2015.
- 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>.
- Schneider, C., Laizé, C. L. R., Acreman, M. C., & Florke, M. *How will climate change modify river flow regimes in Europe?*. Hydrology and Earth System Sciences, 17(1), 325-339. 2013.
- 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.
- Thorntwaite, 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>.
- Tucci, C. E. M. *Modelos hidrológicos*, Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p. 1998.
- Tucci, Carlos E.M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Editora da Universidade. UFRGS. 2ª edição. Porto Alegre. 1993.
- Tucci, Carlos E.M. *Regionalização de vazões*. Editora da Universidade. UFRGS. 1ª edição. Porto Alegre. 2002.
- Van den Hurk, B. J. J. M., P.Viterbo, A. C. M.Beljaars, and A. K.Betts. *Offline validation of the ERA-40 surface scheme*. ECMWF Tech. Memo. 295, 43 pp. 2000.
- Van Der Knijff, J. M., Younis, J., & De Roo, A. P. J. *LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation*. *International Journal of Geographical Information Science*, 24(2), 189-212. 2010.
- Virkki, V. et al. Environmental flow envelopes: quantifying global, ecosystem–threatening streamflow alterations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, [s. 1.], n. May, p. 1–31, 2021. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-2021-260>
- Virões, Múcio Valença. *Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 50, bacias dos rios Itapicuru, Vaza Barris, Real, Inhambupe, Pojuca, Sergipe, Japarutuba, Subaúma e Jacuípe*. 2013.
- Vogel, R. M., & Kroll, C. N. *Estimation of baseflow recession constants*. *Water resources management*, 10(4), 303-320. 1996.
- Wongchuig, Sly Correa et al. *Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin*. *Journal of hydrology*, v. 570, p. 755-773, 2. 2019.

- Wongchuig-Correa, S., Cauduro Dias de Paiva, R., Biancamaria, S., & Collischonn, W. (2020). *Assimilation of future SWOT-based river elevations, surface extent and discharge observations into uncertain global hydrological models*. *Journal of Hydrology*, 125473. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125473
- 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**

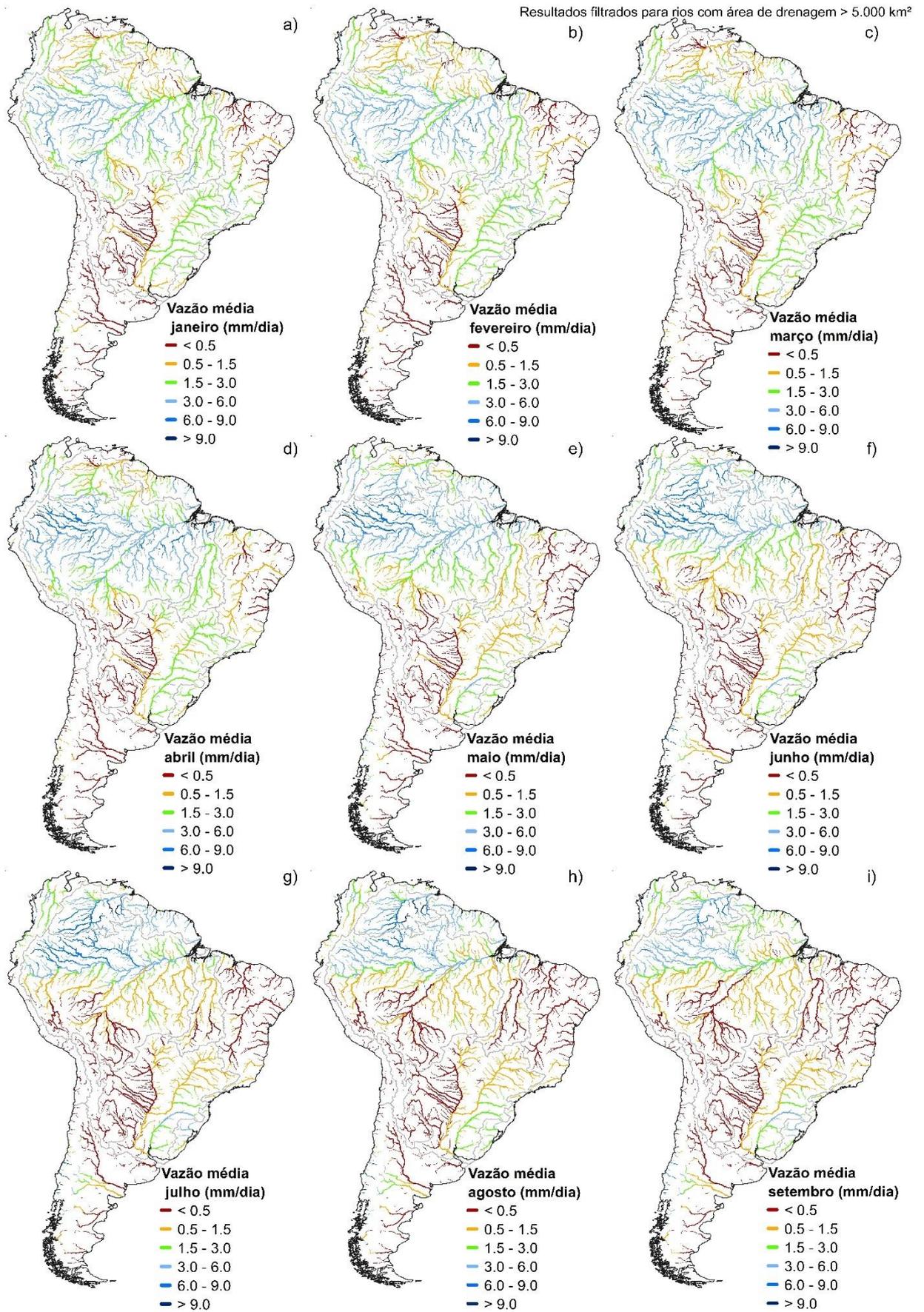


Figura 21. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões médias (G1) – parte 1/2.

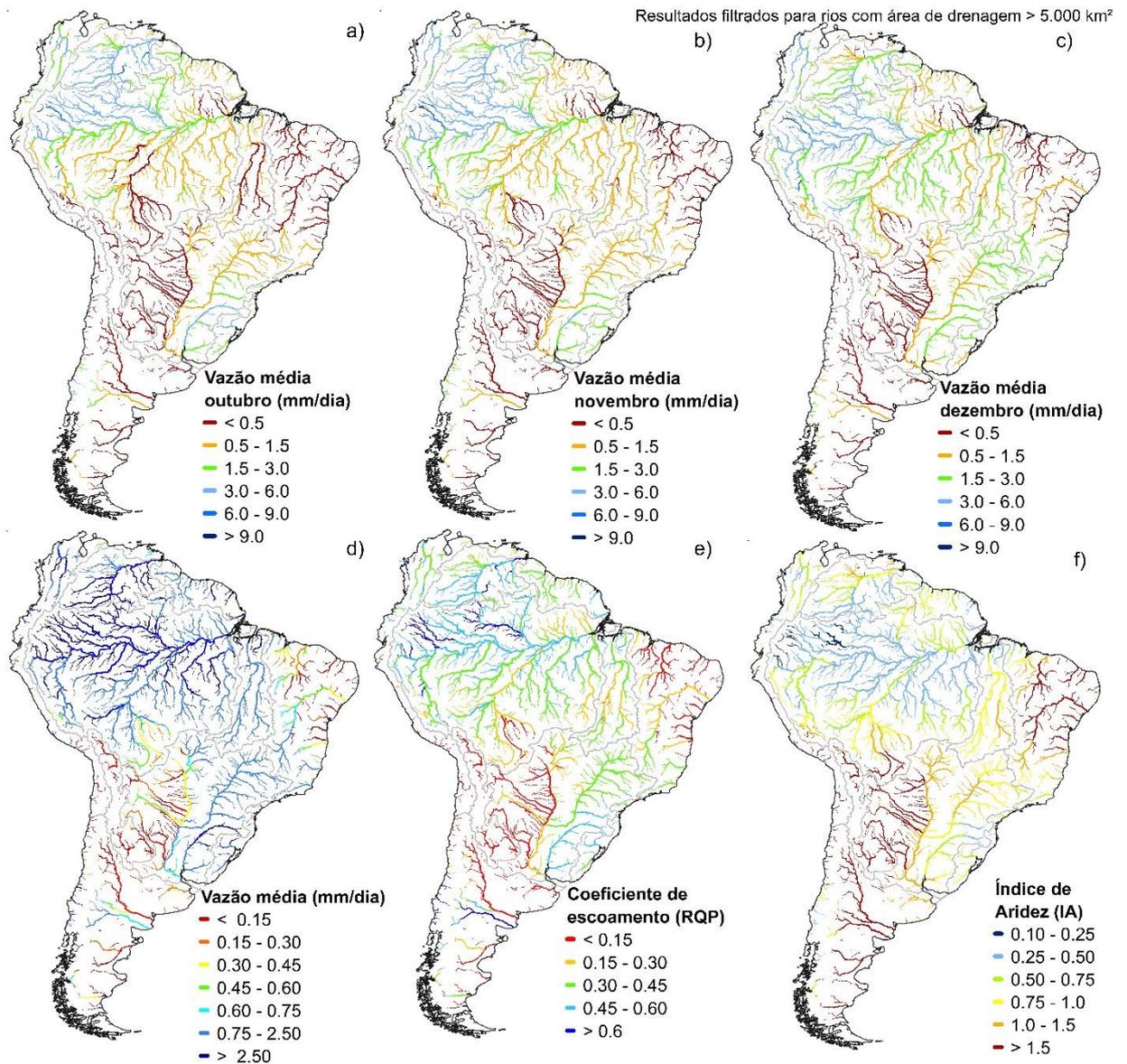


Figura 22. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões médias (G1) – parte 2/2.

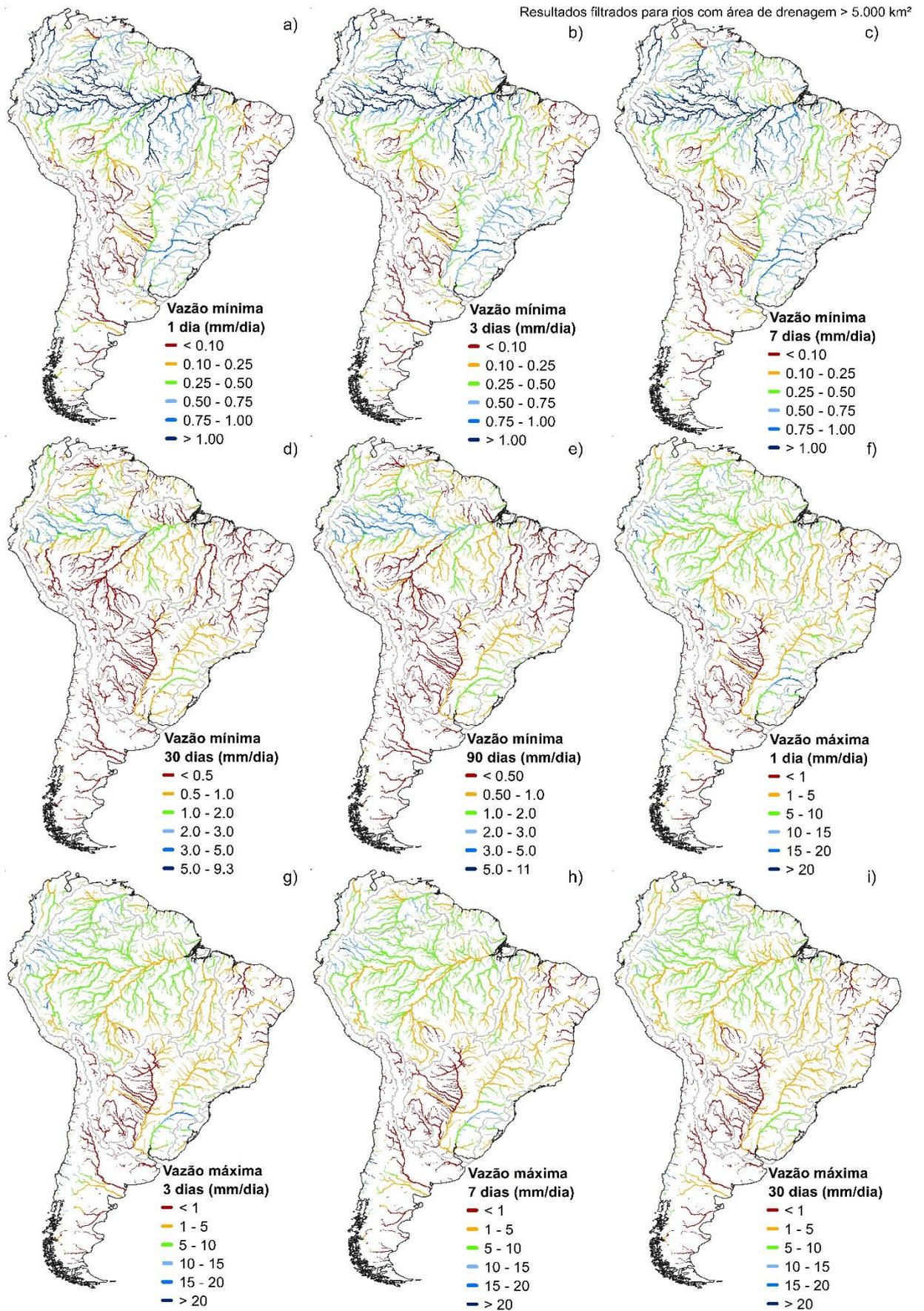


Figura 23. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões extremas (G2) – parte 1/2.

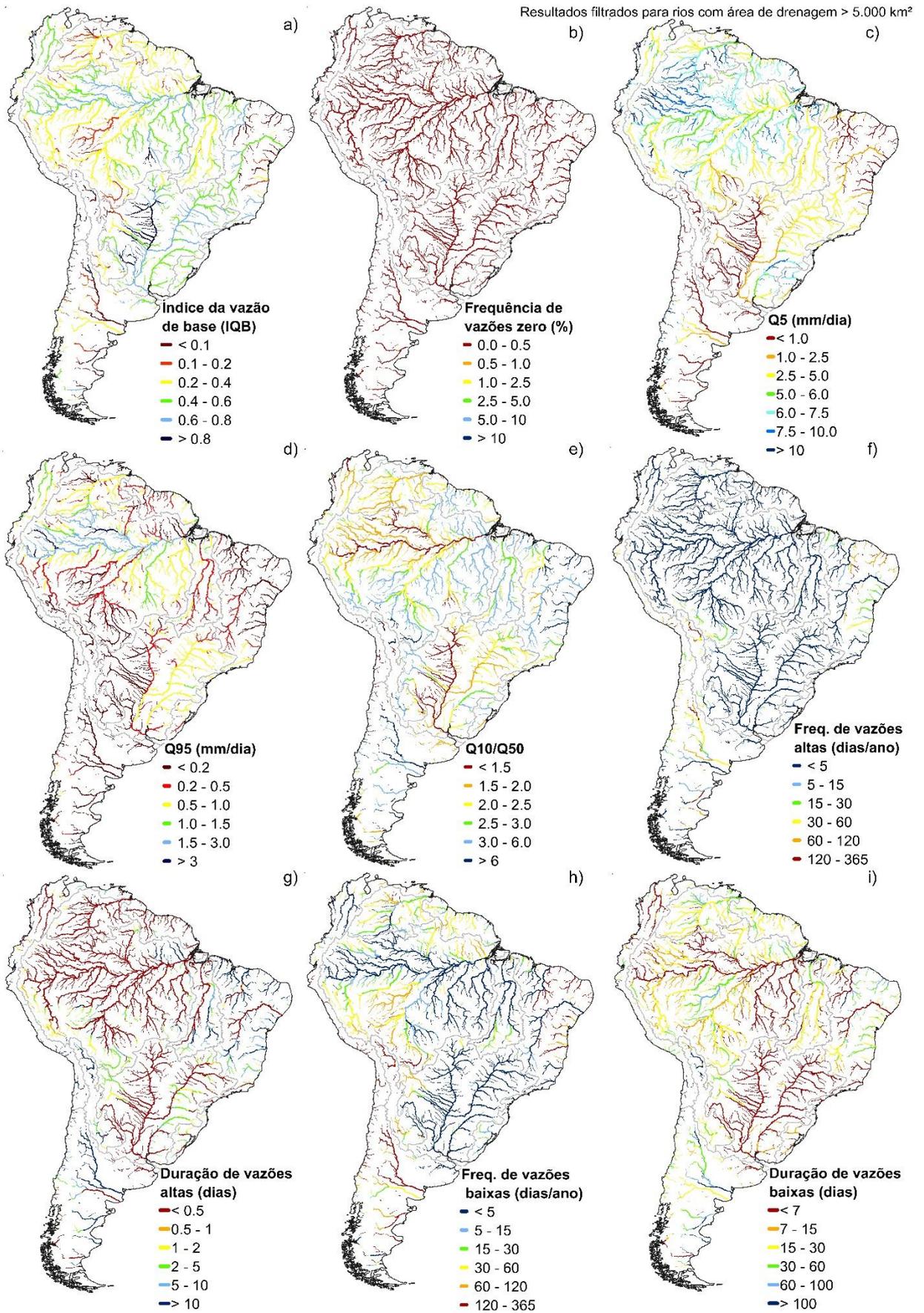


Figura 24. Índices hidrológicos do grupo da magnitude das vazões extremas (G2) – parte 2/2.

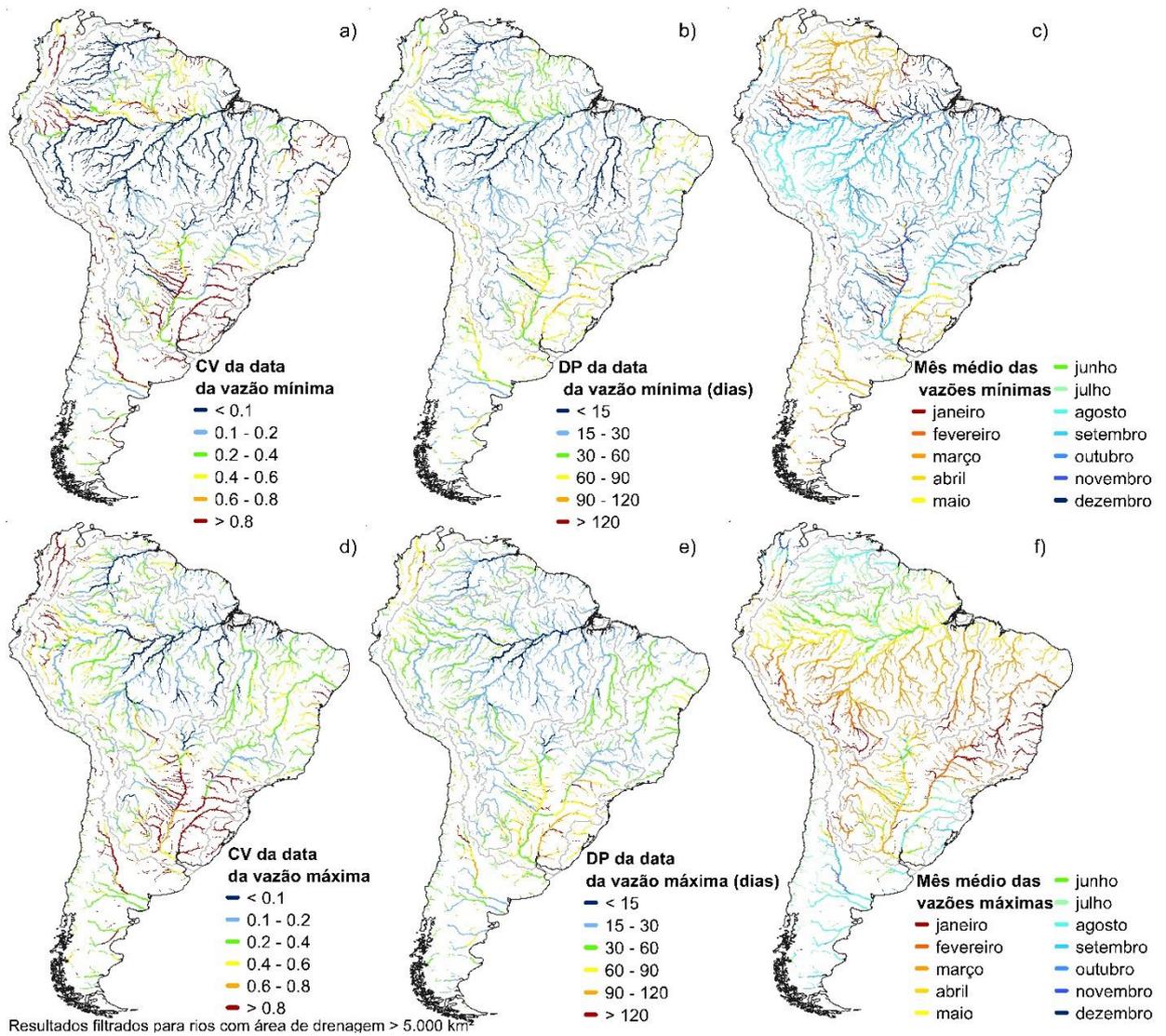


Figura 25. Índices hidrológicos do grupo de sazonalidade de extremos (G3) – parte 1/1.

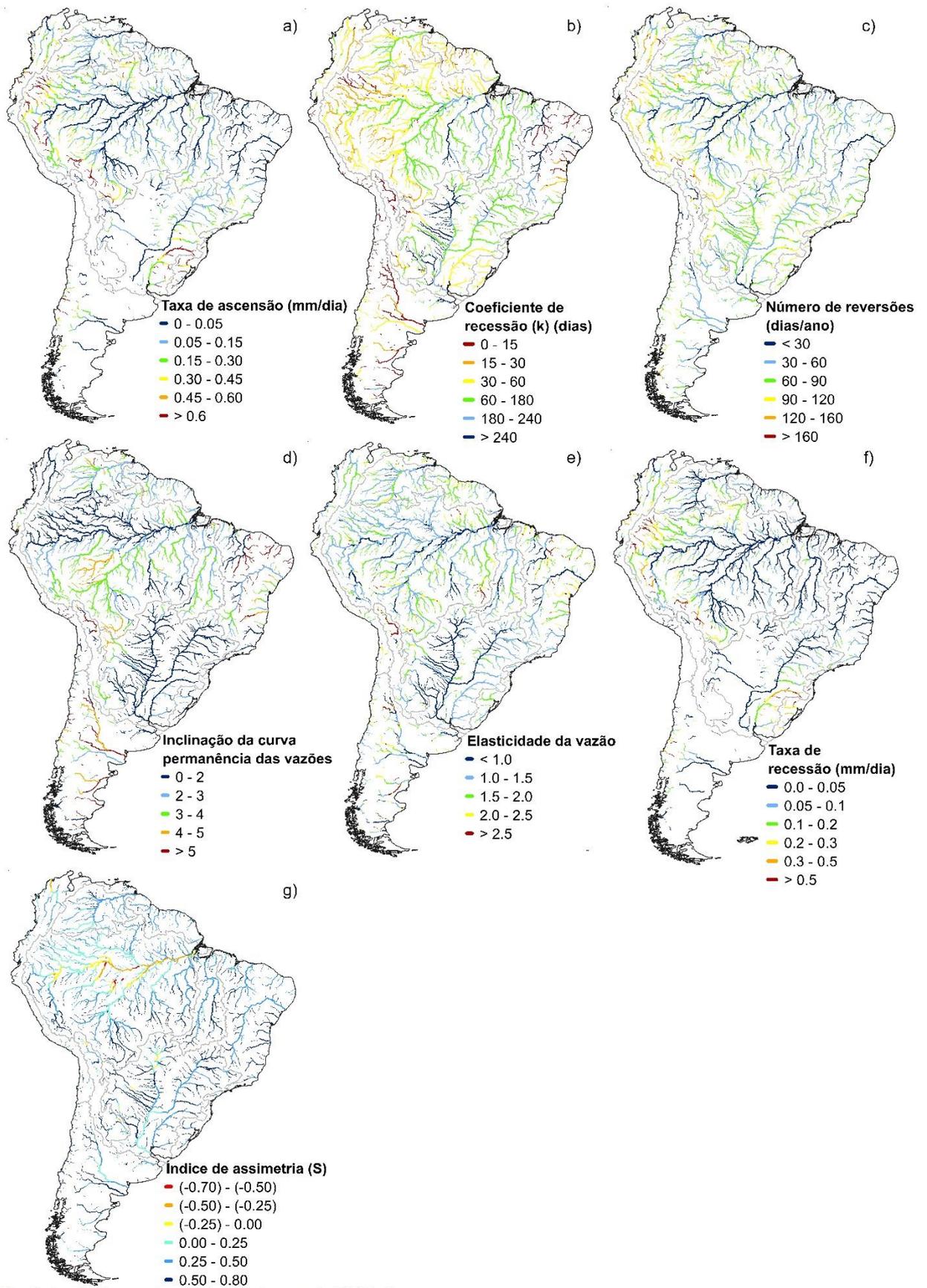


Figura 26. Índices hidrológicos do grupo de variabilidade das vazões no tempo (G4) – parte 1/1.

**APÊNDICE B**

Tabela 18. Mediana do erro relativo (ER) de 56 índices hidrológicos.

<b>ÍNDICE HIDROLÓGICO</b>	<b>MEDIANA DO ERRO RELATIVO-ER (%)</b>
Vazão média (Qm)	24.34
Coeficiente de Escoamento (RQP)	33.88
Inclinação da curva de permanência das vazões (SFDC)	36.15
Vazão mínima de referência Q <sub>95</sub>	49.29
Vazão máxima de referência Q <sub>5</sub>	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
Coeficiente 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 Q <sub>10</sub> /Q <sub>50</sub>	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
Coeficiente de Variação da vazão mínima de 1 dia	34.12
Coeficiente de Variação da vazão mínima de 3 dias	30.00
Coeficiente de Variação da vazão mínima de 7 dias	29.96
Coeficiente de Variação da vazão mínima de 30 dias	30.91
Coeficiente de Variação da vazão mínima de 90 dias	32.58
Vazão máxima de 1 dia	17.94
Vazão máxima de 3 dias	20.82
Vazão máxima de 7 dias	23.77
Vazão máxima de 30 dias	24.06
Vazão máxima de 90 dias	21.98

<b>ÍNDICE HIDROLÓGICO</b>	<b>MEDIANA DO ERRO RELATIVO-ER (%)</b>
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
<b>Média (%)</b>	<b>33.17</b>

**APÊNDICE C**

## SCRIPT PARA CÁLCULO DE ÍNDICES HIDROLÓGICOS

```

#-----Script for Hydrological Indices-----#
# --Instituto de Pesquisas Hidraulicas - Hidrologia em Grande Escala (HGE)
# --Author: Larissa de Castro Ribeiro (larissa.ribeirocr@gmail.com)
# --Professor Advison: Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
# --Date: 19/08/2020
# --Update in: 20/07/2021

# This script calculates de following hydrological indices:

#1 - Coefficient of baseflow recession (k)
# 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. 2013.
# Global patterns in base flow index and recession based on streamflow
# observations from 3394 catchments. Water Resources Research, 49(12),
# 7843â€“7863. doi:10.1002/2013wr013918.

#2 - Index of Aridity (IA)
# Penman, A. D. M. 1953. Shear characteristics of a saturated silt, measured
# in triaxial compression. Geotechnique, 3(8), 312-328.

#3 - Hydrogram assymetry index (S)
# Fleischmann, A. S., Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Sorribas, M. V., &
# Pontes, P. R. M. (2016). On river-floodplain interaction and hydrograph
# skewness. Water Resources Research, 52(10), 7615â€“7630. doi:10.1002/2016wr019233

#4 - Baseflow Index (BFI)
# Collischonn, Walter, and Fan, F.M., 2013, Defining parameters for Eckhardt's
# digital baseflow filter: Hydrological
# Processes, v. 27, no. 18, p. 2,614–2,622, doi:10.1002/hyp.9391,
# http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9391.

#5 – Streamflow Elasticity (STR_ela)
# 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.

#6 - Maximum standardized reference flow (Q10_norm)
# 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.
# https://doi.org/10.5194/hess-18-273-2014.

##### IMPORTING LIBRARIES #####

import pandas as pd
import datetime
import numpy as np
import winsound
from scipy.io import loadmat

#####
### SECTION 1 - IMPORTING DISCHARGE DATA ###

```

```
#####
# The inputs for this script are: discharge, precipitation and/or evapotranspiration
# in DataFrama format. Lines represent different entries with a fixed time interval
# and the column are river segments.

### Transforming input file of discharge from .mat to DataFrame ###
## Sub-catchments/River segments
mat1 = loadmat("D:/working_directory/discharge.mat")
mdata1 = mat1['...']
df_q = 0
df_q = pd.DataFrame(mdata1[:,:])
del mat1
del mdata1

### Transforming input file of precipitation from .mat to DataFrame ###
## Sub-catchments/River segments
mat1 = loadmat("D:/working_directory/rainfall.mat")
mdata1 = mat1['...']
df_p = 0
df_p = pd.DataFrame(mdata1[:,:])
del mat1
del mdata1

### Transforming input file of evapotranspiration from .mat to DataFrame ###
## Sub-catchments/River segments
mat1 = loadmat("D:/working_directory/evapo.mat")
mdata1 = mat1['...']
df_e = 0
df_e = pd.DataFrame(mdata1[:,:])
del mat1
del mdata1

### Transforming input file of discharge from .xls to DataFrame ###
##
#df_q = pd.read_excel(r'../discharge.xlsx', engine='openpyxl')

### Transforming input file of precipitation from .xls to DataFrame ###
##
#df_p = pd.read_excel(r'../rainfall.xlsx', engine='openpyxl')

### Transforming input file of evapotranspiration from .xls to DataFrame ###
##
#df_e = pd.read_excel(r'../precipitation.xlsx', engine='openpyxl')

#####
### SECTION 2 - CREATING DATE INFORMATION ###
#####

### Creating DataFrama with date format e number of days of time step between entries
##
# Input initial date of the series of discharge

start = datetime.datetime.strptime("01/01/1980", "%d/%m/%Y").date() #TODO put start
#data of flow
filenumdays = len(df_q)
datelist = []
for x in range (0, numdays):
```

```

    datelist.append(start + datetime.timedelta(days = x))

# Creating a DataFrame with days, dates and discharges of a river segment
##
# Creating days list (number of days of the time step)
z = np.arange(len(df_q))
z = z+1

dias_contagem = list(datelist)

#####
###          SECTION 3 - CREATING EMPTY MATRIX FOR INDICES          ###
#####

#####
# Creates matrix to allocate calculated indices
z1 = np.arange(len(df_q.columns))
z1 = list(z1+1)

z2 = z1.copy()
del z2[1:(len(z1))]

z3 = z1.copy()
del z3[35:(len(z1))]

assinaturas = 0
assinaturas = pd.DataFrame(columns=['K90','IA','S','BFI',
                                   'STR_ela',"Q10_norm",'P_media','E_media'
                                   ],index=z1)

del z
del x
del numdays
del start

# Input year of the first entry in the series of discharges
yearlist = 0
yearlist = [datetime.datetime.strptime("1980", "%Y").year + index for index
            in range(len(z3))] ##TODO Input year of the first entry in the series of discharges

#####
###          SECTION 4 - CALCULATING INDICES          ###
#####

##### SEGMENT LOOP #####

before = datetime.datetime.now().isoformat(timespec='minutes')
before = pd.to_datetime(before)

k=0
for k in range (0,(len(df_q.columns))):

    q_mini = list(df_q.iloc[:,k])
    p_mini = list(df_p.iloc[:,k])
    e_mini = list(df_e.iloc[:,k])

```

```

matriz_q = 0
matriz_q = pd.DataFrame({"dia": dias_contagem,"data": datelist,"vazao":q_mini})
matriz_q['data'] = pd.to_datetime(matriz_q['data'])

matriz_p = 0
matriz_p = pd.DataFrame({"dia": dias_contagem,"data": datelist,"precip":p_mini})
matriz_p['data'] = pd.to_datetime(matriz_p['data'])

matriz_e = 0
matriz_e = pd.DataFrame({"dia": dias_contagem,"data": datelist,"evapo":e_mini})
matriz_e['data'] = pd.to_datetime(matriz_e['data'])

print("Calculando trecho " + str(k+1) + " de " + str(len(df_q.columns)))

##### DISCHARGE RATE #####
# Calculating flow duration curve

q_flow = matriz_q['vazao']
q_flow = q_flow[np.logical_not(np.isnan(q_flow))]
q_sort = pd.DataFrame(columns=['vazao'])
q_sort['vazao'] = np.sort(q_flow)[::-1]
q_sort['excedencia'] = np.arange(1.,len(q_sort)+1) / len(q_sort)
q_sort['excedencia'] = q_sort['excedencia']*100

#Calculatin discharge rate Q10
q_10 = q_sort.iloc[(q_sort['excedencia']-10).abs().argsort()[1]]

#Calculatin discharge rate Q50
q_50 = q_sort.iloc[(q_sort['excedencia']-50).abs().argsort()[1]]

#Calculatin discharge rate Q90
q_90 = q_sort.iloc[(q_sort['excedencia']-90).abs().argsort()[1]]

##### 1 - Coefficient of baseflow recession (k) #####
##

# Calculatin ascension and descension rate

# print(" coeficiente de recessao da vazao de base (K)")
# try:
#   i = 0
#   j = 0

#   ano_g = 0
#   ano_g = matriz_q.copy()
#   ano_g['GD'] = 0
#   ano_g['GA'] = 0
#   ano_g['k'] = 0
#   ano_g['k2'] = 0

#   ano_g['GD'] = -1*(ano_g['vazao']-ano_g['vazao'].shift(-1))
#   ano_g['GD'] = np.where(ano_g['GD']<0, ano_g['GD'], np.nan)
#   ano_g['GA'] = -1*(ano_g['vazao']-ano_g['vazao'].shift(-1))
#   ano_g['GA'] = np.where(ano_g['GA']>0, ano_g['GA'], np.nan)
#   ano_g['k'] = np.where(ano_g['GD']<0,
#       (-1/(np.log(ano_g['vazao'].shift(-1)/ano_g['vazao']))),
#       np.nan)

```

```

# ano_g60 = ano_g.copy()
# ano_g70 = ano_g.copy()
# ano_g80 = ano_g.copy()
# ano_g90 = ano_g.copy()

# #For discharges lower than Q90

# ano_g90['k'] = np.where(
#     (ano_g90['vazao']>q_90.iloc[0,0]),
#     np.nan, ano_g90['k'])

# ano_g90['k'] = np.where(
#     (ano_g90['vazao']<0),
#     np.nan, ano_g90['k'])

# array_g = pd.notnull(ano_g90['k'])

# maskg = [True, True, True, True, True]
# aux = np.zeros(len(array_g))

# for i in range(0, len(array_g)):
#     chunk = array_g[i:i+5]
#     if np.sum(chunk) == np.sum(maskg):
#         aux[i:i+5] +=1

#     else:
#         pass

# aux = np.where((aux==0),np.nan, aux)

# ano_g90['k2'] = ano_g90['k']*aux

# except IndexError:
#     pass

# assinaturas.iloc[k,0] = abs(ano_g90['k2'].median())

#####          2 - Index of aridity (IA)          #####
##
##
# Calculating starting month of the hidrological year for minimums
q = pd.DataFrame()
q['data'] = matriz_q['data']
q['data'] = q['data'].dt.year
q = q.groupby('data').size()

anos_min = 0
anos_min = pd.DataFrame(index=list(yearlist),
                        columns = ['Data da vazao minima','Mes da vazao minima'])
anos_min['Data da vazao minima'] = pd.to_datetime(anos_min['Data da vazao minima'])

i = 0
for i in range (0,len(yearlist)):
    ano1 = matriz_q.copy()
    ano1 = ano1.loc[(ano1['data'].dt.year==yearlist[i])]

```

```

mini = ano1.copy()
mini = mini.loc[(mini['vazao']==mini['vazao'].min())]

if mini.size > 0:

    mini2 = mini.iloc[0]
    anos_min.at[yearlist[i],'Data da vazao minima'] = mini2['data']
    anos_min['Mes da vazao minima'] = anos_min['Data da vazao minima'].dt.month
else:
    pass

anos_min = anos_min.groupby('Mes da vazao minima').size().sort_values(ascending=False)
mes_ano_min = anos_min.index[0]-5

if mes_ano_min <= 0:
    mes_ano_min = mes_ano_min+12
mes_anterior = mes_ano_min - 1
if mes_anterior == 0:
    mes_anterior = 12

# Deleting entries out of hydrological year range

matriz_min = 0

matriz_min = matriz_q.copy()

i = 0
for i in range (0,365):
    while matriz_min['data'][matriz_min.index[i]].month!=mes_ano_min:
        matriz_min = matriz_min.drop(index=[matriz_min.index[i]],axis=1)
    break

i=0
matriz2_min = matriz_min.iloc[::-1]
for i in range (0,365):
    while matriz2_min['data'][matriz2_min.index[i]].month!=mes_anterior:
        matriz2_min = matriz2_min.drop(index=[matriz2_min.index[i]],axis=1)
    break
matriz2_min = matriz2_min.iloc[::-1]

yearlist2 = 0
yearlist2 = matriz2_min['data'].dt.year
yearlist2 = pd.DataFrame(yearlist2)
yearlist2 = yearlist2.groupby('data').size()

print(" indice de aridez (IA)")

e_media = 0
e_media = pd.DataFrame(index = np.arange(len(yearlist2)), columns=['e_media',])
p_media = 0
p_media = pd.DataFrame(index = np.arange(len(yearlist2)), columns=['p_media',])
q_media = 0
q_media = pd.DataFrame(index = np.arange(len(yearlist2)), columns=['q_media',])

try:
    i = 0
    for i in range (0,len(yearlist2)):
        mes = matriz2_min.loc[

```

```

        matriz2_min['data'].dt.year == matriz2_min.iloc[0,1].year+i
    ]
mes = mes.loc[mes['data'].dt.month >= mes_ano_min]
mes2 = matriz2_min.loc[
    matriz2_min['data'].dt.year == matriz2_min.iloc[0,1].year+i+1
]
mes2 = mes2.loc[mes2['data'].dt.month < mes_ano_min]
mes = mes.append(mes2)

mask=(matriz_e['data']>=mes.iloc[0,1]) & (matriz_e['data']<=mes.iloc[len(mes)-1,1])

evapo = matriz_e.loc[mask]

e_media.iloc[i,0] = evapo['evapo'].mean()

mask2=(matriz_p['data']>=mes.iloc[0,1]) & (matriz_p['data']<=mes.iloc[len(mes)-1,1])

precip = matriz_p.loc[mask2]

p_media.iloc[i,0] = precip['precip'].mean()

mask3=(matriz_q['data']>=mes.iloc[0,1]) & (matriz_q['data']<=mes.iloc[len(mes)-1,1])

vazao = matriz_q.loc[mask3]

q_media.iloc[i,0] = vazao['vazao'].mean()

except IndexError:
    pass

# assinaturas.iloc[k,1] = (e_media['e_media'].mean())/(p_media['p_media'].mean())

##### 4 - Index of hydrogram assymetry (S) #####
##
print(" indice de assimetria do hidrograma (S) ")

S=1-(((1/ano_g['GD'].notnull().sum()*(ano_g['GD'].abs().sum()))/(
(1/ano_g['GA'].notnull().sum()*(ano_g['GA'].abs().sum()))))

assinaturas.iloc[k,2] = S

##### 5 - Baseflow index (BFI) #####
##
print(" baseflow index (BFI) ")

BFI = q_90.iloc[0,0]/q_50.iloc[0,0]

assinaturas.iloc[k,3] = BFI

##### 6 - Streamflow Elasticity #####
##

print(" streamflow elasticity ")

st_el = (
((q_media-q_media.mean())['q_media']/
(p_media-p_media.mean())['p_media']

```

```

    )*(
    p_media.mean()['p_media']/q_media.mean()['q_media']
    ).median()

assinaturas.iloc[k,4] = st_el

#####          7 - Q10/Q50          #####
##

print(" Q10/Q50 ")

q10_norm = q_10.iloc[0,0]/q_50.iloc[0,0]

assinaturas.iloc[k,5] = q10_norm

after = datetime.datetime.now().isoformat(timespec='minutes')
after = pd.to_datetime(after)
tempo_execucao = after-before
print(tempo_execucao)

duration = 1000 # milliseconds
freq = 440 # Hz
winsound.Beep(freq, duration)

#####
###          SECTION 5 - EXPORTING SIGNATURES RESULTS          ###
#####

##### Export DataFrame signature in .xls format #####
writer = pd.ExcelWriter(r'D:/working_directory/results.xlsx')
assinaturas.to_excel(writer, sheet_name='Sheet1', index=False)
writer.save()

#####          END          #####

```

## CÓDIGO PARA CÁLCULO DOS ÍNDICES DE ALTERAÇÃO HIDROLÓGICA

```

# -----          Script for IHA assessment          ----- #
# --Instituto de Pesquisas Hidraulicas - Hidrologia em Grande Escala (HGE)
# --Author: Larissa de Castro Ribeiro (larissa.ribeirocr@gmail.com)
# --Advisor: Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
# --Date: 19/11/2019
# --Updated in: 04/03/2021

# CONSIDERATIONS
# IHA indices generated by this script were developed according to the
# "Indicator of Hydrologic Alteration Version 7.1 User's Manual" by The Nature
# Conservancy (2009) with the following modifications:

# i) the discharges data are divided in hydrological years of maximum and minimum
# for each river segment to calculate the indices;
# ii) date information is transformed to angle in degrees to perform circular
# statistics and obtain maximum and minimum hydrological year dates.
# The alteration of maximum and minimum Julian days is calculated considering
# 182,5 days as a 100% alteration, with standard deviation given in days and the
# coefficient of variation being a ration of standard deviation by 182,5 days;
# c) minimum discharge related indices were calculated considering the hydrological
# year of minimums and maximum discharge related indices considered the
#hydrological year of maximums

# This script calculates the following IHA:
#1 - Mean monthly discharge: M_jan, M_fev, ...
#2 - Mean monthly discharge standard deviation: M_D_jan, M_D_fev,...
#3 - Mean monthly discharge coefficient of variation: M_CV_jan, M_CV_fev, ...

#4 - 1 day, 3 days, 30 days and 90 days minimum discharge: E_1_min1, E_1_min3, ...
#5 - Standard deviation of 1 day minimum discharge: E_1_min1_D, E_1_min3_D
#6 - Coefficient of variation of 1 day minimum discharge: E_1_min1_CV, E_1_min3_CV

#7 - 1 day, 3 days, 30 days and 90 days maximum discharge: E_2_max1, E_2_max3 ...
#8 - Standard deviation of 1 day maximum discharge: E_2_max1_D, E_2_max3_D
#9 - Coefficient of variation of 1 day maximum discharge: E_2_max1_CV, E_2_max3_CV

#10 - Date of minimum discharge: T_1
#11 - Standard deviation of Date of minimum discharge (days): T_1_D
#12 - Coefficient of variation of Date of minimum discharge (days): T_1_CV

#13 - Date of maximum discharge: T_2
#14 - Standard deviation of Date of maximum discharge (days): T_2_D
#15 - Coefficient of variation of Date of maximum discharge (days): T_2_CV

#16 - Ascension rate: G_1
#17 - Standard deviation of ascension rate: G_1_D
#18 - Coefficient of variation of ascension rate: G_1_CV

#19 - Recession rate: G_2
#20 - Standard deviation of recession rate: G_2_D
#21 - Coefficient of variation of recession rate: G_2_CV

#22 - Number of reversion: G_3
#23 - Standard deviation of number of reversion: G_3_D
#24 - Coefficient of variation of number of reversion: G_3_CV

```

```

##### Importing libraries #####

import pandas as pd
import datetime
from scipy.stats import variation
from scipy import stats
from scipy.stats import circstd
from scipy.stats import circvar
import numpy as np
import winsound
from scipy.io import loadmat
import warnings
warnings.filterwarnings("ignore")

#####
###          SECTION 1 - IMPORT DISCHARGE DATA          ###
#####
# Input data are series of discharges in dataframe format;
# rows are time intervals and columns are different river segments

###    CONVERTING INPUT FILE FROM .mat TO DataFrame    ###
##

mat = loadmat("folder/discharge_data.mat")
mdata = mat['...']

df = 0
df = pd.DataFrame(mdata[:,:])

del mat
del mdata

###    CONVERTING INPUT FILE FROM .xls TO DataFrame    ###
##

#df = pd.read_excel(r'./discharge_data.xlsx', engine='openpyxl')

#####
###          SECTION 2 - CREATING DATE INFORMATION          ###
#####
### Creating DataFrame in date format and number of days of discharge entries time step ###

# start = INPUT THE DATE OF THE FIRST DISCHARGE ENTRY
start = datetime.datetime.strptime("01/01/1980", "%d/%m/%Y").date()

numdays = len(df)
datelist = []
for x in range(0, numdays):
    datelist.append(start + datetime.timedelta(days=x))

# Creating a DataFrame with days, date, discharges and a river segment
##
# Creating days list (time step)
z = np.arange(len(df))
z = z + 1

df.insert(0, 'IT', z)

dias_contagem = list(df['IT'])

```

```

#####
###          SECTION 3 - CREATING EMPTY MATRIX FOR INDICES          ###
#####

##### IHA MATRIX #####

z = list(df)
del z[0]

iha = pd.DataFrame(columns=['M_jan','M_fev','M_mar','M_abr',
                            'M_mai','M_jun','M_jul','M_ago',
                            'M_set','M_out','M_nov','M_dez',
                            'M_D_jan','M_D_fev','M_D_mar','M_D_abr',
                            'M_D_mai','M_D_jun','M_D_jul','M_D_ago',
                            'M_D_set','M_D_out','M_D_nov','M_D_dez',
                            'M_CV_jan','M_CV_fev','M_CV_mar',
                            'M_CV_abr','M_CV_mai','M_CV_jun',
                            'M_CV_jul','M_CV_ago','M_CV_set',
                            'M_CV_out','M_CV_nov','M_CV_dez',
                            'E_1_min1','E_1_min3','E_1_min7',
                            'E_1_min30','E_1_min90',
                            'E_1_min1_D','E_1_min3_D','E_1_min7_D',
                            'E_1_min30_D','E_1_min90_D',
                            'E_1_min1_CV','E_1_min3_CV','E_1_min7_CV',
                            'E_1_min30_CV','E_1_min90_CV',
                            'E_2_max1','E_2_max3','E_2_max7',
                            'E_2_max30','E_2_max90',
                            'E_2_max1_D','E_2_max3_D','E_2_max7_D',
                            'E_2_max30_D','E_2_max90_D',
                            'E_2_max1_CV','E_2_max3_CV','E_2_max7_CV',
                            'E_2_max30_CV','E_2_max90_CV',
                            'T_1','T_1_D','T_1_CV',
                            'T_2','T_2_D','T_2_CV','G_1',
                            'G_2','G_3','G_1_D','G_2_D',
                            'G_3_D','G_1_CV','G_2_CV','G_3_CV','AnoH_Min','AnoH_Max'],index=z)

del x
del numdays
del start

#####
###          SECTION 4 - CALCULATION OF INDICES          ###
#####

##### LOOP FOR RIVER SEGMENTS #####
#Calculates indices for each river segment of the input data
#Converting segment discharge from column to list

before = datetime.datetime.now().isoformat(timespec='minutes')
before = pd.to_datetime(before)

k=0
for k in range (54,len(z)):

    vazoes_trecho = list(df.iloc[:,k+1])

    matriz = 0
    matriz = pd.DataFrame({"dia": dias_contagem,"data": datelist,"vazao":vazoes_trecho})

```

```

matriz['data'] = pd.to_datetime(matriz['data'])

print("Calculando trecho " + str(k+1) + " de " + str(len(df.columns)))

##### Determining the beginning of the hydrological year #####
# For minimum
##
q = pd.DataFrame()
q['data'] = matriz['data']
q['data'] = q['data'].dt.year
q = q.groupby('data').size()

yearlist = 0

# Here you must input the series of discharge starting date

yearlist = [datetime.datetime.strptime("1980", "%Y").year + index for index
             in range(len(q))] ##TODO colocar o ano inicial
yearlist_df = pd.DataFrame({"ano": yearlist})
yearlist_df['ano'] = pd.to_datetime(yearlist_df['ano'])

anos_min = 0
anos_min = pd.DataFrame(index=list(yearlist),
                        columns = ['Data da vazao minima','Mes da vazao minima'])
anos_min['Data da vazao minima'] = pd.to_datetime(anos_min['Data da vazao minima'])

i = 0
for i in range (0,len(yearlist)):
    ano1 = matriz.copy()
    ano1 = ano1.loc[(ano1['data'].dt.year==yearlist[i])]
    mini = ano1.copy()
    mini = mini.loc[(mini['vazao']==mini['vazao'].min())]

    if mini.size > 0:

        mini2 = mini.iloc[0]
        anos_min.at[yearlist[i],'Data da vazao minima'] = mini2['data']
        anos_min['Mes da vazao minima'] = anos_min['Data da vazao minima'].dt.month
    else:
        pass

anos_min = anos_min.groupby('Mes da vazao minima').size().sort_values(ascending=False)
mes_ano_min = anos_min.index[0] - 5

if mes_ano_min <= 0:
    mes_ano_min = mes_ano_min+12
mes_anterior = mes_ano_min - 1
if mes_anterior == 0:
    mes_anterior = 12

iha.iloc[k,81] = mes_ano_min

# Deleting data outside of the hydrological year range

matriz_min = 0
matriz_min = matriz.copy()

i = 0
for i in range (0,365):

```

```

while matriz_min['data'][matriz_min.index[i]].month!=mes_ano_min:
    matriz_min = matriz_min.drop(index=[matriz_min.index[i]],axis=1)
break

i=0
matriz_min2 = matriz_min.iloc[::-1]
for i in range (0,365):
    while matriz_min2['data'][matriz_min2.index[i]].month!=mes_anterior:
        matriz_min2 = matriz_min2.drop(index=[matriz_min2.index[i]],axis=1)
    break

# DataFrame with hydrological years of minimums
matriz_min = matriz_min2.iloc[::-1]
del(matriz_min2)

# Hydrological year of maximums
##

anos_max = 0
anos_max = pd.DataFrame(index=list(yearlist),
                        columns = ['Data da vazao maxima','Mes da vazao maxima'])
anos_max['Data da vazao maxima'] = pd.to_datetime(anos_max['Data da vazao maxima'])

i = 0
for i in range (0,len(yearlist)):
    ano1 = matriz.copy()
    ano1 = ano1.loc[(ano1['data'].dt.year==yearlist[i])]
    maxi = ano1.copy()
    maxi = maxi.loc[(maxi['vazao']==maxi['vazao'].max())]

    if maxi.size > 0:

        maxi2 = maxi.iloc[0]
        anos_max.at[yearlist[i],'Data da vazao maxima'] = maxi2['data']
        anos_max['Mes da vazao maxima'] = anos_max['Data da vazao maxima'].dt.month
    else:
        pass

anos_max = anos_max.groupby('Mes da vazao maxima').size().sort_values(ascending=False)
mes_ano_max = anos_max.index[0]-5

if mes_ano_max <= 0:
    mes_ano_max = mes_ano_max+12
mes_anterior = mes_ano_max - 1
if mes_anterior == 0:
    mes_anterior = 12

iha.iloc[k,82] = mes_ano_max

# Deleting data outside of the hydrological year range

matriz_max = 0
matriz_max = matriz.copy()

i = 0
for i in range (0,365):
    while matriz_max['data'][matriz_max.index[i]].month!=mes_ano_max:
        matriz_max = matriz_max.drop(index=[matriz_max.index[i]],axis=1)
    break

```



```

        'vazao minima de 3 dias',
        'vazao minima de 7 dias',
        'vazao minima de 30 dias',
        'vazao minima de 90 dias'])

## Calculating timing for extreme minimum discharges
ex_min = 0
ex_min = pd.DataFrame(index = np.arange(len(yearlist2)-1),
                      columns=['data', 'vazao', 'graus', 'dias no ano'])

dias = 0
dias = np.arange(0, len(ex_min))

meses = 12

try:
    i = 0
    j = 0
    for i in range (0,len(yearlist2)):
        mes = matriz_min.loc[
            matriz_min['data'].dt.year == matriz_min.iloc[0,1].year+i
        ]
        mes = mes.loc[mes['data'].dt.month >= mes_ano_min]
        mes2 = matriz_min.loc[
            matriz_min['data'].dt.year == matriz_min.iloc[0,1].year+i+1
        ]
        mes2 = mes2.loc[mes2['data'].dt.month < mes_ano_min]
        mes = mes.append(mes2)

        mag_ext_AH_min.iloc[i,0] = mes['vazao'].min()
        med3_mov_min = mes.copy()
        med3_mov_min['vazao'] = mes.vazao.rolling(window=3).mean()
        mag_ext_AH_min.iloc[i,1] = med3_mov_min['vazao'].min()
        med7_mov_min = mes.copy()
        med7_mov_min['vazao'] = mes.vazao.rolling(window=7).mean()
        mag_ext_AH_min.iloc[i,2] = med7_mov_min['vazao'].min()
        med30_mov_min = mes.copy()
        med30_mov_min['vazao'] = mes.vazao.rolling(window=30).mean()
        mag_ext_AH_min.iloc[i,3] = med30_mov_min['vazao'].min()
        med90_mov_min = mes.copy()
        med90_mov_min['vazao'] = mes.vazao.rolling(window=90).mean()
        mag_ext_AH_min.iloc[i,4] = med90_mov_min['vazao'].min()

        dias[i] = len(mes)

    for j in range (0,meses):
        if mes['vazao'].isna().sum().sum() < 364:
            mes_i = mes.loc[(mes['data'].dt.month==j+1)]
            mag_medias_AH_min.iloc[i, j] = mes_i['vazao'].mean()
            mini2 = mes.loc[(mes['vazao']==mes['vazao'].min())]
            mini2 = mini2.iloc[0]
            ex_min['data'][i] = mini2['data']
            ex_min['vazao'][i] = mini2['vazao']
        else:
            ex_min['data'][i] = np.nan
            ex_min['vazao'][i] = np.nan

except IndexError:

```

```

pass

ex_min['dias no ano'] = 0
ex_min['dias no ano'] = pd.DataFrame(dias)
extrem = 5

mag_ext_AH_min = mag_ext_AH_min.dropna()

j=0
for j in range (0,extrem):
    iha.iloc[k,j+36] = mag_ext_AH_min.iloc[:,j].mean()
    iha.iloc[k,j+41] = stats.tstd(mag_ext_AH_min.iloc[:,j])
    if (mag_ext_AH_min.iloc[:,j].sum() != 0:
        iha.iloc[k,j+46] = variation(mag_ext_AH_min.iloc[:,j], axis = 0)
    else:
        iha.iloc[k,j+46] = np.nan

# For hydrological year of maximums

yearlist3 = 0
yearlist3 = matriz_max['data'].dt.year
yearlist3 = pd.DataFrame(yearlist3)
yearlist3 = yearlist3.groupby('data').size()

mag_medias_AH_max = 0
mag_medias_AH_max = pd.DataFrame(index = np.arange(len(yearlist3)-1),
                                columns=['jan','fev','mar','abr',
                                         'mai','jun','jul','ago',
                                         'set','out','nov','dez'])

# Calculating metrics of consecutive maximum discharges for hydrological year of maximums
mag_ext_AH_max = 0
mag_ext_AH_max = pd.DataFrame(index = np.arange(len(yearlist3)-1),
                                columns=['vazao maxima de 1 dia',
                                         'vazao maxima de 3 dias',
                                         'vazao maxima de 7 dias',
                                         'vazao maxima de 30 dias',
                                         'vazao maxima de 90 dias'])

# Calculating timing of extreme for maximum discharge

ex_max = 0
ex_max = pd.DataFrame(index = np.arange(len(yearlist)-1),
                      columns=['data', 'vazao', 'graus', 'dias no ano'])

dias = 0
dias = np.arange(0, len(ex_max))

meses = 12

try:
    j = 0
    i = 0
    for i in range (0,len(yearlist3)):
        mes = matriz_max.loc[
            matriz_max['data'].dt.year == matriz_max.iloc[0,1].year+i
        ]
        mes = mes.loc[mes['data'].dt.month >= mes_ano_max]
        mes2 = matriz_max.loc[
            matriz_max['data'].dt.year == matriz_max.iloc[0,1].year+i+1
        ]

```

```

mes2 = mes2.loc[mes2['data'].dt.month < mes_ano_max]
mes = mes.append(mes2)

mag_ext_AH_max.iloc[i,0] = mes['vazao'].max()
med3_mov_max = mes.copy()
med3_mov_max['vazao'] = mes.vazao.rolling(window=3).mean()
mag_ext_AH_max.iloc[i,1] = med3_mov_max['vazao'].max()
med7_mov_max = mes.copy()
med7_mov_max['vazao'] = mes.vazao.rolling(window=7).mean()
mag_ext_AH_max.iloc[i,2] = med7_mov_max['vazao'].max()
med30_mov_max = mes.copy()
med30_mov_max['vazao'] = mes.vazao.rolling(window=30).mean()
mag_ext_AH_max.iloc[i,3] = med30_mov_max['vazao'].max()
med90_mov_max = mes.copy()
med90_mov_max['vazao'] = mes.vazao.rolling(window=90).mean()
mag_ext_AH_max.iloc[i,4] = med90_mov_max['vazao'].max()
dias[i] = len(mes)

for j in range (0,meses):
    if mes['vazao'].isna().sum().sum() < 364:
        mes_i = mes.loc[(mes['data'].dt.month==j+1)]
        mag_medias_AH_max.iloc[i, j] = mes_i['vazao'].mean()
        maxi2 = mes.loc[(mes['vazao']==mes['vazao'].min())]
        maxi2 = maxi2.iloc[0]
        ex_max['data'][i] = maxi2['data']
        ex_max['vazao'][i] = maxi2['vazao']
    else:
        ex_max['data'][i] = np.nan
        ex_max['vazao'][i] = np.nan

except IndexError:
    pass

ex_max['dias no ano'] = 0
ex_max['dias no ano'] = pd.DataFrame(dias)
extrem = 5

mag_ext_AH_max = mag_ext_AH_max.dropna()

j=0
for j in range (0,extrem):
    iha.iloc[k,j+51] = mag_ext_AH_max.iloc[:,j].mean()
    iha.iloc[k,j+56] = stats.tstd(mag_ext_AH_max.iloc[:,j])
    iha.iloc[k,j+61] = variation(mag_ext_AH_max.iloc[:,j], axis = 0)

##### G3 - TIMING OF EXTREMES #####
##Calculating timing of extremes for minimum discharge

#dates to degrees
graus = 0
graus = np.arange(0, len(ex_min)).astype(float)

try:
    i = 0
    for i in range(0, len(ex_min)):
        if np.isnan(ex_min['vazao'][i]) == False:
            if ex_min['dias no ano'][i] == 365:

```

```

if ex_min['data'][i].month == 1:
    graus[i] = (360/365)*ex_min['data'][i].day
elif ex_min['data'][i].month == 2:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+31)
elif ex_min['data'][i].month == 3:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+59)
elif ex_min['data'][i].month == 4:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+90)
elif ex_min['data'][i].month == 5:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+120)
elif ex_min['data'][i].month == 6:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+151)
elif ex_min['data'][i].month == 7:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+181)
elif ex_min['data'][i].month == 8:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+212)
elif ex_min['data'][i].month == 9:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+243)
elif ex_min['data'][i].month == 10:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+273)
elif ex_min['data'][i].month == 11:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+304)
elif ex_min['data'][i].month == 12:
    graus[i] = (360/365)*(ex_min['data'][i].day+334)

elif ex_min['dias no ano'][i] == 366:
    if ex_min['data'][i].month == 1:
        graus[i] = (360/366)*ex_min['data'][i].day
    elif ex_min['data'][i].month == 2:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+31)
    elif ex_min['data'][i].month == 3:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+60)
    elif ex_min['data'][i].month == 4:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+91)
    elif ex_min['data'][i].month == 5:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+121)
    elif ex_min['data'][i].month == 6:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+152)
    elif ex_min['data'][i].month == 7:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+182)
    elif ex_min['data'][i].month == 8:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+213)
    elif ex_min['data'][i].month == 9:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+244)
    elif ex_min['data'][i].month == 10:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+274)
    elif ex_min['data'][i].month == 11:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+305)
    elif ex_min['data'][i].month == 12:
        graus[i] = (360/366)*(ex_min['data'][i].day+335)

else:
    print("One of the years has less than 365 days, check input data")

else:
    graus[i] = np.nan

except IndexError:
    pass

```

```

ex_min['graus'] = 0
ex_min['graus'] = pd.DataFrame(graus)

sin_mean = 0
sin_mean = np.sum(np.sin(np.radians(ex_min['graus']))) / len(ex_min)
cos_mean = 0
cos_mean = np.sum(np.cos(np.radians(ex_min['graus']))) / len(ex_min)

timing_min = 0
timing_min = np.degrees(np.arctan2(sin_mean, cos_mean))
if timing_min < 0:
    timing_min = timing_min + 360
if timing_min == 0:
    timing_min = 360
timing_min = int(np.round(timing_min * 365 / 360))
graus = graus[np.logical_not(np.isnan(graus))]
timing_min_std = int(round(np.degrees(circstd(graus * np.pi / 180)) * 365 / 360))
timing_min_var = circvar(graus * np.pi / 180)

# transforming degrees to month-day
if timing_min > 0 and timing_min < 32:
    timing_min = "01-" + str(timing_min)
elif timing_min >= 32 and timing_min < 60:
    timing_min = "02-" + str(timing_min - 31)
elif timing_min >= 60 and timing_min < 91:
    timing_min = "03-" + str(timing_min - 59)
elif timing_min >= 91 and timing_min < 121:
    timing_min = "04-" + str(timing_min - 90)
elif timing_min >= 121 and timing_min < 152:
    timing_min = "05-" + str(timing_min - 120)
elif timing_min >= 152 and timing_min < 182:
    timing_min = "06-" + str(timing_min - 151)
elif timing_min >= 182 and timing_min < 213:
    timing_min = "07-" + str(timing_min - 181)
elif timing_min >= 213 and timing_min < 244:
    timing_min = "08-" + str(timing_min - 212)
elif timing_min >= 244 and timing_min < 274:
    timing_min = "09-" + str(timing_min - 243)
elif timing_min >= 274 and timing_min < 305:
    timing_min = "10-" + str(timing_min - 273)
elif timing_min >= 305 and timing_min < 335:
    timing_min = "11-" + str(timing_min - 304)
elif timing_min >= 335 and timing_min <= 365:
    timing_min = "12-" + str(timing_min - 334)

iha.iloc[k, 66] = timing_min
iha.iloc[k, 67] = timing_min_std
iha.iloc[k, 68] = timing_min_var

# Calculating timing of extreme for maximum discharge

# dates to degrees
graus = 0
graus = np.arange(0, len(ex_max)).astype(float)

try:
    i = 0

```

```

for i in range(0, len(ex_max)):
    if np.isnan(ex_max['vazao'][i]) == False:
        if ex_max['dias no ano'][i] == 365:
            if ex_max['data'][i].month == 1:
                graus[i] = (360/365)*ex_max['data'][i].day
            elif ex_max['data'][i].month == 2:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+31)
            elif ex_max['data'][i].month == 3:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+59)
            elif ex_max['data'][i].month == 4:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+90)
            elif ex_max['data'][i].month == 5:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+120)
            elif ex_max['data'][i].month == 6:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+151)
            elif ex_max['data'][i].month == 7:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+181)
            elif ex_max['data'][i].month == 8:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+212)
            elif ex_max['data'][i].month == 9:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+243)
            elif ex_max['data'][i].month == 10:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+273)
            elif ex_max['data'][i].month == 11:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+304)
            elif ex_max['data'][i].month == 12:
                graus[i] = (360/365)*(ex_max['data'][i].day+334)

        elif ex_max['dias no ano'][i] == 366:
            if ex_max['data'][i].month == 1:
                graus[i] = (360/366)*ex_max['data'][i].day
            elif ex_max['data'][i].month == 2:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+31)
            elif ex_max['data'][i].month == 3:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+60)
            elif ex_max['data'][i].month == 4:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+91)
            elif ex_max['data'][i].month == 5:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+121)
            elif ex_max['data'][i].month == 6:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+152)
            elif ex_max['data'][i].month == 7:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+182)
            elif ex_max['data'][i].month == 8:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+213)
            elif ex_max['data'][i].month == 9:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+244)
            elif ex_max['data'][i].month == 10:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+274)
            elif ex_max['data'][i].month == 11:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+305)
            elif ex_max['data'][i].month == 12:
                graus[i] = (360/366)*(ex_max['data'][i].day+335)

        else:
            print("One of the years has less than 365 days, check input data")

    else:
        graus[i] = np.nan

```

```

except IndexError:
    pass

ex_max['graus'] = 0
ex_max['graus'] = pd.DataFrame(graus)

sin_mean = 0
sin_mean = np.sum(np.sin(np.radians(ex_max['graus']))) / len(ex_max)
cos_mean = 0
cos_mean = np.sum(np.cos(np.radians(ex_max['graus']))) / len(ex_max)

timing_max = 0
timing_max = np.degrees(np.arctan2(sin_mean, cos_mean))
if timing_max < 0:
    timing_max = timing_max + 360
if timing_max == 0:
    timing_max = 360
timing_max = int(np.round(timing_max * 365 / 360))
graus = graus[np.logical_not(np.isnan(graus))]
timing_max_std = int(round(np.degrees(circstd(graus * np.pi / 180)) * 365 / 360))
timing_max_var = circvar(graus * np.pi / 180)

# transforming degrees to month-day
if timing_max > 0 and timing_max < 32:
    timing_max = "01-" + str(timing_max)
elif timing_max >= 32 and timing_max < 60:
    timing_max = "02-" + str(timing_max - 31)
elif timing_max >= 60 and timing_max < 91:
    timing_max = "03-" + str(timing_max - 59)
elif timing_max >= 91 and timing_max < 121:
    timing_max = "04-" + str(timing_max - 90)
elif timing_max >= 121 and timing_max < 152:
    timing_max = "05-" + str(timing_max - 120)
elif timing_max >= 152 and timing_max < 182:
    timing_max = "06-" + str(timing_max - 151)
elif timing_max >= 182 and timing_max < 213:
    timing_max = "07-" + str(timing_max - 181)
elif timing_max >= 213 and timing_max < 244:
    timing_max = "08-" + str(timing_max - 212)
elif timing_max >= 244 and timing_max < 274:
    timing_max = "09-" + str(timing_max - 243)
elif timing_max >= 274 and timing_max < 305:
    timing_max = "10-" + str(timing_max - 273)
elif timing_max >= 305 and timing_max < 335:
    timing_max = "11-" + str(timing_max - 304)
elif timing_max >= 335 and timing_max <= 365:
    timing_max = "12-" + str(timing_max - 334)

iha.iloc[k,69] = timing_max
iha.iloc[k,70] = timing_max_std
iha.iloc[k,71] = timing_max_var

##### G4 - GRADIENT OF VARIABLES IN TIME #####
# Calculating ascension rate (GA), descent rate (GD) and reversion rate (RV)

mag_G = 0
mag_G = pd.DataFrame(index = np.arange(len(yearlist)), columns=['GA','GD','RV'])

```

```

try:
    i = 0

    for i in range (0,len(mag_G)):
        j = 0

        ano_g = matriz.loc[
            matriz['data'].dt.year == matriz.iloc[0,1].year+i]
        ano_g['GA'] = 0
        ano_g['GD'] = 0
        ano_g['GAD'] = 0
        ano_g['rev'] = 0

        ano_g['GAD'] = ano_g['vazao']-ano_g['vazao'].shift(1)
        ano_g['GD'] = np.where(ano_g['GAD']<0,ano_g['GAD'],0)
        ano_g['GA'] = np.where(ano_g['GAD']>0,ano_g['GAD'],0)
        ano_g['rev'] = np.where(
            (ano_g['GAD']*ano_g['GAD'].shift(-1)) < 0,1,0
        )

        ano_g.iloc[0,3] = 0
        ano_g.iloc[0,4] = 0
        mag_G.iloc[i,0] = sum(ano_g['GA'])/(len(ano_g) -
            ano_g['GA'].isin([0]).sum())
        mag_G.iloc[i,1] = sum(-ano_g['GD'])/(len(ano_g) -
            ano_g['GD'].isin([0]).sum())
        mag_G.iloc[i,2] = sum(ano_g['rev'])

except IndexError:
    pass

# Filling the IHA matrix with rates values
mag_G = mag_G.dropna()

iha.iloc[k,72] = mag_G['GA'].mean()
iha.iloc[k,73] = mag_G['GD'].mean()
iha.iloc[k,74] = mag_G['RV'].mean()

iha.iloc[k,75] = stats.tstd(mag_G['GA'])
iha.iloc[k,76] = stats.tstd(mag_G['GD'])
iha.iloc[k,77] = stats.tstd(mag_G['RV'])

iha.iloc[k,78] = variation(mag_G['GA'])
iha.iloc[k,79] = variation(mag_G['GD'])
iha.iloc[k,80] = variation(mag_G['RV'])

#####
after = datetime.datetime.now().isoformat(timespec='minutes')
after = pd.to_datetime(after)
tempo_execucao = after-before
print(tempo_execucao)

duration = 1000 # milliseconds
freq = 440 # Hz
winsound.Beep(freq, duration)

##### END #####

```

## SCRIPT HYDRO SIGNATURES MODIFICADO

```

# -----          Script for Hydrological Signatures          ----- #
# --Instituto de Pesquisas Hidraulicas - Hidrologia em Grande Escala (HGE)
# --Author: Larissa de Castro Ribeiro (larissa.ribeirocr@gmail.com)
# --Advisor: Dr. Rodrigo Cauduro Dias de Paiva
# --Date: 19/11/2019
# --Updated in: 04/03/2021

# This script is a modification of the original scrit:
# https://github.com/naddor/camels/tree/master/hydro

# Original Author's Notes:
# This document contains R functions to compute streamflow indices
# (also referred to as hydrological signatures).
# These functions have been used and are still used to produce the CAMELS datasets. The wrapper
# compute_hydro_signatures_camels enables the computation of the signatures selected
# for the original CAMELS paper
# (Addor et al., 2017, HESS).
# For some signatures, several formulations have been implemented and the resulting estimates are
# returned as a
# data.frame. Alternative formulations can be added. The objective is to assess the
# sensitivity of the results to the formulation of the hydrological signatures.

#### STEP 1 - LOAD FUNCTIONS
setwd("D:/working_directory/")
source(paste("D:/working_directory/time_tools.R",sep="")) # for month2sea and get_hydro_year
#source(paste(dir_r_scripts,'time_tools.R',sep="")) # for month2sea and get_hydro_year

# STEP 2 - library to read matlab data formats into R
library(R.matlab)
library(lfstat)
library(readtext)
library(hdf5r)
#### WRAPPER AND PARAMETER VALUES TO COMPUTE STANDARD CAMELS
HYDROLOGICAL
####SIGNATURES

# q_mean      - Mean daily discharge
# runoff_ratio - Runoff ratio (ratio of mean daily discharge to mean daily precipitation)
# stream_elas - Streamflow precipitation elasticity (sensitivity of streamflow to changes in precipitation
at the annual time scale)
# slope_fdc   - Slope of the flow duration curve (between 33rd and 66th streamflow percentiles)
# baseflow_index - Baseflow index (ratio of mean daily baseflow to mean daily discharge)
# hfd_mean    - Mean half-flow date (date on which the cumulative discharge since October first
# reaches half of the annual discharge)
# Q5         - 5% Flow quantile (low flow)
# Q95        - 95% Flow quantile (high flow)
# high_q_freq - Frequency of high-flow days (>9 times the median daily flow)
# high_q_dur  - Frequency of high-flow days (>9 times the median daily flow)
# low_q_freq  - Frequency of low-flow days (<0.2 times the mean daily flow)
# low_q_dur   - Average duration of low-flow events (number of consecutive days <0.2 times the
# mean daily flow)
# zero_q_freq - Frequency of days with Q = 0 mm/day

#### STEP 3 - FUNCTIONS FOR INDIVIDUAL SIGNATURES

# q_mean      - Mean daily discharge

```

```

compute_q_mean<-function(q,d,tol){

  avail_data<-find_avail_data_array(q,tol)

  q_mean_yea<-NA
  q_mean_djf<-NA
  q_mean_jja<-NA

  if(any(!is.na(avail_data))){

    q_mean_yea<-mean(q[avail_data])
    sea<-month2sea(format(d[avail_data],%m')) # determine season
    table_sea<-table(sea)

    # if the number of days in DJF and JJA do not differ significantly
    if(abs(table_sea[['djf']]-table_sea[['jja']])<0.05*table_sea[['djf']]){

      q_sea<-rapply(split(q[avail_data],sea),mean)

      q_mean_djf<-q_sea['djf']
      q_mean_jja<-q_sea['jja']

    }
  }

  q_mean<-data.frame(q_mean_yea,q_mean_djf,q_mean_jja,row.names="")

  return(q_mean)

}

# runoff_ratio - Runoff ratio (ratio of mean daily discharge to mean daily precipitation)
comp_r_qp<-function(q,p,tol){

  avail_data<-find_avail_data_df(data.frame(q,p),tol) # time steps for which obs and sim are available

  r_qp<-mean(q[avail_data])/mean(p[avail_data])

  if((!is.na(r_qp))&r_qp>1){

    warning(paste('Runoff ratio is greater than 1:',r_qp))

  }

  return(r_qp)

}

# stream_elas - Streamflow precipitation elasticity (sensitivity of streamflow to changes in
# precipitation at the annual time scale)
comp_e_qp<-function(q,p,d,tol,hy_cal){

  if(length(q)!=length(d)|length(p)!=length(d)){ stop('P, Q and D must have the same length')}

  avail_data<-find_avail_data_df(data.frame(q,p),tol)
  # time steps for which precipitation and streamflow data are available

  hy<-get_hydro_year(d,hy_cal)

```

```

if(any(table(hy)<365)){warning('Not all the hydrological years are complete')}

mp_tot<-mean(p[avail_data],na.rm=TRUE) # mean long-term precip
mq_tot<-mean(q[avail_data],na.rm=TRUE) # mean long-term discharge

mp<-rapply(split(p[avail_data],hy[avail_data]),mean,na.rm=TRUE) # mean annual precip
mq<-rapply(split(q[avail_data],hy[avail_data]),mean,na.rm=TRUE) # mean annual discharge

# Anomaly computed with respect to previous year (Sawicz et al., 2011, HESS)
dp_sawicz<-diff(mp) # precip difference between two consecutive years
dq_sawicz<-diff(mq) # discharge difference between two consecutive years

e_qp_sawicz<-median((dq_sawicz/mq_tot)/(dp_sawicz/mp_tot))

# Anomaly computed with respect to long-term mean (Sankarasubramanian et al., 2001, WRR)
dp_sanka<-mp-mp_tot
dq_sanka<-mq-mq_tot

e_qp_sanka<-median((dq_sanka/mq_tot)/(dp_sanka/mp_tot))

# Return both estimates
e_qp<-data.frame(e_qp_sawicz=e_qp_sawicz,e_qp_sanka=e_qp_sanka)

return(e_qp)
}

# slope_fdc - Slope of the flow duration curve
#(between the log-transformed 33rd and 66th streamflow percentiles)

comp_s_fdc<-function(q,tol){

# time for which obs are available this also set the whole timeseries
# as unavailable is the proportion of NA values is greater than tol
avail_data<-find_avail_data_array(q,tol)

# initilise estimates, which will be overwritten if conditions to compute SFDC are met
sfdc_sawicz_2011<-NA
sfdc_yadav_2007<-NA
sfdc_mcmillan_2017<-NA
sfdc_addor_2017<-NA

if(any(!is.na(avail_data))){

# define quantiles for the FDC
quant<-seq(0,1,0.001)
fdc<-as.numeric(rev(quantile(q[avail_data],quant))) # rev because probability of exceedance

# retrieve Q33 and Q66
q33<-fdc[quant==0.33] # flow exceeded 33% of the time
q66<-fdc[quant==0.66] # flow exceeded 66% of the time
q_med<-fdc[quant==0.50] # median flow
q_mean<-mean(q[avail_data])

# plot FDC
# plot(quant,fdc,log='y',ylab='Discharge [mm/day]',xlab='Percentage time flow is exceeded',type='l')
# points(c(0.33,0.66),c(q33,q66),col='red',pch=16)

if(q66!=0&&!is.na(q66)){ # if more than a third of values are 0, log(q66) can't be computed

```

```

# Sawicz et al 2011, Eq. 3: 10.5194/hess-15-2895-2011
# "the slope of the FDC is calculated between the 33rd and 66th streamflow percentiles,
# since at semi-log scale this represents a relatively linear part of the FDC"
sfdc_sawicz_2011<-(log(q33)-log(q66))/(0.66-0.33)

# Yadav et al 2007, Table 3: 10.1016/j.advwatres.2007.01.005
# "Slope of part of curve between the 33% and 66% flow exceedance values of streamflow normalized
by their means"
# Also used by Westerberg and McMillan 2015, Table 2: 10.5194/hess-19-3951-2015
# "Slope of the FDC between the 33 and 66% exceedance values of streamflow normalised by its mean
(Yadav et al., 2007)"
sfdc_yadav_2007<-(q33/q_mean-q66/q_mean)/(0.66-0.33)

# McMillan et al 2017, see text and Figure 1b: 10.1002/hyp.11300
# "slope in the interval 0.33 to 0.66, in log space, normalised by median flow"
sfdc_mcmillan_2017<-(log(q33/q_med)-log(q66/q_med))/(0.66-0.33)

# Addor et al 2017: in this paper, standard quantiles (i.e. corresponding to probability of non-
exceedence)
# were used, leading to estimates slightly different from those obtained following Sawzic et al. 2011
q33_quant<-as.numeric(quantile(q[avail_data],0.33)) # corresponds to flow exceeded 67% (100-33%)
of the time
q66_quant<-as.numeric(quantile(q[avail_data],0.66)) # corresponds to flow exceeded 34% (100-66%)
of the time
sfdc_addor_2017<-(log(q66_quant)-log(q33_quant))/(0.66-0.33)

}
}

return(data.frame(sfdc_yadav_2007,sfdc_sawicz_2011,sfdc_mcmillan_2017,sfdc_addor_2017))

}

# baseflow_index - Baseflow index (ratio of mean daily baseflow to mean daily discharge)

comp_i_bf<-function(q,d,alpha,passes,tol){

  if(sum(is.na(q))/length(q)>=tol){ # not using avail_data here, since it would remove time steps
# with NA, and thereby alter the consistency of the time series and bias the baseflow separation

    i_bf_landson<-NA
    i_bf_lfstat<-NA

  } else {

    # Ladson et al. (2013). "A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter."
    # Australian Journal of Water Resources 17(1): 173-180.
    # https://tonyladson.wordpress.com/2013/10/01/a-standard-approach-to-baseflow-separation-using-the-lyne-and-hollick-filter/#comments
    source('https://raw.githubusercontent.com/TonyLadson/BaseflowSeparation_LyneHollick/master/BFI.R') # source
code
    dat_landson<-BFI(q,alpha,passes,ReturnQbase=TRUE)
    bf_landson<-dat_landson$Qbase

    # lfstat package based on Tallaksen, L. M. and Van Lanen, H. A. J. 2004 Hydrological Drought: Processes
and
    # Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science 48,
Amsterdam: Elsevier.
    require(lfstat)

```

```

q_dat<-
data.frame(flow=q,day=as.numeric(format(d,'%d')),month=as.numeric(format(d,'%m')),year=format(d,'%Y'))
lf_dat<-createlfobj(q_dat,hyearstart=10) # hyearstart, integer between 1 and 12, indicating the start of the
hydrological year, 10 for october
bf_lfstst<-lf_dat$baseflow

# compute IBF
if(length(bf_landson)!=length(q)){stop('Baseflow time series derived using Landson does not match
length of Q_OBS')}
if(length(bf_lfstst)!=length(q)){stop('Baseflow time series derived using lfstst does not match length of
Q_OBS')}

# find available data
avail_data<-find_avail_data_df(data.frame(q,bf_landson,bf_lfstst,tol) # time steps for which
q,bf_landson,bf_lfstst are available

i_bf_landson<-sum(bf_landson[avail_data])/sum(q[avail_data])
i_bf_lfstst<-sum(bf_lfstst[avail_data])/sum(q[avail_data])

}

return(data.frame(i_bf_landson,i_bf_lfstst))

}

# Half flow date (Court, 1962): the date on which the cumulative discharge since the beginning of the
hydrological year reaches half of the annual discharge

# Note: the date considered here is the number of days since the beginning of the hydrological year.
# Using days since 1st Jan instead is problematic in catchments with a half flow date occurring close to the
end of the calendar year,
# as it leads to both large (e.g. 360) and small (e.g. 10) HFDs depending on the year, which biases the mean
HFD.

compute_hfd_mean_sd<-function(q,d,tol,hy_cal){

# check data availability
avail_data<-find_avail_data_array(q,tol)

if(all(is.na(avail_data))){ # fraction of missing values over the whole period is above tol

return(data.frame(hfd_mean=NA,hfd_sd=NA)) # return NA

} else {

hy_stats<-get_hydro_year_stats(d,hy_cal) # determine hydrological year for given calendar

hy_q<-split(q[avail_data],hy_stats$hy[avail_data]) # discharge for each hydrological year
hy_d<-split(hy_stats$day_of_hy[avail_data],hy_stats$hy[avail_data]) # number of days since beginning
of hydrological year

date_hfd<-c() # date of half flow for each hydrological year in days since the beginning of hydrological
year

for(y in names(hy_q)){ # loop through hydrological years

if(sum(hy_q[[y]])==0){# hfd can't be computed if annual discharge is 0

date_hfd[y]<-NA

```

```

    } else {
      i<-which(cumsum(hy_q[[y]])>0.5*sum(hy_q[[y]]))[1] # index of the first day above half of annual
total  date_hfd[y]<-as.numeric(hy_d[[y]][i])      # number of days since beginning of hydro year
    }
  }
}

if(any(date_hfd<0|date_hfd>366,na.rm=TRUE)){
  stop(paste('Unexpected value half flow date:',date_hfd[date_hfd<0|date_hfd>366]))
}

return(data.frame(hfd_mean=mean(date_hfd,na.rm=TRUE),hfd_sd=sd(date_hfd,na.rm=TRUE)))
}
}

# Flow precentiles
compute_qXX<-function(q,thres,tol){
  if(any(thres<0|thres>1)){stop('Threshold must be between 0 and 1')}
  avail_data<-find_avail_data_array(q,tol) # time steps for which obs and sim are available
  if(all(is.na(avail_data))){ # if there is more than tol% of missing value
    qXX<-data.frame(t(rep(NA,length(thres))))
  }else{
    qXX<-data.frame(t(quantile(q[avail_data],1-thres)))
  }
  names(qXX)=paste('q',thres*100,sep='')
  return(qXX)
}

# Frequency and duration of high flows
compute_hf_freq_dur<-function(q,d,tol){
  avail_data<-find_avail_data_array(q,tol) # time steps for which obs and sim are available
  if(all(is.na(avail_data))){
    return(data.frame(hf_freq=NA,hf_dur=NA))
  } else {
    hf<-q[avail_data]>9*median(q[avail_data]) # time steps considered as high flows
    if(any(hf)){

```

```

# in dry conditions, the median of q can be 0, so when using >, days with no discharge are high flow...
# when using > instead not >=, every day with some discharge is a high flow...

# Mean duration of daily high flow events
hf_bin<-paste(as.numeric(hf),collapse=") # a string where one or more 1 indicate a high flow event
hf_dur_noise<-rapply(strsplit(hf_bin,0),nchar) # use strsplit to isolate successive time steps with high
discharge hf_dur<-mean(hf_dur_noise[hf_dur_noise>0]) # mean duration

# Average number of daily high-flow events per year
# Note: I used to split the time series into hydrological years but this has 2 drawbacks:
# 1: it can split extreme events (esp. low flows) in two
# 2: when there is missing data, they are not accounted for when the mean is computed over all the years
# Hence, I compute the number of time steps considered as high flow for the whole period and then
# divide it by the number of time steps with available data

# hf_hy<-split(hf,get_hydro_year(d[avail_data])) # old method: split time series into hydrological years
# hf_freq<-mean(rapply(hf_hy,sum)) # compute mean number of time steps considered as high
flow per year hf_freq<-sum(hf)/sum(avail_data)*365.25

} else {

hf_freq<-0
hf_dur<-0

}

return(data.frame(hf_freq,hf_dur))

}
}

# Frequency and duration of low flows
compute_lf_freq_dur<-function(q,d,tol){

avail_data<-find_avail_data_array(q,tol) # time steps for which obs and sim are available

if(all(is.na(avail_data))){

return(data.frame(lf_freq=NA,lf_dur=NA))

} else {

lf<-q[avail_data]<=0.2*mean(q[avail_data]) # time steps considered as low flows

if(any(lf)){

# Mean duration of daily high flow events
lf_bin<-paste(as.numeric(lf),collapse=") # a string where one or more 1 indicate a low flow event
lf_dur_noise<-rapply(strsplit(lf_bin,0),nchar) # use strsplit to isolate successive time steps with low
discharge lf_dur<-mean(lf_dur_noise[lf_dur_noise>0]) # mean duration

# Average number of daily low flow events per year - see comment in compute_lf_freq_dur
# lf_hy<-split(lf,get_hydro_year(d[avail_data])) # old method: split time series into hydrological years
# lf_freq<-mean(rapply(lf_hy,sum)) # compute mean number of time steps considered as high
flow per year

```

```

lf_freq<-sum(lf)/sum(avail_data)*365.25

} else {

lf_freq=0
lf_dur=0

}
return(data.frame(lf_freq,lf_dur))
}
}

# Proportion of time series with discharge below or at a given threshold
compute_no_flow<-function(q,thres,tol){

avail_data<-find_avail_data_array(q,tol)

return(sum(q[avail_data]<=thres)/length(q[avail_data]))

}

compute_q_seas<-function(q,d,tol){

avail_data<-find_avail_data_array(q,tol)

q_year<-compute_q_mean(q,d,tol)$q_mean_yea
q_mon<-rapply(split(q[avail_data],format(d[avail_data],%m)),mean)

return(sum(abs(q_mon-q_year))/(q_year*12))

}

compute_q_peak<-function(q,d,tol){

avail_data<-find_avail_data_array(q,tol)

if(all(is.na(q[avail_data]))){

return(NA)

} else{

which.max(rapply(split(q[avail_data],format(d[avail_data],%m)),mean))

}

}

## STEP 4 - compute hydro signatures camels

compute_hydro_signatures_camels<-function(q,p,d,tol,hy_cal){

# input variables:
# q: discharge time series
# p: precipitation time series
# d: date array of class "Date"
# tol: tolerated fraction of NA values in time series
# hy_cal: hydrological year calendar: oct_us_gb OR sep_br OR apr_cl

qxx<-compute_qXX(q,thres=c(0.05,0.95),tol)
hf_stats<-compute_hf_freq_dur(q,d,tol)

```

```

lf_stats<-compute_lf_freq_dur(q,d,tol)
bfi<-comp_i_bf(q,d,alpha=0.925,passes=3,tol)

return(data.frame(q_mean      = compute_q_mean(q,d,tol)$q_mean_yea,
runoff_ratio  = comp_r_qp(q,p,tol),
stream_elas   = comp_e_qp(q,p,d,tol,hy_cal)$e_qp_sanka,
slope_fdc     = comp_s_fdc(q,tol)$sfdc_sawicz_2011,
baseflow_index_landson = bfi$i_bf_landson,
baseflow_index_lfstat = bfi$i_bf_lfstat,
hfd_mean     = compute_hfd_mean_sd(q,d,tol,hy_cal)$hfd_mean,
Q5           = qxx$q95,
Q95          = qxx$q5,
high_q_freq  = hf_stats$hf_freq,
high_q_dur   = hf_stats$hf_dur,
low_q_freq   = lf_stats$lf_freq,
low_q_dur    = lf_stats$lf_dur,
zero_q_freq  = compute_no_flow(q,thres=0,tol)))

}

# STEP 5 - input variables:

q <- readMat("discharge.mat")
q <- q[[1]]
p <- readMat("precipitation.mat")
p <- p[[1]]
d <- read.csv(file ='dates.csv')
head(d)
hy_cal <- 'sep_br'
tol <- 2000

# transform data into atomic vector
d<-array(as.data.frame(d))
q<-array(as.data.frame(q))
p<-array(as.data.frame(p))

## STEP 6 - Calculates the result of the indices using the previous functions
start_time <- as.numeric(as.numeric(Sys.time()), digits=2) # place at start
rows <- dim(q)[2]
index<- data.frame(
  q_mean = numeric(rows), runoff_ratio = numeric(rows), stream_elas = numeric(rows),
  slope_fdc=numeric(rows),                                baseflow_index_landson=numeric(rows),
baseflow_index_lfstat=numeric(rows),
  hfd_mean=numeric(rows),  Q5=numeric(rows),  Q95=numeric(rows),  high_q_freq=numeric(rows),
high_q_dur=numeric(rows),
  low_q_freq=numeric(rows), low_q_dur=numeric(rows),zero_q_freq=numeric(rows)
)
i<-1
for (i in 1:dim(q)[2]) {
  date<-as.Date(d[,i+1], format="%Y-%m-%d") # transform date table into format D
  prec<-unlist(p[,i], use.names=FALSE)
  flow<-unlist(q[,i], use.names=FALSE)
  print(paste("Calculando minibacia ", i, "de ", dim(q)[2]))
  result<- compute_hydro_signatures_camels(flow,prec,date,tol,hy_cal)
  index[i,]<-result
}
end_time <- as.numeric(as.numeric(Sys.time()), digits=2) # place at end
end_time - start_time # run time (in milliseconds)

##### END #####

```