

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

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

**RELATÓRIO TÉCNICO: REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA SOBRE MÉTODOS DE
ESTIMATIVA DE VAZÕES EM LOCAIS SEM
DADOS**

IPH-ANA-HGE-SR-R1

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Revisão bibliográfica sobre métodos de estimativa de vazões em locais sem dados



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

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

COMO CITAR: Collischonn, W., Gama, C. H. de A., Ribeiro, L. de C., Fontana, R. B., Paiva, R. C. D., Sorribas, M. V., 2021. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Relatório técnico: Revisão bibliográfica sobre métodos de estimativa de vazões em locais sem dados: IPH-ANA-HGE-SR-R1. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Sumário

1	Apresentação	10
2	Introdução	11
3	Revisão Bibliográfica	12
3.1	Visão geral de métodos de estimativa de vazões de referência	14
3.2	Método da vazão específica	14
3.3	Regionalização por regressão	15
3.4	Interpolação geoestatística	17
3.5	Modelagem Hidrológica chuva vazão	17
3.6	Métodos de séries curtas	20
3.7	Modelagem hidrológica apoiada por séries curtas	23
3.7.1	Método Silveira	23
3.8	Reanálise hidrológica com assimilação de dados	25
3.8.1	Reanálise Hidrológica	26
3.9	Sensoriamento remoto aplicado para a estimativa de vazões	28
3.9.1	Curva-chave	29
3.9.2	Calibração/assimilação	29
3.9.3	Algoritmos de vazão	29
3.9.4	Potencial do sensoriamento remoto	29
4	Síntese dos métodos:	29
5	Referências Bibliográficas	37

1 APRESENTAÇÃO

Este relatório refere-se ao produto “IPH-ANA-HGE-SR-R1”, do subprojeto “Regionalizações de vazões via modelagem hidrológica”, no contexto do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”, na forma de um Termo de Execução Descentralizada (TED) entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

O projeto está dividido em 4 subprojetos voltados para a (i) capacitação e transferência tecnológica do modelo hidrológico MGB para aplicações e desenvolvimento na ANA, (ii) desenvolvimento e avaliação de métodos para a regionalização de vazões naturais em escala nacional usando modelagem hidrológica (Modelo MGB América do Sul), e desenvolvimento de base de dados de estimativas de vazões e respectivas incertezas em nível nacional, (iii) avaliação de estimativas de áreas inundadas do modelo MGB e (iv) estimativas de fluxos e estoques hidrológicos em escala nacional com base no modelo MGB aplicadas às Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA) no Brasil. Os produtos esperados incluem novas bases de dados, relatórios, manuais técnicos, cursos de capacitação e publicações técnico científicas.

O objetivo proposto para o subprojeto “Regionalização de vazões via modelagem hidrológica” é o desenvolvimento e avaliação de métodos para a regionalização de vazões naturais em escala nacional usando o modelo hidrológico MGB, desenvolvido em escala continental para toda a América do Sul (MGB-AS), além do desenvolvimento de base de dados de estimativas de vazões e estimativa das incertezas em nível nacional em compatibilidade com a base de dados BHO da ANA.

2 INTRODUÇÃO

O conhecimento das vazões em rios é fundamental para estudos hidrológicos e ambientais e para a adequada gestão de recursos hídricos. Entretanto, existem diversas dificuldades que limitam o monitoramento das vazões para todos os trechos de rios. Neste contexto, historicamente um dos principais desafios mais importantes na hidrologia foi estimar, de forma razoavelmente acurada, a vazão dos rios não monitorados, motivando diversas pesquisas e iniciativas como o PUB - Prediction in Ungauged Basins (Blöschl et al. 2013).

Dada a grande variabilidade natural das vazões dos rios no tempo, o desafio pode ser simplificado através do uso de vazões de referência que representam a disponibilidade hídrica e situações de estiagens e cheias (e.g. Vazão Média, Q95%, Q05%) e que, normalmente, são utilizadas em estudos e tomadas de decisão relacionadas aos recursos hídricos.

A Agência Nacional das Águas (ANA) se destaca por sua atuação na gestão de recursos hídricos em nível nacional. Criada pela lei nº 9.984 de 2000, a Agência Nacional de Águas (ANA) é a agência reguladora dedicada a fazer cumprir os objetivos e diretrizes da Lei das Águas do Brasil, a lei nº 9.433 de 1997. Suas ações incluem, entre outras:

- (i) Regulação do acesso e uso dos recursos hídricos;
- (ii) Monitoramento para o acompanhamento da situação dos recursos hídricos do Brasil;
- (iii) Coordenação da implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos;
- (iv) Planejamento através de planos de bacia e acompanhamento sistemático da situação dos recursos hídricos através do relatório de conjuntura de recursos hídricos.

A ANA também é responsável por manter atualizado o balanço entre oferta e demanda de água no País. Estimativa de vazões de referência são necessárias para atividades da ANA como melhorias nas informações disponíveis na base hidrográfica adotada na regulação via outorgas, planos de bacias, entre outras.

Vazões de referência são tradicionalmente estimadas por métodos de regionalização de vazões (Blöschl et al., 2011; Pruski et al., 2013; Tucci, 2002, 2004), em que modelos estatísticos de base empírica são desenvolvidos para relacionar vazões observadas com variáveis explicativas como área da bacia, precipitação média, etc. Apesar da relativa simplicidade de implementação, não é comum seu uso para regionalização de grandes regiões, devido à variedade de características geológicas, pedológicas e climáticas em domínios de grande extensão.

Por outro lado, simulações do ciclo hidrológico e vazões em rios têm sido utilizadas para dar suporte a gestão de recursos hídricos relacionadas à segurança hídrica, desastres naturais, navegação, agricultura e energia. Predições acuradas auxiliam tomadores de decisões reduzindo riscos e impactos sobre os recursos hídricos (Siqueira et al., 2018). Neste contexto, modelos hidrológicos de grande escala são uma importante ferramenta para a simulação do ciclo hidrológico terrestre. Atualmente, avanços na capacidade de processamento de dados e tecnologias de sensoriamento remoto impulsionam a aplicação desses modelos em escala continental e global com crescente detalhamento espacial (Bierkens, 2015; Bierkens et al., 2015; Sood & Smakhtin, 2015; Wood et al., 2011). Em nível nacional, se destaca o desenvolvimento do modelo MGB (Pontes et al., 2017), capaz de simular o ciclo hidrológico terrestre e estimar séries temporais de vazões ao longo da rede de rios, além de outras variáveis como níveis d'água,

evapotranspiração, áreas inundadas, etc. Este modelo foi recentemente desenvolvido em escala continental para a América do Sul (Siqueira et al., 2018), permitindo uma nova agenda de pesquisa em hidrologia nacional e continental e suas aplicações (Paiva et al., 2017).

Reanálises hidrológicas de modelos de simulação podem ser uma alternativa à regionalização de vazões clássica (e.g. Wongchuig Correa et al., 2017, Wongchuig et al. (2019), Wongchuig et al. (2020) Pereira Pessoa, 2015). Esses resultados podem ser utilizados para o cálculo de vazões de referência (e.g. média, Q_{90}) para aplicações como outorga, planos de bacias e estudos ambientais. Reanálises são métodos científicos voltados para o desenvolvimento de um registro retrospectivo da evolução de um determinado sistema (e.g., 1900 até 2015). Estes métodos foram inicialmente desenvolvidos na área de meteorologia para o estudo do clima e diversas reanálises meteorológicas estão disponíveis (e.g. Kalnay et al., 1996). Reanálises hidrológicas podem ser definidas da mesma forma – estudo retrospectivo (e.g. 1900 até 2015 ou 1998 até 2015) da evolução da hidrologia de uma determinada região (e.g. América do Sul), através da combinação ótima de modelos de simulação (e.g. MGB) e observações (in situ ou de sensoriamento remoto) para estimar da melhor forma possível campos espaço-temporais de estados e armazenamentos hidrológicos como vazões, níveis d'água, umidade do solo, evapotranspiração, etc. O estudo do passado através deste tipo de registro permite compreender o comportamento hidrológico típico de determinada região, estudar eventos extremos do passado, quantificar/determinar valores de variáveis hidrológicas para serem utilizadas em outros estudos (ciência ou engenharia), determinação de vazões de referência para processos de outorga e gestão de recursos hídricos, riscos de secas e cheias, etc.

Assim, existem oportunidades de desenvolvimento relevantes para a estimativa de vazões de referência em escala nacional para o Brasil através do uso de modelagem hidrológica regional/continental para geração de reanálises hidrológicas. Apesar da existência de metodologias clássicas como regionalização usando modelos estatísticos, existem dificuldades em sua aplicação sistemática em nível nacional, onde a heterogeneidade de características hidrológicas pode ser um fator limitante. Por outro lado, modelos hidrológicos como o MGB aplicado à América do Sul (MGB-AS) fornecem oportunidades para estimativas de vazões de referência em escala nacional.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos desafios mais importantes na hidrologia é estimar, de forma razoavelmente acurada, a vazão dos rios. Entretanto, em função da variabilidade do tempo e do clima, a vazão de um rio varia muito ao longo do tempo. Além disso, em função da heterogeneidade das bacias hidrográficas, a vazão varia também no espaço, em diferentes pontos ao longo de um mesmo rio, e em diferentes rios de uma mesma rede hidrográfica.

Numa situação ideal seria possível conhecer o valor da vazão instantânea de todos os rios em todos os lugares do mundo. Entretanto, um dos maiores obstáculos para atingir esta situação ideal é, obviamente, o custo associado ao monitoramento da vazão dos rios.

Neste contexto, historicamente um dos principais desafios históricos na hidrologia foi estimar, de forma razoavelmente acurada, a vazão dos rios não monitorados, motivando diversas pesquisas e iniciativas como o PUB - Prediction in Ungauged Basins (Blöschl et al. 2013).

A variabilidade temporal da vazão, por outro lado, em muitos casos, é contornada com a adoção de valores fixos de vazão que pretendem caracterizar, de alguma forma, a série completa de

vazões. Estes valores são chamados de vazões de referência, indicadores hidrológicos, ou assinaturas hidrológicas, em diferentes comunidades de profissionais.

Uma vazão de referência pode ser definida como um valor de vazão que permite resumir uma grande quantidade de dados da série completa de vazões durante várias dezenas de anos em um determinado local. Diferentes vazões de referência podem ser utilizadas para representar aspectos como a disponibilidade hídrica e situações de estiagens e cheias (e.g. Vazão Média, Q_{95} , Q_{05}). As vazões de referência são muito utilizadas em projetos de engenharia e na tomada de decisão relacionada a gestão de recursos hídricos.

Do ponto de vista ecológico também existe uma preocupação em caracterizar o regime hidrológico de um rio a partir de vazões de referência. Um exemplo disso são os valores de referência denominados Indicators of Hydrologic Alteration (Richter et al., 1996), que incluem vazões altas, médias, baixas e outras características, como número de dias de vazão nula, data de ocorrência dos valores máximos e mínimos, e número de reversões da vazão por ano. Indicadores hidrológicos são diferentes porque envolvem outros aspectos do regime hidrológico, além dos valores de referência médios, mínimos e máximos, que são normalmente utilizados para definir vazões de referência. Indicadores hidrológicos como os descritos por Richter et al. (1996) são utilizados sobretudo por cientistas e gestores envolvidos com a caracterização do regime hidrológico natural, suas relações com o ecossistema, e os impactos ecológicos de possíveis alterações antrópicas deste regime hidrológico natural.

Assinaturas hidrológicas são índices derivados de séries de dados hidrológicos que permitem identificar processos hidrológicos dominantes e outras características físicas da relação entre chuva e vazão em bacias hidrográficas (McMillan et al., 2017). Assinaturas hidrológicas podem incluir vazões de referência e indicadores hidrológicos, porém o conceito de assinaturas hidrológicas é mais amplo do que os conceitos de vazões de referência e de indicadores hidrológicos. Assinaturas hidrológicas são utilizadas sobretudo por hidrólogos ocupados em compreender os processos de geração de escoamento em bacias hidrográficas, e em criar ferramentas de regionalização para a aplicação de modelos hidrológicos em locais pouco monitorados.

A Tabela 1 apresenta uma lista de vazões de referência populares. Uma vazão de referência típica é a vazão média, ou Média de Longo Termo. Valores de vazão de referência considerados mais adequados para caracterizar a disponibilidade hídrica são valores relativamente baixos de vazão, típicos de situações de estiagem, como a vazão que é superada em 95% do tempo, denominada Q_{95} . Por exemplo, a Agência Nacional de Águas - órgão responsável pela outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil em rios de domínio federal – utiliza a Q_{95} como critério para avaliar o balanço entre a demanda e a disponibilidade de água, justificando que a probabilidade de não atendimento de 5% é um valor tolerável, na média de diversos setores usuários (ANA, 2013). Este critério também é utilizado pelo setor elétrico para estimativa de energia garantida em usinas hidroelétricas que não possuem reservatório de regularização. Alguns órgãos estatuais também responsáveis por outorga utilizam como critério a vazão mínima de 10 anos e 7 dias de duração ($Q_{7,10}$), estimada por meio de distribuição estatística (e.g. Weibull). Da mesma forma, é necessário em alguns casos estimar vazões de referência no extremo oposto da faixa de variação, como as vazões médias de cheia, ou as vazões máximas associadas a um determinado tempo de retorno. Vazões de referência podem, também, ser as vazões típicas de um determinado período do ano. Em algumas bacias, decisões importantes podem ser tomadas com base na vazão média do mês de setembro, por exemplo.

Tabela 1 – Exemplos de vazões de referência

VAZÃO DE REFERÊNCIA	APLICAÇÃO
QMLT – Vazão média	Vazões médias
Q ₉₀ – Vazão com 90% de probabilidade de ser igualada ou superada em um dia qualquer	Vazões mínimas
Q ₉₅ – Vazão com 95% de probabilidade de ser igualada ou superada em um dia qualquer	Vazões mínimas
Q _{7,10} – Vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno	Vazões mínimas
Q ₅₀ – Vazão com 50% de probabilidade de ser igualada ou superada em um dia qualquer (Vazão mediana)	Vazões médias
Q ₁₀ – Vazão com 10% de probabilidade de ser igualada ou superada em um dia qualquer	Vazões máximas
Q _{max} (Tr = 2, 5, 10, 25, 50, 100 anos) - Vazão máxima para determinado Tempo de Retorno TR	Vazões Máximas

No caso de bacias muito antropizadas, as vazões do rio são influenciadas por usos d'água através de extração em águas superficiais e subterrâneas, regularização devido ao armazenamento em reservatórios, além de alterações no ciclo hidrológico devido a urbanização, mudanças no uso do solo, etc. Nesses casos, deve-se diferenciar as vazões atuais e vazões naturais, que seriam aquelas estimadas para o caso de não haver influências antrópicas na bacia.

Nos itens a seguir apresenta-se uma visão geral de métodos utilizados para estimativa de vazões em locais sem dados, com ênfase para vazões de referência.

3.1 VISÃO GERAL DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE VAZÕES DE REFERÊNCIA

Em face a baixa densidade de pontos de monitoramento de vazão nos rios, especialmente no Brasil, quase todas as situações de estimativa de vazões de referência são realizadas em locais em que não existe um posto fluviométrico com série de dados suficientemente longa.

Uma revisão da literatura recente permitiu identificar oito tipos de métodos diferentes para a estimativa de vazões em locais sem dados:

1. Regionalização por vazão específica;
2. Regionalização por regressão;
3. Interpolação geoestatística;
4. Modelagem hidrológica;
5. Séries curtas;
6. Modelagem hidrológica apoiada por séries curtas;
7. Reanálise hidrológica com assimilação de dados;
8. Sensoriamento remoto.

Nos próximos itens cada um destes tipos de métodos é brevemente descrito, com alguns comentários sobre suas vantagens e desvantagens.

3.2 MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA

No método da vazão específica a região é considerada hidrológicamente homogênea, e a vazão específica, definida como a razão entre a vazão e a área de drenagem, de um local sem dados é

considerada igual à vazão específica de um local com dados. Dessa forma, a vazão no local sem dados é estimada a partir da vazão no local com dados multiplicada pela relação entre áreas de drenagem, conforme a equação 1.

$$Q_u = Q_g \cdot \frac{A_u}{A_g} \quad (1)$$

onde Q_g é a vazão no local com dados (posto fluviométrico); A_g é a área de drenagem no local com dados; A_u é a área de drenagem no local sem dados; e Q_u é a vazão no local sem dados.

Esta metodologia é uma forma muito simplificada de regionalização, que tem a vantagem de ser extremamente fácil de aplicar. Entretanto, a qualidade da estimativa depende do grau de homogeneidade das características do clima e da bacia hidrográfica. Os resultados do método tendem a ser bons quando as bacias com e sem dados estão mais próximas, especialmente quando são embutidas e tem pequena relação entre áreas.

À medida que aumenta a distância entre a bacia sem dados e a bacia com dados, ou à medida que aumenta a diferença entre as áreas de drenagem, o erro do método tende a aumentar. Este aspecto muitas vezes não é levado em consideração, e, em alguns casos, os dados de vazão específica são tomados em grandes bacias e transferidos para bacias de pequeno e médio porte. Há estudos que mostram que a relação entre vazão e área de drenagem não é linear quando há significativas diferenças de escala, principalmente em bacias de área menor que 50 km² (Tucci, 2002; Agra et al., 2005; Reis et al., 2008).

Da mesma forma, o método tende a ter resultados ruins em regiões com grande variabilidade espacial das características climáticas, especialmente em zonas de transição no regime de chuvas (ANA, 2013).

De acordo com um estudo realizado por Ries e Friez (2000), o método da vazão específica é igual ou melhor do que métodos mais complexos de regressão quando a área de drenagem do local sem dados está entre 0,3 e 1,5 vezes a área de drenagem do local com dados.

Em alguns casos, o método da vazão específica pode ser aplicado considerando a vazão específica da bacia incremental, tipicamente estimada pela diferença de vazões entre dois postos fluviométricos localizados um a jusante do outro na mesma rede de drenagem. Desta forma é possível caracterizar melhor a heterogeneidade hidrológica de uma grande região, em que existem vários postos fluviométricos (Laaha e Blöschl, 2007). Por outro lado, há o risco de amplificação do erro, já que a vazão incremental é obtida pela diferença de dois valores que são estimados com erros.

3.3 REGIONALIZAÇÃO POR REGRESSÃO

Nos métodos de regionalização por regressão busca-se uma relação estatística entre a vazão e características físicas da bacia que podem ser mais facilmente identificadas, como a área de drenagem, a declividade, a precipitação média, entre outras.

Há diversos métodos de regionalização por regressão. Tucci (1993), por exemplo, fez distinção entre três tipos de métodos: 1) Métodos que regionalizam os parâmetros da distribuição estatística; 2) Métodos que regionalizam o evento com um determinado risco e 3) Métodos que regionalizam uma curva adimensional de probabilidades, denominado método *index-flood*.

Para a estimativa de vazões de referência, como a Q90 ou a Q7,10, pode ser aplicado o segundo tipo de método identificado por Tucci (1993). Assim, este método inicia pela estimativa dos valores da vazão de referência em cada um dos postos fluviométricos com dados. A seguir, são obtidas as características fisiográficas e climáticas da bacia contribuinte a cada um dos postos fluviométricos. Finalmente, são geradas equações de regressão, relacionando a vazão às características fisiográficas e climáticas. Desta forma, torna-se possível obter a vazão de um local não monitorado, já que mesmo em uma bacia sem dados de vazão é possível conhecer as características fisiográficas e climáticas.

A equação de regressão pode ser Global ou Regional (Salinas et al., 2013). Na regionalização global é buscada uma única equação de regressão com todos os dados conhecidos. Na abordagem regional a área de estudo é dividida em sub-regiões, de acordo com algum critério de semelhança hidrológica (Castellarin et al., 2004), e uma equação de regressão diferente é obtida para cada sub-região.

Ao longo do tempo, diferentes métodos foram propostos para a divisão da área em sub-regiões (Laaha e Blöschl, 2005). Um dos métodos mais simples é obter uma equação de regressão global com todos os dados e dividir a área em sub-regiões de acordo com os resíduos desta regressão global em cada um dos postos fluviométricos. Outro método muito popular é a distância ou vizinhança geográfica. Além destes, diversos outros métodos mais sofisticados do ponto de vista estatístico foram desenvolvidos ao longo das últimas décadas.

Em geral, o desempenho das equações regionais é melhor do que o das equações globais na estimativa da vazão em locais sem dados (Salinas et al., 2013; Laaha e Blöschl, 2006). Entretanto, a divisão da área de estudo em sub-regiões deve ser feita com cuidado para não comprometer a capacidade de extrapolação do método.

A regionalização com equações de regressão é muito utilizada no Brasil, seguindo metodologias descritas por ELETROBRÁS (1985), Tucci (1993) e CPRM (eg. Melo e Villas Boas, 2017; Santos, 2015 e Pinto e Alves, 2001).

A CPRM – Serviço Geológico do Brasil realizou estudos de regionalização de vazões mínimas (Q95 ou Q7,10) em diversas bacias hidrográficas do Brasil, como a bacia do Alto São Francisco (Pinto e Alves, 2001), rio Paraíba do Sul (Melo e Villas Boas, 2017), as bacias litorâneas de Pernambuco e Alagoas (Santos, 2015) e Bacias dos rios Itapicuru, Vaza Barris, Real, Inhambupe, Pojuca, Sergipe, Japarutuba, Subaúma e Jacuípe (Virães, 2013). Esta regionalização se deu estabelecendo as equações regionais de regressão, com base nas variáveis explicativas de área de drenagem e precipitação total anual média, definindo-se regiões homogêneas (Nathan e McMahon, 1990). De acordo com estes autores, a maioria das equações regionais destes estudos apresentou um desempenho de resultados com desvio padrão dentro de um limite de erro pré-estabelecido de 25%.

Uma das vantagens do método de regionalização utilizando equações de regressão em relação ao método da vazão específica é que a equação de regressão pode representar a heterogeneidade da bacia hidrográfica, desde que esta heterogeneidade seja adequadamente representada pelas variáveis utilizadas na regionalização. Além disso, a equação de regressão normalmente está apoiada em dados de vários postos fluviométricos, fazendo com que eventuais erros em um ou outro posto tenham menor impacto na estimativa da vazão no local sem dados.

A desvantagem da regionalização por regressão é que é um pouco mais complexa do que o método de vazão específica. Além disso, é necessário que os postos fluviométricos utilizados tenham séries de dados observados com o mesmo tamanho e que as medições sejam concomitantes, o que, em muitos casos, exige algum método de preenchimento de falhas.

3.4 INTERPOLAÇÃO GEOESTATÍSTICA

A interpolação de dados de vazão sobre a rede de drenagem é uma metodologia para estimativa de vazões em locais sem dados que pode ser utilizada para vazões de referência e que também tem sido proposta como forma de estimar séries de vazões.

Entre os métodos de interpolação a metodologia que se destaca na literatura ao longo dos últimos 15 anos é denominada Top-Kriging (Skoien et al., 2006; Archfield et al., 2013). Esta metodologia é inspirada no método de Kriging para interpolação de dados, mas adaptada para a estrutura topológica dos dados de vazão em rios.

Enquanto o método de Kriging tradicional explora uma função entre a correlação de pares de pontos com a distância euclidiana entre estes pontos, o método Top-Kriging parte do reconhecimento que a água é obrigada a percorrer a rede de drenagem, de forma que bacias embutidas devem ter maior correlação do que bacias vizinhas não embutidas, independentemente da distância euclidiana (Gottschalk et al., 2011).

O método Top-Kriging considera dois tipos de processos diferentes que são responsáveis pela resposta das bacias hidrográficas: 1) processos contínuos no espaço, como é o caso da geração de escoamento, para os quais a distância euclidiana é adequada e 2) processos de integração e propagação que ocorrem ao longo da rede de drenagem, em que as variáveis são definidas somente para pontos da rede de drenagem e para os quais a distância euclidiana não é adequada.

Laaha et al. (2014) compararam o método Top-kriging com a regionalização baseada em equações de regressão para estimar vazões mínimas em 300 bacias na Austria, e concluíram que os erros do método Top-Kriging são menores ou iguais aos erros da metodologia alternativa.

Uma vantagem do método de interpolação geoestatístico é que a correlação espacial entre as vazões é explorada diretamente, não havendo necessidade para dividir a área de estudo em sub-regiões, como na regionalização por regressão. Por outro lado, em geral uma densidade relativamente alta de postos fluviométricos é necessária para que o método apresente bons resultados, conforme demonstrado por Parajka et al. (2015).

A interpolação por Top-Kriging também pode ser utilizada para gerar séries de vazão em locais sem dados (Skøien and Blöschl, 2007) e, em alguns casos com desempenho superior ao obtido com modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão (Viglione et al., 2013).

Uma versão simplificada da interpolação, não relacionada ao método Top-Kriging, e utilizada em algumas aplicações no Brasil foi apresentada por Chaves (2002).

3.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA CHUVA VAZÃO

Modelos hidrológicos de bacias hidrográficas são ferramentas criadas para extrapolar medições hidrológicas no tempo e no espaço. Os modelos do tipo conceitual são baseados em alguns princípios físicos fundamentais, como a equação de conservação de massa. Os modelos denominados “de base física” utilizam estes mesmos princípios, além de algumas outras leis

físicas, como conservação de energia e quantidade de movimento. Já os modelos empíricos são desenvolvidos buscando apenas uma boa representação das variáveis de saída, sem procurar representar os processos internos do sistema físico.

Mesmo os modelos de base física e conceituais tem embutidos diversos processos que são representados de forma empírica. Dessa forma, existe a necessidade de calibrar os parâmetros destes modelos através da comparação dos valores calculados com os valores observados de variáveis como a vazão. Isto dificulta, obviamente, a aplicação de modelos do tipo chuva-vazão para a estimativa de vazão em locais sem dados.

A aplicação de um modelo do tipo chuva vazão em uma bacia sem dados normalmente é precedida pela calibração anterior em uma ou mais bacias com dados. Depois de estabelecidos os valores dos parâmetros na ou nas bacias com dados, os parâmetros do modelo são transferidos para a bacia sem dados. Há diversas metodologias para esta transferência, conforme mostra uma revisão recente de Guo et al. (2020). Duas estratégias principais são utilizadas para a aplicação de modelos do tipo chuva-vazão em locais sem dados.

A primeira estratégia consiste em calibrar o modelo em diferentes bacias e relacionar os valores dos parâmetros, obtidos por calibração, com valores de outras variáveis que podem ser mais facilmente obtidas, como o percentual de argila no solo, a declividade do terreno, e o percentual de áreas urbanas, através de uma relação empírica. Posteriormente o modelo é aplicado na bacia sem dados, com os valores dos parâmetros estimados pela relação empírica obtida nas bacias com dados. Esta estratégia é muito adotada em modelos hidrológicos do tipo concentrado, em que alguns poucos parâmetros representam toda a área da bacia (Wagner e Weather, 2006).

A segunda estratégia consiste em dividir a região em classes de resposta hidrológica, com base em mapas de tipos de solos, tipos de litologia, tipos de vegetação e de características do relevo, e, durante a etapa de calibração, associar os valores dos parâmetros aos valores das classes de resposta hidrológica. Esta estratégia é mais frequentemente adota em modelos hidrológicos do tipo distribuído.

Alguns exemplos da aplicação de modelos hidrológicos chuva-vazão do tipo chuva vazão para a estimativa de vazões em locais sem dados no Brasil são apresentados por Alexandre et al. (2005), Diniz e Clarke (2001), Saraiva et al. (2011), Otsuki e Reis (2011) e Virões e Cirilo (2019).

Alexandre et al. (2005) aplicaram o modelo SMAP (Lopes et al., 1981) e relacionaram dois dos seus principais parâmetros às seguintes variáveis explanatórias: capacidade de armazenamento médio do solo; precipitação média anual e porcentagem da bacia situada sobre rochas cristalinas.

Otsuki e Reis (2011) testaram a aplicação do modelo SMAP em bacias sem dados, e regionalizaram os parâmetros desse modelo considerando cinco variáveis explanatórias: 1) área da bacia; 2) precipitação média anual; 3) comprimento do rio principal; 4) declividade do rio principal; 5) fator de forma da bacia.

Virões e Cirilo (2019) avaliaram a aplicação do modelo MODHAC com transferência de parâmetros de bacias vizinhas, na região NE do Brasil, e observaram grandes erros na estimativa de vazões baixas.

Segundo o estudo apresentado por Wongchuig et al., (2020), os modelos hidrológicos globais, que são aplicados normalmente com pouca ou nenhuma calibração, estimam vazões com erros

nas vazões diárias que podem ser da ordem de 52% a 103% (RMSE) para a região da América do Sul.

Experimentos realizados em outros países também sugerem que a estimativa de vazões mínimas em locais sem dados utilizando modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão apresentam erros relevantes, especialmente nas vazões mais baixas.

Gudmundsson et al. (2012) analisaram o desempenho de modelos de grande escala em reproduzir vazões na Europa e concluíram que os modelos hidrológicos são particularmente ruins em prever as vazões mais baixas.

Engeland e Hisdal (2009) compararam estimativas de vazões mínimas obtidas com equações de regressão e com o modelo hidrológico HBV (Bergström, 1995) em rios da Noruega, e constataram que as estimativas baseadas no modelo hidrológico eram, em geral, piores do que as estimativas baseadas em equações de regressão.

Peterham et al. (2011) realizaram um estudo semelhante em bacias do Norte da Austrália e chegaram a mesma conclusão: para a estimativa de vazões mínimas em locais sem dados a metodologia baseada na modelagem hidrológica chuva-vazão apresenta erros maiores do que um equação de regionalização baseada em regressão.

Murphy et al. (2013) compararam a modelagem hidrológica chuva-vazão e a regionalização por equações de regressão na estimativa de diversos indicadores hidrológicos com relevância ecológica, incluindo a vazão Q85, na bacia do rio Tennessee, e concluíram que a metodologia baseada no modelo hidrológico chuva-vazão apresenta erros maiores. Na estimativa da vazão Q85 o erro médio em 5 postos fluviométricos foi de 169% com a modelagem hidrológica e de 87% com a equação de regressão. Entretanto, é possível que este mau desempenho da modelagem hidrológica frente à regionalização empírica seja, em grande parte, devido à estratégia adotada para calibração do modelo hidrológico. As métricas utilizadas para a calibração do modelo hidrológico, citadas por Murphy et al. (2013) tendem a valorizar mais os erros em vazões altas do que os erros em vazões baixas.

Situação semelhante é relatada por Farmer et al. (2014) que compararam o modelo hidrológico PMRS a várias abordagens empíricas para estimativa de vazões em locais sem dados. Os erros da estimativa da Q90 do modelo PMRS foram maiores do que dos outros métodos testados. Novamente deve se ressaltar que o modelo hidrológico não foi calibrado com foco em vazões baixas, como a Q90.

Hailegeorgis e Alfredsen (2017) também compararam estimativas baseadas na regressão e na modelagem hidrológica chuva vazão e concluem da mesma forma, isto é, que indicadores hidrológicos ecologicamente relevantes obtidos por modelagem hidrológica chuva-vazão apresentam erros maiores.

Uma das possíveis causas para o mau desempenho dos modelos hidrológicos chuva vazão na representação das vazões mais baixas pode ser a forma com que os modelos hidrológicos são normalmente calibrados. As métricas utilizadas para a calibração de modelos, como o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, podem induzir a um melhor ajuste das vazões altas, em detrimento das baixas.

Pfannerstill et al. (2014) sugerem algumas métricas que poderiam ser utilizadas para uma calibração mais homogênea, entre vazões altas e baixas.

Esta estratégia foi adotada na aplicação do modelo distribuído MGB para a estimativa de disponibilidade hídrica no contexto de alguns planos de bacia elaborados no Brasil ao longo da última década. Por exemplo, no plano de bacia da região hidrográfica dos rios Macaé e das Ostras, no RJ, o modelo MGB foi calibrado buscando minimizar os erros da estimativa da Q90 em cada um dos postos fluviométricos com dados. Posteriormente, os resultados do modelo hidrológico foram utilizados para calcular a vazão Q7,10, utilizada como referência na bacia (INEA, 2013). No entanto não foram apresentadas estimativas da acurácia do método em prever vazões baixas em locais sem dados.

Acredita-se que o desempenho relativamente ruim de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão na representação de vazões baixas, como a Q90, a Q95 e a Q7,10, possa ser, ao menos parcialmente, melhorado através da utilização de técnicas de assimilação de dados de vazão em alguns postos fluviométricos e pós processamento, conforme descrito no item 3.8.

3.6 MÉTODOS DE SÉRIES CURTAS

Os métodos de séries curtas podem ser entendidos como ferramentas para corrigir estimativas de vazões de referência baseadas em séries curtas de dados observados, que sofrem pela falta de representatividade da amostra, e, por isso, costumam ser enviesadas.

A falta de representatividade de uma série curta de dados deriva, muitas vezes, da variabilidade amostral que está relacionada à variabilidade climática. É comum, por exemplo, a ocorrência de períodos de múltiplos anos mais secos ou mais úmidos do que a média de longo prazo. Usualmente recomenda-se que estimativas de vazões de referência, como a Q95 ou a Q7,10 sejam obtidas com séries de mais de 20 ou 30 anos de dados, para minimizar a influência da variabilidade climática (Tallaksen e Van Lanen, 2004). Por isso, se a série de dados disponível num local com pouca disponibilidade coincide com um período de anos mais úmidos (secos) do que a média, a vazão de referência possivelmente será ligeiramente maior (menor) do que seria caso houvesse uma série de dados mais longa e mais representativa.

Em um estudo realizado em 132 bacias na Austria, Laaha e Blöschl (2005) observaram um erro médio da estimativa da Q95, obtida utilizando apenas um ano de dados, de 30% em bacias mais úmidas e de mais de 50% em bacias mais secas, considerando a Q95 obtida com 20 anos de dados como o valor correto. Com 3 anos de dados o erro cai para menos de 20% em bacias úmidas e cerca de 30% em bacias menos úmidas. Finalmente, com 15 anos de dados o erro da estimativa da Q95 é inferior a 10% tanto em bacias secas como bacias úmidas.

Séries de dados de vazão em diferentes postos fluviométricos em uma mesma região dificilmente começam e terminam ao mesmo tempo. A utilização da série completa de cada um dos postos provavelmente tende a inserir um erro em estudos de regionalização, que está associado à variabilidade climática. Isto acontece porque os dados de um posto com uma série mais antiga podem estar influenciados por um período seco (ou úmido) que não está representado em um outro posto fluviométrico, cuja série de dados se concentra em um período mais recente. Como resultado, a variabilidade temporal é confundida com a variabilidade espacial.

A solução que tem sido adotada, em estudos de regionalização, para evitar a influência da variabilidade amostral relacionada à variabilidade climática é utilizar somente a porção simultânea das séries de dados, desprezando no posto A os dados de períodos em que não há dados correspondentes no posto B, e vice-versa. Este procedimento é importante, mas traz

como resultado uma redução da quantidade de dados efetivamente utilizada em relação à quantidade de dados que está disponível.

Assim, observa-se que estimativas de vazões mínimas, como a Q95, obtidas a partir de séries curtas de dados de vazão tem uma incerteza considerável. Ainda assim, estas séries curtas trazem uma considerável informação, que pode ser útil se adequadamente utilizada.

Muitos postos fluviométricos não têm séries muito longas. Zhang (2017), por exemplo, afirma que 43% dos 394 postos fluviométricos do estado de Illinois, nos Estados Unidos, tem séries de menos de 20 anos de dados. Além disso, a maioria destes postos com séries relativamente curtas está localizada em pequenas bacias, nas cabeceiras dos rios principais, e, portanto, contém informação valiosa para os pequenos rios e córregos.

Em um estudo de regionalização, dependendo dos critérios utilizados para seleção dos dados, como o número mínimo de anos de observação, ou a necessidade de simultaneidade das séries, muitas destas bacias acabam sendo tratadas como não monitoradas, embora tenham sido monitoradas ao menos durante algum tempo. As séries curtas observadas podem não ser representativas de um longo período de tempo, mas é possível utilizar métodos que relacionam as estimativas de vazão de referência obtidas com séries curtas com estimativas regionais baseadas em séries mais longas, buscando obter, ao mesmo tempo, os benefícios da representatividade local e da representatividade do período amostral (Laaha e Bloschl, 2005)..

Assim, os métodos de séries curtas relacionam as estimativas de vazão obtidas com séries relativamente curtas com a história hidrológica mais longa da bacia hidrográfica, com base em informações regionais, geralmente envolvendo alguma análise ou suposição de correlação entre as vazões do local com série curta e um ou mais locais com séries longas.

Há referências desde a década de 1950 sobre o uso de dados de postos fluviométricos com séries relativamente curtas, com base em um ajuste baseado em postos fluviométricos vizinhos com séries mais longas (Searcy, 1959). Stedinger e Thomas (1985) discutiram o uso e criaram o método que veio a ser chamado posteriormente de baseflow correlation method (Reilly e Kroll, 2003; Zhang e Kroll, 2007), que é um dos nomes associados ao método das séries curtas.

Além de baseflow correlation method, outros métodos que podem ser classificados como métodos de séries curtas são: Index gage Method (Zhang, 2017) e Climate Adjustment Method (Laaha e Bloschl, 2005).

Existem variantes do método de séries curtas até para o caso extremo, quando no local de interesse não há uma série de medições sistemáticas, mas apenas algumas medições esporádicas. Neste caso, os métodos são referidos como spot gauging methods (Chopart e Sauquet, 2008; Laaha e Bloschl, 2005). O método de séries curtas com apenas uma única medição chegou a ser proposto e adotado no estado da Bahia para estimativa da Q90 em locais sem dados (Santana et al., 2000).

Os métodos de séries curtas podem ser exemplificados pela metodologia descrita por Laaha e Bloschl (2005), e que consiste de duas etapas principais: 1) seleção de um ou mais postos de referência com série longa; 2) cálculo da vazão ajustada no local de interesse.

No caso mais simples, a primeira etapa pode ser cumprida adotando o posto fluviométrico com série longa mais próximo do ponto de interesse como posto de referência. Este posto fluviométrico de referência é denominado “donor site” ou “index gage”, dependendo dos autores.

Para o caso da vazão Q95, por exemplo, a segunda etapa é realizada aplicando a equação 2 (Laaha e Blöschl, 2005):

$$QS_A = QS_S \cdot \left(\frac{QL_L}{QL_S} \right) \quad (2)$$

onde QL_L é a vazão no local com a série longa, obtida com todos os dados disponíveis; QL_S é a vazão no local com a série longa, porém utilizando apenas o mesmo período de dados disponível no local com a série curta; QS_S é a vazão no local com a série curta; e QS_A é a vazão no local com série curta após o ajuste para a variabilidade climática.

O método de séries curtas também pode ter estimativas de vazão apoiadas por múltiplos postos fluviométricos de apoio (donor sites), conforme Zhang e Kroll (2007), e a influência destes postos de apoio sobre a estimativa de vazão corrigida pode ser ponderada por critérios de semelhança, correlação ou distância com o posto de interesse.

Laaha e Blöschl (2005) analisaram a aplicação do método de séries curtas, que eles denominam Climate Adjustment Method, e concluíram que o erro da estimativa da vazão de referência Q95, quando são utilizadas séries curtas de vazões observadas, ajustadas com base em séries longas da vizinhança, é menor do que o erro da estimativa baseada em uma equação regional de regressão, mesmo quando a série curta tem apenas um ano de dados. Por outro lado, no mesmo estudo os autores mostraram que uma única medição de vazão no local sem dados normalmente não é suficiente para que o método de séries curtas apresente erros menores do que a regionalização baseada em regressão.

Zhang (2017) também mostram o benefício da utilização de séries curtas. Segundo estes autores, que basearam sua análise em dados de postos fluviométricos do estado de Illinois, nos Estados Unidos, as estimativas de vazão mínima baseadas no método de séries curtas, com apenas 1 ano de dados no local de interesse, corrigidas com base em séries de 20 anos em um posto fluviométrico de apoio (index gage ou donor site), tem erros equivalentes às estimativas de vazão mínima baseadas em até 5 anos de dados, porém utilizando somente os dados do local de interesse.

Eng et al. (2011) também apresentam resultados em rios nos Estados Unidos em que as estimativas de Q7,10 obtidas pelo método das séries curtas tem desempenho superior às estimativas obtidas por equações de regressão tipicamente utilizadas na regionalização.

Em um estudo realizado em 133 postos fluviométricos na França, Chopart e Sauquet (2008) mostram que com apenas 5 medições de vazão esporádicas, porém realizadas na estação do ano adequada, o método de séries curtas permite obter estimativas de vazão mínima de referência com erros menores do que os encontrados com diferentes equações de regressão regional.

Um exemplo interessante de valorização de métodos de estimativa de vazões em locais sem dados baseados em séries curtas vem do Mato Grosso, onde, em 2009, a Secretaria de Meio Ambiente publicou uma instrução normativa prevendo a necessidade de realização de três medições de vazão, com intervalos de 30 dias entre elas, no período de estiagem (julho a setembro), para a tramitação dos pedidos de outorga em pontos de captação com área de drenagem inferior a 100 km², ou quando a estimativa de disponibilidade hídrica obtida por outros métodos for considerada inadequada. Estas medições podem ser utilizadas para estimar

as vazões de referência tanto com os métodos de séries curtas descritos aqui, como com métodos de modelagem hidrológica apoiada por séries curtas, descrito no próximo item.

3.7 MODELAGEM HIDROLÓGICA APOIADA POR SÉRIES CURTAS

Considerando o desempenho relativamente ruim de modelos hidrológicos chuva-vazão quando aplicados em bacias sem dados, e o desempenho surpreendentemente bom dos métodos de séries curtas, descritos no item anterior, é natural considerar métodos de estimativa de vazão em locais sem dados baseados na modelagem hidrológica apoiada por séries curtas ou medições esporádicas. Essa combinação permitiria explorar a representatividade das séries de dados de postos pluviométricos, que normalmente são mais longas e normalmente mais disponíveis a distâncias relativamente curtas do local de interesse, porém minimizando o mau desempenho da aplicação deste tipo de modelo em locais sem dados.

Diversos trabalhos têm explorado uso de dados esporádicos, ou de séries incompletas, para aprimorar o desempenho de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão (Rojas-Serna et al., 2016; Sun et al., 2017; Pool et al., 2017; Drogue e Khediri, 2016; Pool et al., 2019; Etter et al., 2020; Obregon et al., 1999).

Por exemplo, Rojas-Serna et al. (2015) mostraram que poucas medições de vazão em locais não monitorados sistematicamente podem contribuir significativamente para a redução dos erros de modelos hidrológicos chuva-vazão. Estes autores também indicam que com 10 medições de vazão os erros podem ser reduzidos em mais de 50%, em relação ao mesmo modelo hidrológico aplicado com os valores dos parâmetros obtidos em bacias próximas.

Etter et al. (2020) mostraram que uma única observação qualitativa de nível da água por semana ao longo de um ano permite melhorar o desempenho de um modelo chuva-vazão (HBV) em relação à aplicação sem calibração.

No Brasil, a combinação dos métodos de modelagem hidrológica chuva-vazão com o método de séries curtas, ou medições esporádicas, está presente de forma razoavelmente consolidada na forma do chamado Método Silveira, descrito por Silveira et al. (1998).

3.7.1 Método Silveira

Silveira et al., (1998) apresentam um método para avaliação da disponibilidade hídrica fluvial de pequenas bacias hidrográficas (geralmente $< 100 \text{ km}^2$) com carência de dados fluviométricos. A metodologia proposta é resumida nas seguintes etapas, conforme Figura 1. Primeiramente deve ser coletada uma amostra pequena de vazões durante o período de descarga do aquífero, no mínimo 3 medições espaçadas de pelo menos 2 dias, num curto espaço de tempo (uma a duas semanas). Em um segundo passo, é realizado o ajuste de um modelo simplificado de balanço hídrico usando dados de precipitação e evapotranspiração (*ET*) potencial de postos próximos. Finalmente, a parte baixa da curva de permanência pode ser obtida a partir do hidrograma gerado pelo modelo simplificado.

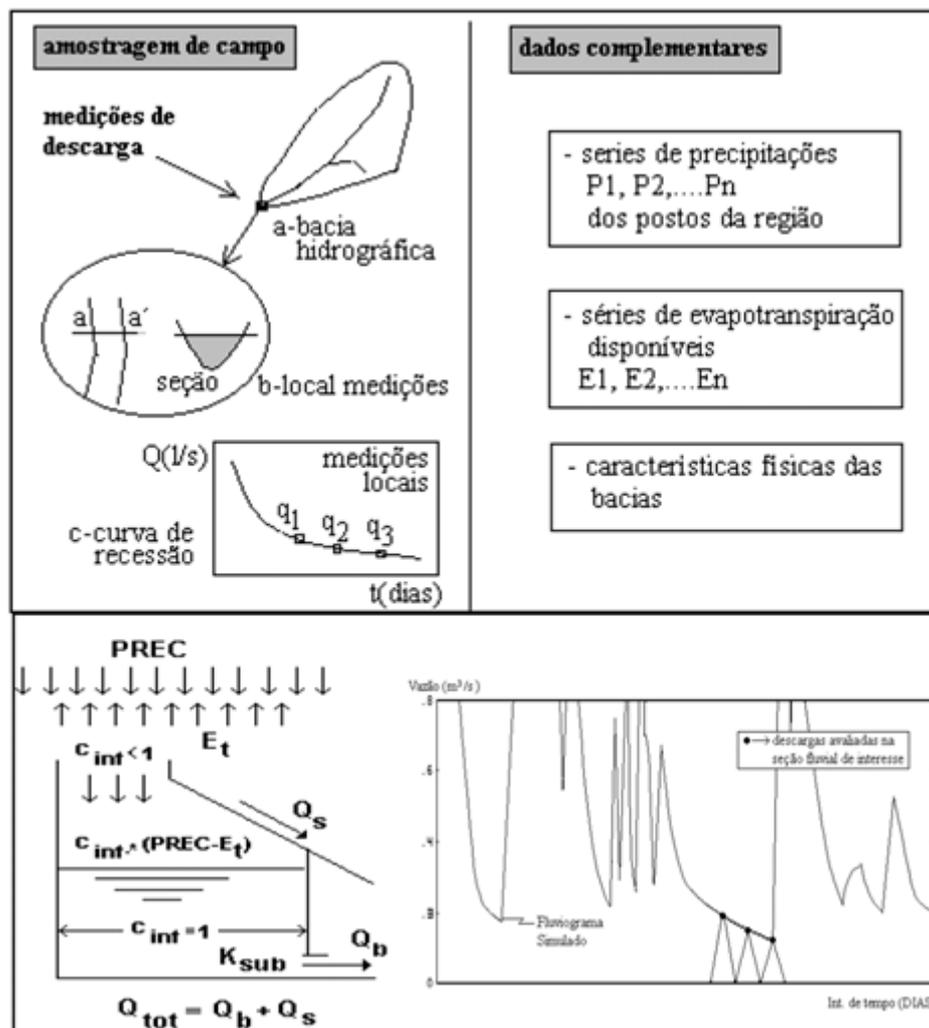


Figura 1 - Esquema geral do método de quantificação de vazões mínimas. C_{inf} e K_{sub} se referem ao coeficiente de infiltração e ao tempo de esvaziamento do reservatório subterrâneo, que são parâmetros do modelo. Adaptado de Silveira et al. (1998).

O modelo simplificado assume que o armazenamento na camada de solo é desprezível, dado que representa uma região de cabeceira onde geralmente há pequena profundidade do solo. Além disso, o modelo assume que a chuva que infiltra alimenta diretamente o aquífero. A vazão de base que escoar do aquífero para o rio é representada por um reservatório do tipo linear. Em pequenas bacias o escoamento superficial ocorre normalmente nos próprios dias chuvosos, e por conta disso é assumido que a vazão superficial é equivalente à precipitação efetiva.

O modelo possui apenas dois parâmetros que devem ser definidos. São eles: a parcela de precipitação que infiltra no solo (C_{inf}), e o tempo de esvaziamento do reservatório linear subterrâneo (K_{sub}). O C_{inf} é obtido indiretamente e depende do evento de chuva, ao passo que o tempo de esvaziamento pode ser calculado com a vazão obtida nas medições e o intervalo de tempo entre as mesmas.

A metodologia foi verificada em 6 bacias experimentais com área entre 1 e 11 km² na encosta do Planalto do RS, para as quais foram obtidos parâmetros a partir de uma série de eventos de estiagem. Quando comparada a estimativas de regionalização clássica, notou-se uma diferença média percentual em pouco menos de 80% no trecho inferior da curva de permanência, isto é, houve uma subestimativa das vazões de referência por parte da regionalização. O erro padrão

médio das estimativas para as bacias estudadas foi considerado satisfatório, variando, em função do número de eventos conhecidos, em até 30% dos valores observados.

Dentre as principais vantagens do método destaca-se que a estimativa de vazão não depende de equações regionais ou coeficientes de regiões definidas como hidrológicamente homogêneas, permitindo a geração de séries cronológicas de vazão que equações clássicas de regionalização não tem condições de oferecer. Quanto às limitações, há a necessidade de ir a campo para fazer medições; Coeficiente de infiltração é muito dependente do evento ocorrido; Modelo despreza o armazenamento do solo, e se esta camada retém muita umidade pode comprometer o balanço.

O método Silveira chegou a ser utilizado em algumas estimativas de vazões em locais sem dados na ANA, tendo sido reportados erros na ordem de 15 a 23% na estimativa da Q90 (Collischonn e Pante, 2011).

3.8 REANÁLISE HIDROLÓGICA COM ASSIMILAÇÃO DE DADOS

Como abordado no item 3.5, a modelagem hidrológica pode ser uma ferramenta interessante no processo de fornecer informações em locais pouco ou não-monitorados. Sua principal vantagem em relação à métodos clássicos de regionalização de vazão é a possibilidade de geração de uma série temporal de dados e não apenas estimativas pontuais. Contudo, qualquer processo de modelagem está sujeito a erros, refletido em diferenças entre os valores simulados e o que de fato acontece. Estes erros podem ser gerados por diversas fontes, como: estrutura do modelo hidrológico utilizado; dados de entrada utilizados como forçante do modelo; processo de calibração; entre outros.

Com o intuito de diminuir estes erros e reduzir as incertezas associadas ao processo de simulação, as técnicas de Assimilação de Dados (AD) têm sido utilizadas. Estas técnicas baseiam-se em um processo de retroalimentação no qual valores observados de uma ou mais variáveis são utilizados para a correção de variáveis de estado do modelo hidrológico, buscando aproximar as condições simuladas das observações disponíveis.

Desta forma, estes métodos de assimilação, quando aplicados em modelos hidrológicos distribuídos, podem ser utilizados para aprimorar a estimativa de vazões em locais não monitorados (Clark et al., 2008).

A partir da geração de vazões de referência (e.g. vazão média, Q90) os resultados da simulação com assimilação de dados podem também ser utilizados em aplicações como análise de outorga, planos de bacias e estudos ambientais.

Pessoa (2017) utilizou o Modelo de Grandes Bacias (MGB) com uma técnica de assimilação de dados empírica para obtenção de vazões em locais sem dados do Rio Grande do Sul. Ao comparar informações de vazões de referência (Q10, Q50, Q90, Q95, QmaxTr25(%) e QmaxTr50(%)) estimadas pela modelagem hidrológica com e sem assimilação de dados com métodos tradicionais de regionalização de vazão, foram observados os menores erros para a metodologia com AD e uma grande capacidade desta técnica em corrigir as estimativas a priori geradas pelo modelo, que apresentavam os maiores erros nas vazões de referência. Estes ganhos com a aplicação da técnica de AD foram observados sobretudo para vazões mínimas de referência.

Em uma outra aplicação, uma técnica mais avançada de AD, o Ensemble Kalman Filter (EnKF), foi implementada com o modelo MGB para aplicação na bacia do rio Taquari Antas com o

objetivo de obter estimativas de séries temporais de vazão e vazões de referência em locais com poucas informações in-situ (Wongchuig, 2019). A metodologia se demonstrou eficiente em estimar vazões de referência, quando comparadas a métodos simplificados de regionalização. Apesar de apresentar maior complexidade de implantação e utilização, a abordagem com modelo hidrológico e assimilação de dados permite aplicações às quais métodos tradicionais são limitados, por exemplo, a simulação de cenários não registrados como inserção de reservatórios, mudanças climáticas ou mudanças bruscas de uso e ocupação.

Outra grande vantagem da modelagem hidrológica mencionada no item 3.5 é a possibilidade de geração de informação para uma série longa no passado a partir de dados precipitação resultantes de bases de dados de reanálises climáticas.

A Figura 2 apresenta um desenvolvimento recente de Wongchuig et al., (2017) para o estudo de eventos extremos passados na bacia Amazônica, através da fusão do modelo MGB com reanálises climáticas, onde foi possível identificar e estudar as secas e cheias mais extremas do passado e avaliar a sua evolução temporal.

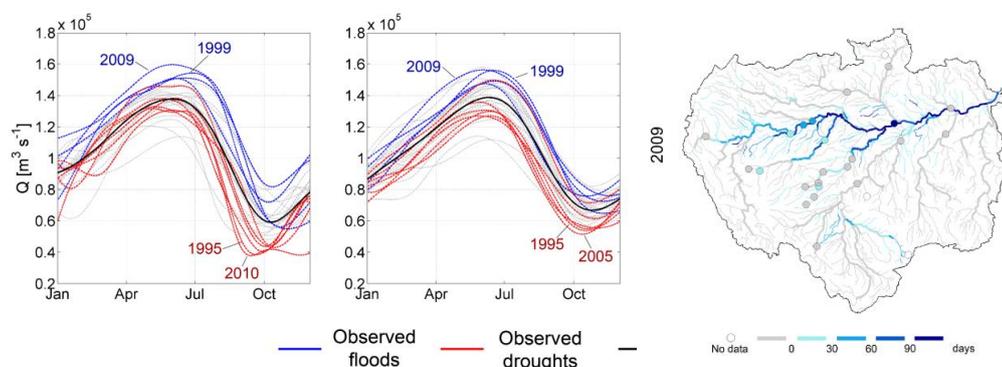


Figura 2 - Hidrogramas de secas (vermelho) e cheias (azul) históricas observadas e simuladas pelo modelo MGB no rio Amazonas e mapa de duração da cheia de 2009 na Bacia Amazônica. (Modificado de Wongchuig Correa et al., 2017).

Este procedimento de simulação, quando combinado com técnicas de assimilação de dados, resulta na metodologia denominada Reanálise Hidrológica (Wongchuig et al., 2019b).

3.8.1 Reanálise Hidrológica

O conceito de reanálise baseia-se em métodos científicos voltados para o desenvolvimento de um registro retrospectivo da evolução de um determinado sistema. Estes métodos foram inicialmente desenvolvidos e aplicados na área de meteorologia e, por isso, conhecidos como reanálises climáticas (e.g. Gibson et al., 1997; Kistler et al., 2001).

Na hidrologia, o conceito de reanálise hidrológica tem a finalidade de permitir um melhor entendimento dos processos hidrológicos a partir de uma série extensa ao passado. Isto permite, por exemplo, caracterizar ou avaliar: i) o comportamento hidrológico histórico (e.g. multi-decadal, anos recentes, etc.) de certa região, como os seus eventos extremos; ii) as tendências devido a variabilidade climática; iii) melhores estimativas de vazões de referência para gerenciamento dos recursos hídricos, como outorgas para o consumo d'água, planejamento do setor hidrelétrico, e também; iv) fornecer melhores estimativas de outras variáveis hidrológicas como nível d'água, áreas de inundação, umidade do solo ou outras (Wongchuig et al., 2019b).

Esta metodologia de reanálise hidrológica tem sido explorada por algumas iniciativas tais como o GloFAS-ERA5 (Harrigan et al., 2020), base de dados de vazões naturalizados em todo o globo

(Lin et al., 2019), PCR-GLOBWB (Wanders et al., 2014), MERRA Land (Reichle e Liu, 2015), ERA-Interim/Land (Balsamo et al., 2015) ou o projeto Earth2Observe. O objetivo principal destes trabalhos é fornecer uma base de dados de reanálises consistentes dos recursos hídricos, muitos deles iniciando no ano de 1979. Em contrapartida, estas reanálises hidrológicas, por serem produtos globais, tendem a usar simplificações nos processos hidrológicos e hidráulicos o que possibilita o aumento das incertezas nos resultados em estudos regionais.

Em uma aplicação regional, Wongchuig et al. (2019b) desenvolveram a reanálise hidrológica do século 20 na bacia Amazônica para o período de 1900 até 2010 mediante o uso do MGB forçado pela reanálise de chuva da base de dados ERA-20CM com remoção de viés e a assimilação de dados (EnKF) de diversas observações in-situ. Este trabalho resultou num registro extenso de variáveis hidrológicas-hidráulicas, denominado de Reanálise Hidrológica do Século 20 (RHXX) e demonstrou melhorias consideráveis na acurácia de estimativas de séries de vazões diárias (Figura 3).

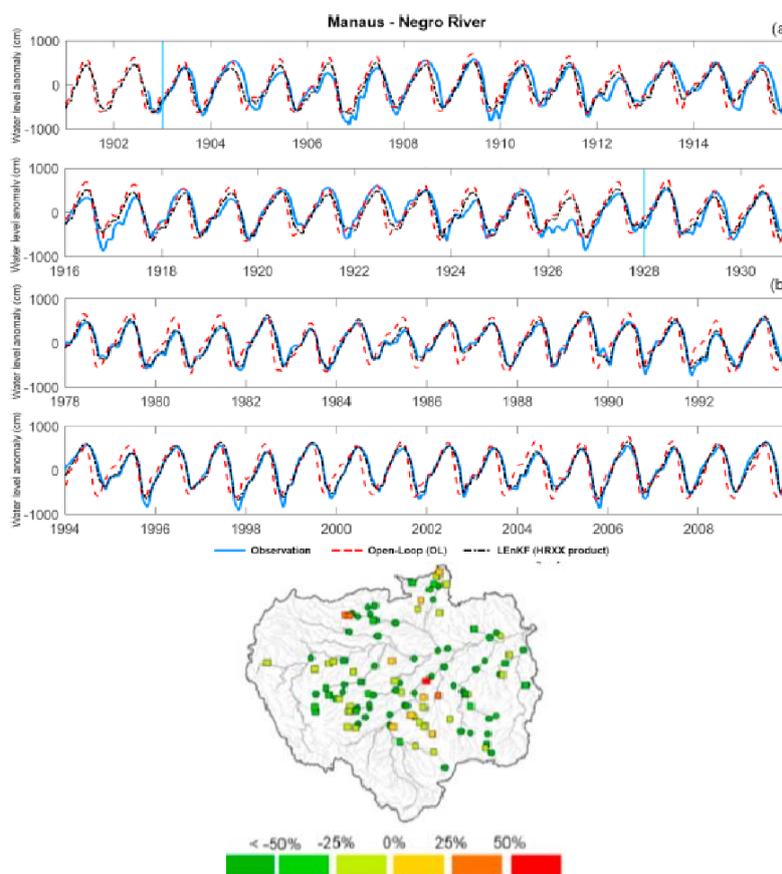


Figura 3 - Validação de série histórica em Manaus com observação de estação fluviométrica (linha azul), simulação com o modelo MGB (linha vermelha) e simulação melhorada com remoção de viés de precipitação e assimilação de observações de vazões (linha preta). Diminuição % do erro RMSE nos postos fluviométricos. Modificado de Wongchuig et al. (2019b).

Este RHXX se diferencia de produtos globais existentes devido à menor simplificação dos processos hidrológicos e hidráulicos (e.g. modelo hidrológico semidistribuído e propagação hidrodinâmica nos rios). No processo foi relatado que a modelagem hidrológica e a AD permitiram melhorar as estimativas de diferentes variáveis hidrológicas-hidráulicas tanto do passado (~100 anos) como do presente.

Neste sentido, a utilização da modelagem hidrológica com assimilação de dados para o estudo de vazões de referência demonstra-se como uma metodologia promissora, seja para o período presente/futuro ou para o passado, a partir do conceito de reanálise hidrológica. Suas principais vantagens estão baseadas i) na geração de uma série temporal de dados; ii) em estimativas mais acuradas, comparadas com modelagem hidrológica sem AD ou métodos tradicionais; iii) flexibilidade para simulação de diferentes cenários, e ainda; iv) a versatilidade para consideração de informações de diversas fontes, podendo considerar, por exemplo, novas estimativas de sensoriamento remoto nas simulações.

3.9 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO PARA A ESTIMATIVA DE VAZÕES

Os recentes avanços no processo de observação do sistema terrestre por sensoriamento remoto das últimas décadas permitiram observar o sistema climático e hidrológico terrestre de maneira contínua e detalhada, principalmente em áreas com limitação de dados observados. Essa evolução tecnológica ocorrida após o final de década de 1990 permitiu estimar, a partir de sensores embarcados em satélites, os processos de precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, variações no armazenamento de água, propriedades das águas superficiais e altimetria de corpos hídricos em diferentes escalas espaciais e temporais com relativa acurácia (ver revisões de Lettenmeier et al., 2015 e McCabe et al. 2018).

A estimativa de vazões em rios a partir de sensoriamento remoto é um campo de pesquisa proeminente na hidrologia, repleto de inovação e em crescimento acelerado. O objetivo do sensoriamento remoto de vazões varia entre (i) estender registros no tempo e espaço no caso de bacias com monitoramento in situ existente e (ii) aumentar o conhecimento hidrológico em locais com escassez/inexistência de monitoramento in situ (Gleason e Durand, 2020).

A vazão pode ser inferida indiretamente através de variáveis hidráulicas observáveis por sensoriamento remoto, incluindo níveis d'água, largura do rio/extensão de água, declividade da linha d'água.

As observações de rios e águas superficiais podem ser oriundas de diferentes plataformas, incluindo satélites, aeronaves e UAVs. Observações de largura de rios e extensão de água podem ser obtidas de imagens de sensores ópticos (na faixa do visível e infravermelho) como do LandsAT, MODIS, Sentinel 1, Rapideye, GOES e micro-ondas (passivo de radiômetros e ativo de radares de abertura sintética) de missões como Alos Palsar e Sentinel 2. Essas observações possuem resoluções espaciais variando de 1 a 500 metros e temporal como 15 min, 1, 8 ou 16 dias.

Observações do nível da superfície d'água de corpos d'água continentais podem ser obtidas de sensores altimétricos a bordo de satélites inicialmente desenvolvidos para o monitoramento de oceanos, como os da famílias JASON, Topex/Poseidon, Envisat, Saral/Altika, Sentinel, ICESAT 1 e 2, entre outros, com séries iniciando na década de 90 e se intensificando na última década. As observações são obtidas a partir de um distanciômetro que emite e recebe o eco de um pulso eletromagnético a nadir na faixa do microondas ou luz visível/infravermelho (LIDAR, e.g. ICESAT). O footprint deste sinal em solo pode ser da ordem de 170 m a quilômetros. A intercessão do traço do satélite e de um rio permite a criação de uma estação de medição virtual. A depender da órbita dos satélites altimétricos, a distância entre os traços pode ser de 10 a 220 km, com repetição de observações a cada 10, 35 ou 90 dias. Essas observações altimétricas podem ser utilizadas para estimar a declividade da linha d'água.

A 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 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). O SWOT fornecerá, pela primeira vez, observações de elevações da superfície da água (com uma precisão de 10 cm), larguras de rios e declives (com uma precisão de 1 cm / km) para rios a partir de 100 m, com resolução temporal de 21 dias (Biancamaria et al., 2016).

Nas últimas décadas foram desenvolvidos diversos métodos para a estimativa de vazões em rios com base em observações de sensoriamento remoto, com destaque para algumas classes de métodos:

3.9.1 Curva-chave

Desenvolvimento de curva chave que relaciona uma vazão medida e uma grandeza observada com sensoriamento remoto, podendo ser: vazão vs níveis d'água de altimetria espacial (Paris et al., 2016), vazão vs largura do rio/extensão de água de sensores imageadores ou vazão vs razão do sinal de reflectância (para sensor ópticos) ou temperatura de brilho (micro-ondas) de pixel úmido e seco (e.g. Tarpanelli et al.; 2013);

3.9.2 Calibração/assimilação

Utilização de observações de sensoriamento remoto para calibração de parâmetros ou assimilação de dados em modelos hidrológicos/hidráulicos visando aumentar acurácia de suas estimativas de vazão (e.g. Getirana 2010, Paiva et al., 2013; Neal et al., 2009);

3.9.3 Algoritmos de vazão

Desenvolvimento de algoritmos específicos para transformação de informação de sensoriamento remoto (nível d'água, largura de rio, declividade) em vazão através de leis que consideram leis da física como conservação de massa, relações hidráulicas (e.g. Manning) e geomorfológicas (leis de geometria hidráulica), conforme resumido em Durand et al. (2016).

Estes estudos ainda estão no campo da inovação, não havendo ainda padronização. Alguns estudos realizaram experimentos controlados, estimando que as incertezas na estimativa de vazão podem ser da ordem de 35% ou mais (Durand et al., 2016).

3.9.4 Potencial do sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto de vazões em rios é uma área em desenvolvimento, que vem evoluindo muito rapidamente nos últimos anos. Todas as técnicas descritas brevemente aqui podem ser de grande utilidade para o avanço do conhecimento hidrológico, desde que o contexto e objetivo seja bem definido (Gleason e Durand, 2020).

Não é impossível, nem improvável, que no futuro a estimativa de vazões em locais não monitorados por postos fluviométricos tradicionais seja baseada em dados obtidos por sensores embarcados em satélites, pelo menos parcialmente.

4 SÍNTESE DOS MÉTODOS

Foram descritos aqui oito tipos de métodos diferentes para a estimativa de vazões em locais sem dados. Alguns destes métodos são de uso tradicional, e outros apresentam potencial, mas ainda não foram utilizados na prática para este objetivo.

O método de vazão específica é, possivelmente, o mais utilizado na prática, e constitui um benchmark a ser batido por quase todos os outros métodos para comprovarem sua eficácia. Sua vantagem é que é simples e direto. A desvantagem é que tende a ter resultados ruins em bacias mais heterogêneas e pouco monitoradas. Além disso, o método está muito sujeito a erros locais, por apoiar-se sobre um único posto fluviométrico.

Os métodos da regionalização por regressão são, também, muito utilizados. Eles permitem representar regiões com algum grau de heterogeneidade, seja pela relação entre os parâmetros com características físicas da bacia, seja pela divisão da área de estudo em sub-regiões. São métodos mais complexos do que o método de vazão específica, mas significativamente mais simples que a maioria dos outros métodos. Outra desvantagem em relação ao método da vazão específica é que tipicamente, os métodos de regionalização por regressão esbarram em obstáculos causados pela indisponibilidade de dados concomitantes em muitos postos fluviométricos. Além disso, os métodos de regionalização por regressão, via de regra, não permitem estimar as séries temporais de vazão em locais sem dados, mas apenas vazões de referência, associadas a uma probabilidade de ocorrência, por exemplo.

Os métodos de interpolação geoestatística têm despertado grande interesse ao longo dos últimos anos, e, aparentemente tem potencial para apresentarem resultados melhores do que os métodos baseados em regressão regional. Entretanto, a interpolação geoestatística parece funcionar melhor onde a densidade de postos fluviométricos é particularmente alta.

A modelagem hidrológica chuva-vazão tem um potencial interessante para aplicação sistematizada em grandes áreas, mas na prática, a sua aplicação em bacias sem dados tem resultado em estimativas de vazões de referência com erros maiores do que aqueles obtidos com outras metodologias.

A estimativa de vazão baseada em séries curtas ou medições esporádicas tem recebido interesse crescente ao longo dos últimos anos, e sua utilização de forma isolada, ou em combinação com outros métodos, tem potencial de crescimento no futuro. Sua desvantagem é que não pode ser aplicada em locais efetivamente não monitorados, já que ao menos algumas medições são necessárias. Entretanto, é possível que essa desvantagem venha a diminuir no futuro, porque novos métodos e novos equipamentos de medição mais simples e portáteis estão cada vez mais acessíveis.

Algumas desvantagens da modelagem hidrológica chuva-vazão podem ser parcialmente removidas através da combinação deste tipo de método com o método das séries curtas, através de medições esporádicas de vazão. No Brasil, a modelagem hidrológica chuva-vazão apoiada por séries curtas já faz parte das metodologias utilizadas para estimativa de vazões de referência em locais sem dados através do chamado Método Silveira.

Outra possibilidade é a utilização de modelos hidrológicos distribuídos com assimilação de dados de monitoramento. Esta via permite combinar modelos e observações numa forma otimizada, conduzindo a uma estimativa do estado do sistema (bacia hidrográfica) que é, ao mesmo tempo, melhor do que a obtida apenas pelo modelo ou apenas pelas observações. Há evidências que

sugerem que a modelagem hidrológica com assimilação de dados em postos fluviométricos melhora o desempenho do modelo em locais não monitorados. Entretanto, os estudos são ainda muito incipientes neste sentido. Uma grande vantagem deste método é que é possível obter séries de vazão de uma forma generalizada em toda a rede hidrográfica da bacia, e não apenas vazões de referência em alguns poucos pontos. Outra vantagem é que possivelmente a metodologia permite lidar com bacias com um certo grau de interferências antrópicas, como regularização ou retiradas de água. A principal desvantagem é que o método pode ser realmente complexo.

Finalmente, é possível que no futuro próximo o sensoriamento remoto, com novas plataformas e novos sensores, permitirá estimativas de vazão em praticamente qualquer curso d'água, modificando o que entendemos por locais não monitorados. Ainda que a estimativa de vazão não venha a ser possível somente através de sensores remotos, é possível que os dados de sensoriamento remoto possam ser combinados a outros métodos para aprimorar a estimativa de vazão.

Uma comparação objetiva de alguns dos métodos discutidos aqui foi apresentada por Salinas et al. (2013), como parte da iniciativa PUB (Prediction in Ungauged Basins) incentivada pela IAHS ao longo do período de 2005 a 2015. Estes autores realizaram uma meta-análise comparando os seguintes tipos de métodos para estimativa de vazões em locais sem dados: Métodos de séries curtas; Métodos de Regressão (Global e Regional); Métodos de interpolação geoestatística; e modelos hidrológicos baseados em processos (chuva-vazão).

Como os resultados nos quais Salinas et al (2013) se basearam foram obtidos por diferentes autores, em diferentes trabalhos, nem todos os tipos de métodos foram aplicados nas mesmas bacias, o que dificulta um pouco o entendimento dos resultados. Apesar disso, alguns padrões interessantes podem ser observados.

A Figura 4 apresenta o valor do coeficiente de determinação na estimativa de vazões em locais sem dados, considerando aqueles estudos publicados que focaram em vazões mínimas. Observa-se que, entre os tipos de métodos avaliados, o melhor desempenho (R^2 mais próximo de 1) é o dos métodos de séries curtas. Em segundo lugar parecem estar os métodos de interpolação geoestatística, porém cabe lembrar aqui que este método parece ser mais adequado em regiões com alta densidade de postos fluviométricos. Em terceiro lugar estão os métodos de regressão regional, e em quarto lugar os métodos de regressão global. Finalmente, os métodos baseados em processos (Process Based – ou modelos chuva-vazão), representado por apenas um estudo na meta-análise de Salinas et al. (2013), estão em último lugar, com o mais baixo coeficiente de determinação.

Cada ponto no gráfico da Figura 4 corresponde a um estudo publicado, e as linhas unindo pontos correspondem a estudos que compararam dois métodos de forma consistente na mesma bacia.

O único trabalho de estimativa de vazões mínimas em locais sem dados utilizando modelo chuva-vazão revisado por Salinas et al. (2013) foi o trabalho de Engeland e Hisdal (2009), já mencionado aqui. Neste trabalho os autores demonstraram que as estimativas baseadas no modelo hidrológico eram, em geral, piores do que as estimativas baseadas em equações de regressão.

Conforme comentado antes, os trabalhos de Peterham et al. (2011), Murphy et al. (2013), Farmer et al. (2014) e Hailegeorgis e Alfredsen (2017) sugerem que o desempenho dos modelos

chuva-vazão na análise comparativa não seria muito diferentes caso tivessem sido incluídos mais estudos sobre o tema.

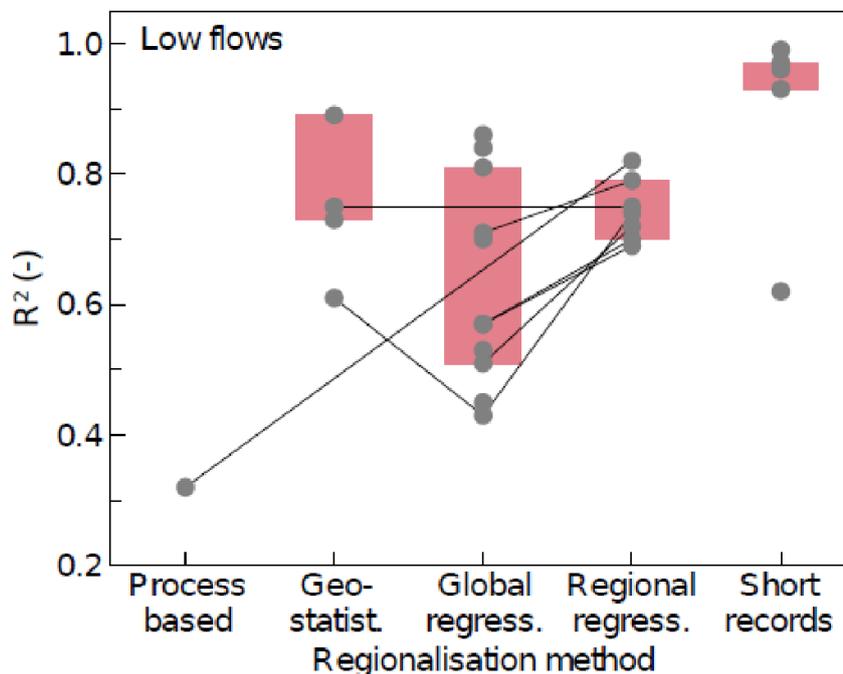


Figura 4 - Coeficientes de determinação obtido na estimativa de vazões mínimas em locais sem dados utilizando 5 tipos de métodos, de acordo com trabalhos revisados por Salinas et al. (2013).

O resultado relativamente ruim dos modelos hidrológicos chuva-vazão nesta comparação pode ser parcialmente explicado porque em muitos trabalhos a forma de calibração do modelo foi inadequada para a posterior aplicação do modelo com o objetivo de estimar as vazões mínimas.

Além disso, é importante lembrar que a comparação de Salinas et al. (2013) não incluiu estudos em que a modelagem hidrológica foi apoiada por séries curtas ou por assimilação de dados, pela ausência de estudos que utilizassem estas duas metodologias, que são mais recentes.

Na Tabela 2 é apresentado um resumo de métodos utilizados para estimativas de vazões, bem como suas vantagens, desvantagens, produtos e aplicabilidade.

Tabela 2 - Resumo dos métodos para a estimativa de vazões

MÉTODO	RESUMO	PRODUTO	APLICABILIDADE	VANTAGEM	DESvantAGEM	ESTIMATIVA DE ERRO
Vazão Específica	Estimar vazão com base em vazão específica observada em posto fluviométrico próximo.	Vazões de referência	Posto fluviométrico próximo, desejavelmente em bacia embutida. Região precisa ser homogênea.	Rápida e de fácil aplicação	Desconsidera escala e variabilidade espacial Maus resultados em bacias heterogêneas. Fortemente sujeito aos erros de um único posto fluviométrico.	Pode ser igual ou menor do que o erro obtido no método de regressão onde a área de drenagem do local sem dados está entre 0,3 e 1,5 vezes a área de drenagem do local com dados.
Regressão regional ou global	Equação de regressão entre vazão e características fisiográficas ou climáticas da bacia	Vazões de referência	Dados concomitantes em vários postos fluviométricos. Regiões com heterogeneidade representada pelas características físicas utilizadas na regressão.	Fácil aplicabilidade	Mais complexo que o método de vazão específica. Nem sempre o fator regionalizado representa toda a bacia.	Regionalizações realizadas pela CPRM utilizando este método buscam erros menores do que 25%
Interpolação geoestatística	Interpolação de dados observados ao longo da rede de drenagem	Vazões instantâneas, vazões de referência, séries temporais de vazão	Alta densidade de postos fluviométricos.	Parece ter erros menores.	Mais complexo que os anteriores. Necessita de alta densidade de	De acordo com alguns estudos comparativos pode ter desempenho melhor do que as

MÉTODO	RESUMO	PRODUTO	APLICABILIDADE	VANTAGEM	DESVANTAGEM	ESTIMATIVA DE ERRO
				Permite obter vazões instantâneas e séries temporais de vazão.	postos fluviométricos.	equações de regressão.
Modelos chuva-vazão	Estimar séries de vazões com base em simulação do ciclo hidrológico baseada em processos.	Série de vazões histórica, vazões de referência, indicadores e assinaturas hidrológicas, e previsões para diferentes cenários.	Pode ser aplicado em bacias com poucas observações de vazão, mas requer séries históricas de precipitação, clima e outras informações.	Pode ser aplicada em grandes escalas e gera série de vazões contínuas Permite estudo de cenários e previsões para o futuro.	Necessita de calibração de parâmetros não mensuráveis e é mais complexo que outros métodos.	Erros maiores do que as equações de regressão, especialmente na estimativa de vazões mínimas.
Séries Curtas	Estimar vazões com base em observações em postos fluviométricos vizinhos e ajuste baseado em série curta de vazão, ou poucas medições esporádicas.	Vazões de Referência	Necessita série curta de vazões ou, ao menos, uma medição no local de interesse.	Observações locais são incorporadas para aumentar a acurácia. Séries longas de postos vizinhos corrigem erro amostral.	É necessário medir vazão no local.	Com relativamente poucas medições no local os erros podem ser menores do que com os outros métodos.
Modelo chuva-vazão apoiado por séries curtas	Ajustar modelo hidrológico chuva-vazão a poucas observações durante período de estiagem.	Vazões de estiagem	Necessita observações de vazões durante o período de estiagem	Permite incorporar a variabilidade climática, trazida pelos dados de chuva. Permite estimar vazões de referência e parte	É necessário medir vazão no local algumas vezes.	Testes relatam erros entre 15% e 23% para a Q90.

MÉTODO	RESUMO	PRODUTO	APLICABILIDADE	VANTAGEM	DESvantAGEM	ESTIMATIVA DE ERRO
				inferior da curva de permanência.		
Reanálise Hidrológica com assimilação de dados	Estimar séries de vazão com base em simulação hidrológica e longas séries de registros de precipitação e clima e correções baseadas em vazões observadas nos postos fluviométricos.	Série de vazões histórica, vazões de referência, indicadores e assinaturas hidrológicas	Pode ser aplicado em bacias com poucas observações de vazão, mas requer séries históricas longas de precipitação, clima e outras informações.	Pode ser aplicada em grandes escalas e gera série de vazões contínuas para múltiplas décadas Permite melhoria de acurácia através de incorporação de erros nas estimativas de vazão nos postos fluviométricos.	É muito mais complexo.	Permite estimativa objetiva da incerteza. Estudos são insuficientes para estimar magnitude aproximada dos erros, ou para comparar com outros métodos.
Sensoriamento remoto	Estimar a vazão de forma indireta a partir de variáveis como altura, largura e temperatura da água de rios estimadas por sensores em órbita.	Séries temporais de vazão.	Em breve será possível estimar a vazão em qualquer rio com mais de 200 m de largura, aproximadamente.	Monitoramento simultâneo de toda a rede de drenagem.	Séries podem conter períodos sem dados em função da frequência de passagem dos satélites. Estimativa de vazão é indireta. Pequenos rios ainda não são monitorados.	Com base em experimentos baseados em dados sintéticos estima-se que o erro venha a ser 35% ou mais.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRA, S.G.; SOUZA, V.C.B.; NEVES, M.G.F.P.; CRUZ, M.A.S. Metodologias de regionalização de vazões: Estudo comparativo na bacia do Rio Carreiro – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15, 2005, João Pessoa. Resumos Expandidos... Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005, p. 1-20

Alexandre, A. M. B., Martins, E. S., Clarke, R. T., & Reis Jr, D. S. (2005). Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, João Pessoa–PB.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos. 2013. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/manual-de-outorga.pdf>. Acesso em: mai, 2020.

Archfield, S. A., A. Pugliese, A. Castellarin, J. O. Skøien, and J. E. Kiang (2013), Topological and canonical kriging for design flood prediction in ungauged catchments: An improvement over a traditional regional regression approach?, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 1575–1588, doi:10.5194/hess-17-1575-2013.

Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Muñoz Sabater, J., Pappenberger, F., de Rosnay, P., Stockdale, T., and Vitart, F., 2015. Era Interim/ land, a global land surface reanalysis data set. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 389–407.

BERGSTRÖM, S., 1995. The HBV model. In: Singh, V. (Ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Pub., pp. 443–476.

BLÖSCHL, Günter et al. (Ed.). *Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press, 2013.

Castellarin A, Burn DH, Brath A (2004) Assessing the effectiveness of hydrological similarity measures for flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, 241(3-4), 270-285, doi: 10.1016/S022-1694(00)00383-8.

CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informações geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.7, n. 3, p. 43-51, 2002.

Chopart S, Saquet E (2008) Usage des jaugeages volants en regionalisation des débits 'étiage (Using spot gauging data to interpolate low flow characteristics), *Revue des sciences de léau (Journal of Water Science)*, 21 (3), 267-281

COLLISCHONN, B., & PANTE, A. R. (2011). TRMM-forced rainfall--runoff modelling for water management purposes in small ungauged basins. *GRACE, Remote sensing and ground-based methods in multi-scale hydrology*. Wallingford, UK: International Association of Hydrological Sciences, IAHS Publ, 343, 66-71.

DINIZ, L.S. e CLARKE, R.T. (2001) "Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais" In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, Aracajú: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. CD-ROM

Drogue, G., & Khediri, W. B. (2016). Catchment model regionalization approach based on spatial proximity: Does a neighbor catchment-based rainfall input strengthen the method?. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 8, 26-42.

ELETRORÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Metodologia para regionalização de vazões. Rio de Janeiro. v. 1, 1985.

Eng, K., Kiang, J. E., Chen, Y. Y., Carlisle, D. M., & Granato, G. E. (2011). Causes of systematic over- or underestimation of low streamflows by use of index-streamgage approaches in the United States. *Hydrological Processes*, 25(14), 2211-2220.

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.

Etter, S., Strobl, B., Seibert, J., & van Meerveld, H. I. (2020). Value of crowd-based water level class observations for hydrological model calibration. *Water Resources Research*, 56(2), e2019WR026108..

Farmer, W.H., Archfield, S.A., Over, T.M., Hay, L.E., LaFontaine, J.H., and Kiang, J.E., 2014, A comparison of methods to predict historical daily streamflow time series in the southeastern United States: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2014–5231, 34 p., <http://dx.doi.org/10.3133/sir2014-5231>

Gibson, J. and for Medium Range Weather Forecasts, E. C., 1997. ECMWF Re-analysis Project Report Series, ERA description. Number v. 1. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

Gottschalk, L., E. Leblois, and J. O. Skøien (2011), Distance measures for hydrological data having a support, *J. Hydrol.*, 402, 415–421, doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.020

Gudmundsson, L., Tallaksen, L. M., Stahl, K., Clark, D. B., Dumont, E., Hagemann, S., ... & Voss, F. (2012). Comparing large-scale hydrological model simulations to observed runoff percentiles in Europe. *Journal of Hydrometeorology*, 13(2), 604-620.

Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., & Wang, Z. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, e1487.

Harrigan, S., Zsoter, E., Alfieri, L., Prudhomme, C., Salamon, P., Wetterhall, F., Barnard, C., Cloke, H., and Pappenberger, F.: GloFAS-ERA5 operational global river discharge reanalysis 1979–present, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/essd-2019-232>, in review, 2020.

INEA 2013 Relatório do diagnóstico das disponibilidades hídricas da região hidrográfica Macaé e Rio das Ostras (RD-04). Rio de Janeiro. 406pp.

Kistler, R., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Kalnay, E., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., and Fiorino, M., 2001. The ncep–ncar 50–year reanalysis, Monthly means cd–rom and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(2), 247–267.

Laaha, G., & Blöschl, G. (2005). Low flow estimates from short stream flow records—a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, 306(1-4), 264-286.

Laaha, G., & Blöschl, G. (2006). A comparison of low flow regionalisation methods—catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323(1-4), 193-214.

Laaha, G., & Blöschl, G. (2007). A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 625-644.

Laaha, G., J. Skøien, and G. Blöschl (2014), Spatial prediction on river networks: Comparison of Top-kriging with regional regression, *Hydrol. Processes*, 28, 315–324, doi:10.1002/hyp.9578.

Lin, P., Pan, M., Beck, H. E., Yang, Y., Yamazaki, D., Frasson, R., et al. (2019). Global reconstruction of naturalized river flows at 2.94 million reaches. *Water Resources Research*, 55, 6499–6516. <https://doi.org/10.1029/2019WR025287>.

LOPES, J.E.G. ; BRAGA JR, B. P. F. ; CONEJO, JOÃO GILBERTO LOTUFO . SMAP, A Simplified Hidrologic Model. In: Symposium On Rainfall Runoff Modeling, 1981, Mississippi, 1981.

McMillan, H., Westerberg, I., & Branger, F. (2017). Five guidelines for selecting hydrological signatures. *Hydrological Processes*, 31(26), 4757-4761.

MELO, Jefferson Santana; VILLAS 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.

Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology*, 121(1-4), 217-238.

OBREGON, E.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUN, J. 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.

Otsuki, R. G., & Reis Jr, D. S. (2011). Análise Comparativa de Metodologias de Estimativa de Séries de Vazões Médias Mensais Aplicadas a Estudos Energéticos de Aproveitamentos Hidrelétricos. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, AL.

Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Collischonn, W., Bonnet, M. P., Frappart, F., Calmant, S., and Bulhões Mendes, C. A.: Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin, *Water Resources Research*, 49, 1226-1243, 10.1002/wrcr.20067, 2013.

Paiva, R. C. D., Collischonn, W., and Tucci, C. E. M.: Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach, *Journal of Hydrology*, 406, 170-181, 10.1016/j.jhydrol.2011.06.007, 2011.

Parajka, J., R. Merz, J. O. Skøien, and A. Viglione (2015), The role of station density for predicting daily runoff by Top-kriging interpolation in Austria, *J. Hydrol. Hydromech.*, 63, 228–234, doi:10.1515/johh-2015-0024.

PESSOA, Margarita Maria Elisa Pereira. Obtenção De Vazões Em Locais Sem Dados Através De Modelos Hidrológicos Com Assimilação De Dados. 2017. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

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. (2014). Smart low flow signature metrics for an improved overall performance evaluation of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 510, 447-458.

PINTO, Eber José de Andrade; ALVES, Margarida Maria Silva. Regionalização de vazões das Sub-Bacias 40 e 41: Alto São Francisco. CPRM, 2001.

Pontes P.R.M. , W. Collischonn, F.M. Fan, R.C.D. Paiva, D.C. Buarque Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões / Hydrologic and hydraulic large-scale modeling with inertial flow routing Brazil. *J. Water Resour.*, 2015, pp. 888-904

Pool, S., Viviroli, D., & Seibert, J. (2017). Prediction of hydrographs and flow-duration curves in almost ungauged catchments: Which runoff measurements are most informative for model calibration?. *Journal of Hydrology*, 554, 613-622.

Pool, S., Viviroli, D., & Seibert, J. (2019). Value of a limited number of discharge observations for improving regionalization: A large-sample study across the United States. *Water Resources Research*, 55(1), 363-377.

PRUSKI, F. F. et al. Estrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. *Water Resources and Irrigation Management*, Campina Grande, PB, v.1, n.1, p.51-59, 2012.

Reichle, R. and Liu, Q. 2015. Precipitation and global land surface hydrology in the MERRALand and MERRA- 2 reanalysis datasets. In EGU General Assembly Conference Abstracts, volume 17 of EGU General Assembly Conference Abstracts, page 1838.

Reilly CF, Kroll CN (2003) Estimation of 7-day, 10-day, low-streamflow statistics using baseflow correlation, *Water Resources Research*, v. 39, n. 9, 1236. doi:10.1029/2002WR001740, 200

REIS, J. A. T.; GUIMARÃES, M. A.; BARRETO NETO, A. A.; BRINGHENTI, J. 2008 Indicadores Regionais Aplicáveis à Avaliação do Regime de Vazão dos Cursos D'Água da Bacia Hidrográfica do Rio Itabapoana. *Geociências*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 509-516, 2008.

Ries, K.G., and Friez, P.J., 2000, Methods for estimating lowflow statistics for Massachusetts streams: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00–4135, 81 p.

Rojas-Serna, C., Lebecherel, L., Perrin, C., Andréassian, V., & Oudin, L. (2016). How should a rainfall-runoff model be parameterized in an almost ungauged catchment? A methodology tested on 609 catchments. *Water Resources Research*, 52(6), 4765-4784.

Salinas, J. L., Laaha, G., Rogger, M., Parajka, J., Viglione, A., Sivapalan, M., & Blöschl, G. (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins--Part 2: Flood and low flow studies. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 10(1).

SANTANA, A.G., CARDOSO, E.R., SILVA, F.F., GENZ, F. & RIBEIRO, C.A.O. 2000 Estimativa da Vazão de Referência, com Carência de Dados, Para Outorga na Bahia. In: Anais. V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal/RN, 2000

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.

Saraiva, I., Fernandes, W., & Naghettini, M. (2011). Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. *RBRH—Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16(1), 115-125.

Searcy, J. K. (1959). Flow-duration curves (No. 1542). US Government Printing Office.

Silveira, G. L., Tucci, C. E. M. & Silveira, A. L. L. (1998) Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre 3(3), 111–131.

SIQUEIRA, V. A. et al. (2018). Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*. Göttingen: Copernicus. Vol. 22, n. 9 (set. 2018), pp. 4815-4842.

Skøien, J. O., and G. Blöschl (2006), Catchments as space-time filters—A joint spatio-temporal geostatistical analysis of runoff and precipitation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 645–662, doi:10.5194/hess-10-645-2006.

Skøien, J. O., and G. Blöschl (2007), Spatiotemporal topological kriging of runoff time series, *Water Resour. Res.*, 43, W09419, doi:10.1029/2006WR005760.

Skøien, J. O., R. Merz, and G. Blöschl (2006), Top-kriging—Geostatistics on stream networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 277–287, doi:10.5194/hess-10-277-2006.

Stedinger, J. R., & Thomas Jr, W. O. (1985). Low-flow frequency estimation using base-flow measurements (No. 85-95). US Geological Survey.

Sun, W., Wang, Y., Wang, G., Cui, X., Yu, J., Zuo, D., & Xu, Z. (2017). Physically based distributed hydrological model calibration based on a short period of streamflow data: case studies in four Chinese basins. *Hydrology & Earth System Sciences*, 21(1).

Tallaksen, L. M., & Van Lanen, H. A. (Eds.). (2004). *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater* (Vol. 48). Elsevier.

TUCCI, C. E. M. 1993. *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. ABRH, Editora da Universidade - UFRGS. Porto alegre.

TUCCI, Carlos E.M. 2002. *Regionalização de vazões*. Editora da Universidade. UFRGS. 1a edição. Porto Alegre.

Virões, M. V., & Cirilo, J. A. (2019). Regionalization of hydrological model parameters for the semi-arid region of the northeast Brazil. *RBRH*, 24.

VIRÃES, 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.

WAGENER, T.; WEATHER, H. S. 2006. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. *Journal of Hydrology* v.320, p 132-154, 2006.

Wanders, N., Bierkens, M.F., Sutanudjaja, E., van Beek, R., 2014. The PCR-GLOBWB global hydrological reanalysis product. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, volume 16 of *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 16, EGU2014-5369.

Wongchuig, C.S., de Paiva, R.C.D., Espinoza, J.C., Collischonn, W. 2017. Multi-decadal hydrological retrospective: case study of Amazon floods and droughts. *Journal of Hydrology*, 549:667-684. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.01>

Wongchuig, C.S., de Paiva, R.C.D., Siqueira, V., Collischonn, W. 2019b. Hydrological Reanalysis Across the 20th Century: A Case Study of the Amazon Basin. *Journal of Hydrology*, 570:755-773. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.025>

Wongchuig, C.S., Fleischman, A., de Paiva, R.C.D., Fadel, W.A. 2019. Towards the Discharge Estimation for Water Resources Management Uses with a Semi-Distributed Model and Ensemble Kalman Filter Data Assimilation. *Hydrological Science Journal*.

Wongchuig-Correa, S., de Paiva, R. C. D., Biancamaria, S., & Collischonn, W. (2020). Assimilation of future SWOT-based river elevations, surface extent observations and discharge estimations into uncertain global hydrological models. *Journal of Hydrology*, 590, 125473.

Zhang Z, Kroll CN (2007) A closer look at base flow correlation, *Journal of Hydrology*, 347(3-4), 371.

Zhang, Z. (2017). The index gage method to develop a flow duration curve from short-term streamflow records. *Journal of Hydrology*, 553, 119-129.

Zhang, Z., & Kroll, C. (2007). The baseflow correlation method with multiple gauged sites. *Journal of hydrology*, 347(3-4), 371-380.