

AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DO MODELO HIDROLÓGICO MGB EM ÉPOCAS DE ESTIAGEM – ESTUDO DE CASO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

1^{er}. Geraldo André Rosseto Barreto, 2^{do}. Diogo Costa Buarque, 3^{er}. Walter Collischonn e 4^{er} Lizandra Broseghini Foeger

Universidade Federal do Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Espírito Santo. Brasil
gandrebarreto@gmail.com; diogo.buarque@gmail.com; waltercollischonn@gmail.com; lizandrabf@gmail.com

RESUMO

O desenvolvimento e constante aprimoramento dos modelos hidrológicos tem permitido estudos eficazes a respeito de diversas problemáticas como mudanças climáticas, abastecimento de água, impacto de enchentes, hidroeletricidade entre outros. Entretanto, os modelos hidrológicos costumam ter um desempenho ruim quando confrontados com a variabilidade hidroclimática histórica e particularmente as secas plurianuais. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a performance do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB em épocas de estiagem, adotando a bacia hidrográfica do rio Doce como estudo de caso. Os resultados obtidos permitiram concluir que o modelo superdimensiona as vazões mínimas em comparação com as vazões observadas, com diferença que chegou a cerca de 68% para uma das estações de análise. Além disso, esse trabalho propõe alguns fatores que podem contribuir com esse problema.

ABSTRACT:

The development and constant improvements of hydrological models has allowed effective studies about diverse problematics such as climate changes, water supplying, impact of floods and hydroelectricity, among others. However, the hydrological models tend to have a weak performance when confronted with the historical hydroclimatic variability and especially pluriannual droughts. In this context, this work aims to evaluate the performance of Large Basin Model (Modelo de Grandes Bacias – MGB) at dry season, taking Doce river basin as a case study. The obtained results lead to the conclusion that the model oversized the flow rate when compared to the observed flow rates, with a difference of about 68% for one of the analyzed seasons. Moreover, this work proposes some factors that may contribute to this problem.

PALAVRAS CLAVES: Hidrologia; Simulação Hidrológica; Modelagem Hidrológica em Grandes Bacias.

INTRODUÇÃO

A hidrologia trata dos fenômenos naturais complexos encontrados no ciclo hidrológico. Os processos que ocorrem nesse ciclo como precipitação, evaporação, infiltração e escoamento, dependem de muitos fatores, o que dificulta a análise quantitativa e qualitativa dos mesmos (Tucci, 2005). Além das dificuldades de analisar os processos do ciclo hidrológico, problemas de falta de água e uso correto dos recursos hídricos estão entre os grandes desafios a serem enfrentados pela humanidade nas próximas décadas (Fan e Collischonn, 2013). Com isso, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e contornar esses desafios existentes, a ciência desenvolveu os modelos hidrológicos, que tem se apresentado como alternativa eficaz para a realização de previsões, estudos sobre efeitos de mudanças climáticas e de uso do solo, análises de disponibilidade de água e apoio à tomada de decisão, entre outras aplicações. (Tucci, 2005; Fan e Collischonn, 2013).

Os modelos hidrológicos podem ser definidos como representações matemáticas do comportamento dos sistemas hídricos. Esses modelos utilizam uma série de equações com dados de entrada diversos, como tipo e uso do solo na região estudada, precipitação ao longo do tempo, e outras variáveis climáticas para simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (Fan e Collischonn, 2013).

O desenvolvimento e constante aprimoramento dos modelos hidrológicos tem permitido estudos eficazes a respeito de diversas problemáticas como mudanças climáticas, abastecimento de água, impacto de enchentes, hidroeletricidade entre outros. Todavia, os modelos hidrológicos costumam ter um desempenho ruim quando confrontados com a variabilidade hidroclimática histórica e particularmente as secas plurianuais (Fowler et al., 2020).

Destacam-se, entre estes modelos, os modelos distribuídos de transformação chuva-vazão, que representam os processos de transformação da precipitação em escoamento e a propagação deste escoamento em uma bacia hidrográfica. A estrutura dos modelos hidrológicos distribuídos inclui, em geral, pelo menos dois módulos: um módulo de balanço hídrico no solo e geração de escoamento a partir da chuva; e um módulo de propagação de vazões ao longo da rede de drenagem (Pontes et al., 2015).

Em geral, o módulo de propagação de vazão na rede de drenagem dos modelos hidrológicos distribuídos é relativamente simplificado, como o método Muskingum-Cunge (Tucci, 2005), que consiste em uma das soluções numéricas da equação da onda cinemática. Estes modelos simplificados produzem resultados aceitáveis na maior parte das aplicações, apesar de exigirem relativamente poucos dados de entrada. Entretanto, há certos tipos de rios e bacias hidrográficas em que as abordagens simplificadas adotadas nos módulos de propagação de vazão dos modelos hidrológicos não são adequadas (Pontes et al., 2015). Este é o caso de rios de baixa declividade, rios com longos trechos submetidos ao remanso de barragens, rios com planícies de inundação, e rios das regiões litorâneas que sofrem os efeitos das marés.

Para resolver esses problemas, existem alguns modelos que utilizam, no seu módulo de propagação de vazões, as equações completas do escoamento unidimensional em rios (Equações de Saint-Venant), entretanto, esta abordagem apresenta alguns inconvenientes, porque a solução das equações de Saint-Venant é mais complexa, resultando em códigos computacionais mais extensos e complicados. Por esse motivo, uma abordagem intermediária pode ser adotada, utilizando no módulo de propagação uma aproximação das equações de Saint-Venant que despreza apenas o termo de inércia advectiva na equação dinâmica. Esta aproximação é chamada de modelo inercial (Fan et al., 2014).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo aplicar um modelo hidrológico distribuído, o MGB, utilizando tanto o modelo de propagação inercial quanto o método Muskingum-Cunge, à uma bacia hidrográfica que tem passado por eventos de seca nos últimos anos e avaliar a performance do modelo nesses períodos de longa estiagem.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida para o presente trabalho foi a bacia hidrográfica do rio Doce, localizada nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Destaca-se que essa bacia foi escolhida pela disponibilidade de dados observados e em função dos eventos de seca que ocorreram nos últimos anos (Lima, 2016).

A bacia do rio Doce (Figura 1) situa-se na região Sudeste, entre os paralelos 17°45' e 21°15' S e os meridianos 39°30' e 43°45' W, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste. Esta bacia, com uma área de drenagem de aproximadamente 86.715 km², dos quais 86% pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante ao Espírito Santo, abrange um total de 230 municípios (PIRH, 2010). As nascentes do rio Doce situam-se no Estado de Minas Gerais, nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço, sendo que suas águas percorrem cerca de 850 km, até atingir o oceano Atlântico, junto ao povoado de Regência, no Estado do Espírito Santo (PIRH, 2010).

Os principais afluentes do rio Doce pela margem esquerda são os rios do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande e Suaçuí Grande, em Minas Gerais; São José e Pancas no Espírito Santo. Já pela margem direita são os rios Casca, Matipó, Caratinga/Cuieté e Manhuaçu em Minas Gerais; Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce no Espírito Santo (PIRH, 2010).

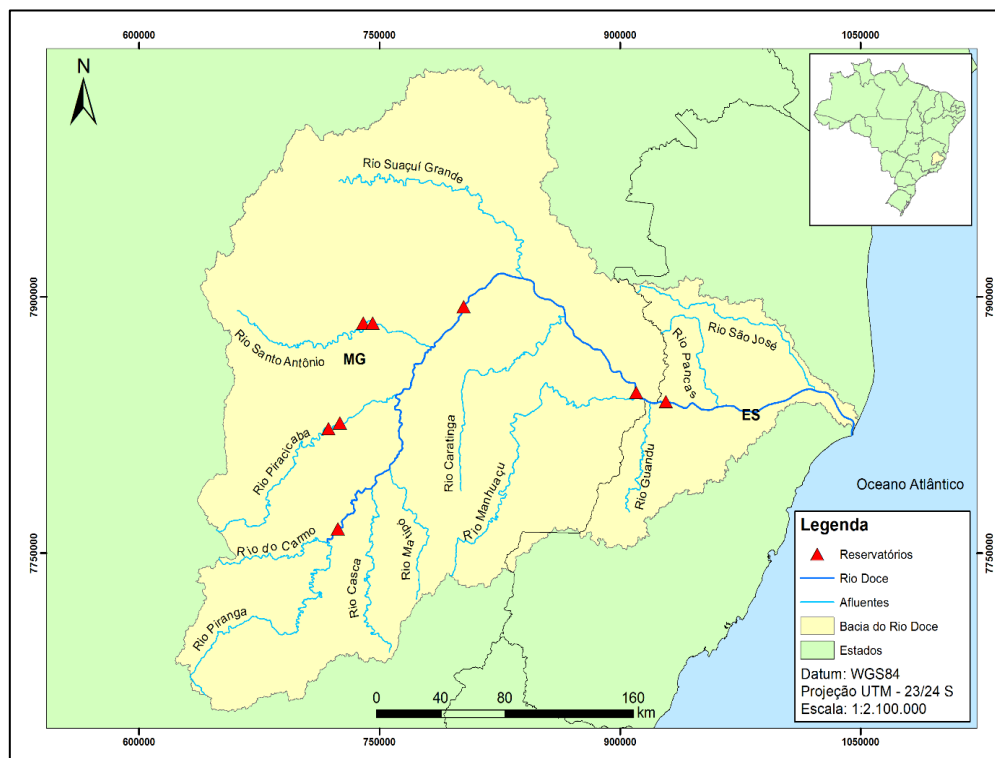


Figura 1.- Bacia hidrográfica do Doce, principais afluentes e reservatórios

A bacia, que era originalmente coberta por Mata Atlântica, sofreu intensamente com a antropização, restando remanescentes florestais nas áreas de grande declive e nas unidades de conservação (PIRH, 2010). De acordo com IBIO (2017), em 2012 a distribuição da cobertura do solo se dava da seguinte maneira: aproximadamente 30,92% correspondiam a florestas (incluindo silvicultura); 59,25% a pastagens; 5,43% a agricultura; 1,13% a várzeas; 2,45% de áreas semi-impermeáveis (áreas de mineração, áreas urbanas, aeroportos, afloramentos rochosos e rodovias) e 0,81% correspondendo a corpos d'água. O forte desmatamento e a má utilização dos solos provocaram na região um intenso processo de erosão, fazendo com que os sedimentos gerados sejam transportados até os cursos d'água, provocando um sério problema de assoreamento, principalmente no baixo curso do rio Doce (PIRH, 2010).

Segundo a classificação de Köppen, identificam-se basicamente três tipos climáticos na bacia: tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, presente nas vertentes das serras da Mantiqueira e do Espinhaço e nas nascentes do rio Doce; tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, presente nas nascentes de seus afluentes; e clima quente com chuvas de verão presente nos trechos médio e baixo do rio Doce e de seus afluentes (PIRH, 2010).

O regime pluviométrico na bacia é caracterizado por dois períodos bem distintos. O período chuvoso que se estende de outubro a março, a precipitação total varia de 800 a 1.300 mm com maiores índices no mês de dezembro; e o período seco que se estende de abril a setembro, a precipitação total varia de 150 a 250 mm, com estiagem mais crítica de junho a agosto (PIRH, 2010).

METODOLOGIA

O modelo MGB

O modelo MGB (“Modelo Hidrológico de Grandes Bacias”), é um modelo hidrológico distribuído voltado para aplicações em grandes bacias hidrográficas com as típicas condições de disponibilidade de dados encontradas no Brasil (Collischonn et al., 2007). Ele utiliza equações físicas e conceituais para simular, com passo de tempo diário ou horário, os processos hidrológicos na superfície terrestre, divididos em quatro módulos: balanço hídrico no solo; balanço de energia e evapotranspiração; interceptação, geração e propagação de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo nos elementos de discretização da bacia hidrográfica e propagação da vazão na rede de drenagem (Buarque, 2015).

Definição da rede de drenagem, discretização da bacia hidrográfica e definição das Unidades de Resposta Hidrológica

O modelo MGB, para ser aplicado, necessita de uma etapa de pré-processamento onde são definidas as características físicas/espaciais da bacia, como o Modelo Digital de Elevação (MDE), a geração da rede de drenagem, delimitação das sub e minibacias e definição das Unidades de Resposta Hidrológica (URH). O MDE utilizado foi o da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), disponibilizado pelo Grupo Consultivo sobre Pesquisa Agrícola Internacional (CGIAR) no endereço eletrônico <http://srtm.csi.cgiar.org/>, com resolução espacial de 90 metros. O pré-processamento foi realizado com o uso do pacote de ferramentas IPH-Hydro Tools, que é apresentado em Siqueira et al. (2016).

Para criar a rede de drenagem da bacia foi definido como limiar mínimo da área de drenagem o valor de 10 km², esse valor foi escolhido com objetivo de abranger todos os rios de interesse. Para essa etapa, foi utilizada a ferramenta *Stream Definition*.

Para seccionar a rede de drenagem, para permitir a discretização da bacia, foi utilizando a ferramenta *Fixed Length Segmentation*, que segmenta a rede de drenagem levando em conta uma distância mínima que um trecho deva ter antes de ser segmentado (Alves et al., 2020). Essa escolha foi feita para permitir que o método de propagação de vazões inercial fosse selecionado. Com isso, a rede de drenagem foi segmentada em trechos de 10 km. Na Figura 2 é possível visualizar a rede de drenagem gerada para a bacia hidrográfica.

A discretização da bacia em unidades menores é importante devido a heterogeneidade da área. Dessa forma a área da bacia hidrográfica é dividida em unidades menores, denominadas minibacias, que são áreas de contribuição imediatas a um segmento de rio. As minibacias são delimitadas de acordo com a topografia e ligadas entre si por canais de drenagem. (Collischonn et al., 2020).

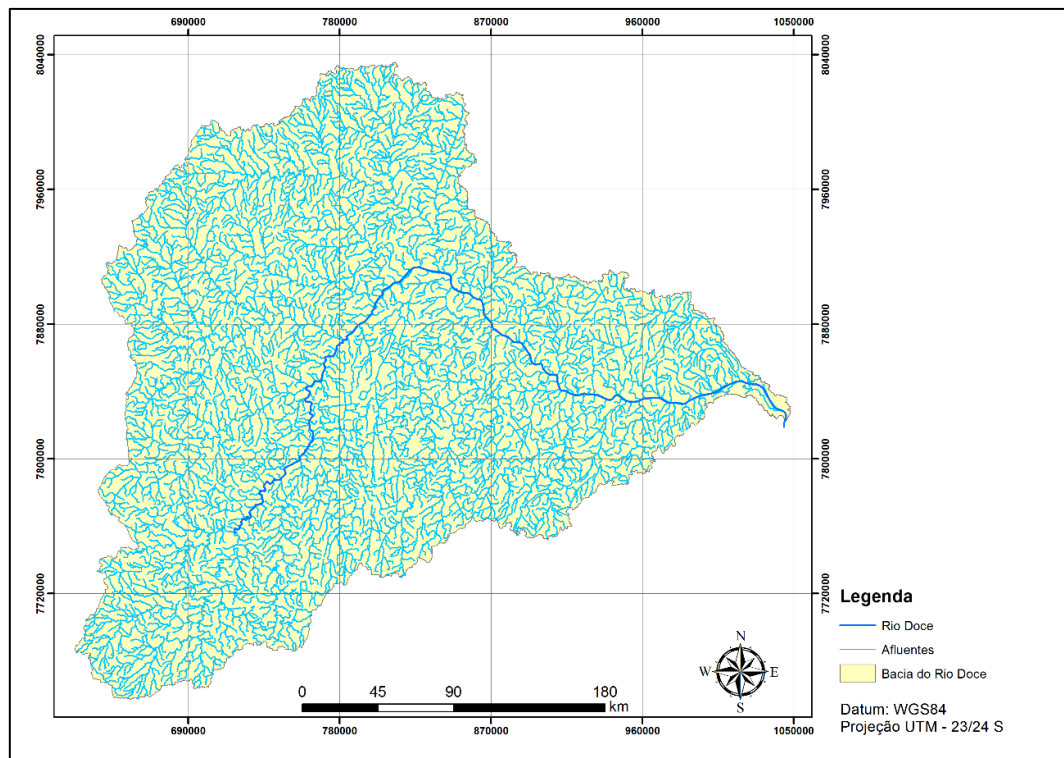


Figura 2.- Rede de drenagem definida para a bacia hidrográfica de estudo

A bacia do rio Doce apresenta grandes variações de elevação, com relevos acidentados, e devido a forma de seccionamento escolhida, foram definidas ao todo 3691 minibacias.

Além da divisão espacial em minibacias, o modelo MGB utiliza outros dois conceitos de discretização: as sub-bacias e as Unidades de Resposta Hidrológica (Collischonn et al., 2020).

As URH são subdivisões internas das minibacias, com base em critérios baseados em mapas de tipos de solos, vegetação e outros (Collischonn et al., 2020). Para a discretização em URHs, foi utilizado o mapa de Unidade de Resposta Hidrológica da América do Sul, desenvolvido por Fan et al. (2015). O mapa possui resolução espacial de 400m. Em cada URH ocorre o balanço de água no solo e os volumes gerados em cada unidade são somados e propagados inicialmente em nível de minibacias e, posteriormente, pela rede de drenagem (Fagundes, 2017).

Na bacia do rio Doce, o mapa elaborado por Fan et al. (2015) fornece 9 Classes de Unidades de Resposta Hidrológica. O mapa com as URH pode ser visualizado na Figura 3.

Para a discretização em sub-bacias, suas localizações foram definidas com base na presença de postos fluviométricos e exutório. As sub-bacias são agrupamentos regionais de minibacias, e são adotadas para facilitar a regionalização do processo de calibração do modelo. Essa divisão é adotada pois muitas vezes não é possível atingir um desempenho satisfatório de modelo hidrológico simplesmente pela adoção de UHR. Isso ocorre, pois frequentemente nem toda a variabilidade das características físicas da bacia são representadas pela UHR representadas (Collischonn et al., 2020). Ao todo foram definidas 64 sub-bacias (Figura 4).

Dados hidrológicos e meteorológicos

Essa etapa consistiu na obtenção e preparação dos dados de chuva, vazão e clima para serem utilizados no modelo, conforme Fan e Collischonn (2014). Foram utilizadas 101 estações pluviométricas e 63 estações fluviométricas disponibilizadas pela ANA no portal HidroWeb. Foi selecionado o período de 1990 a 2020 para obter os dados. Esse período foi escolhido para que houvesse uma boa representatividade, tanto dos períodos de cheia quanto dos de estiagem.

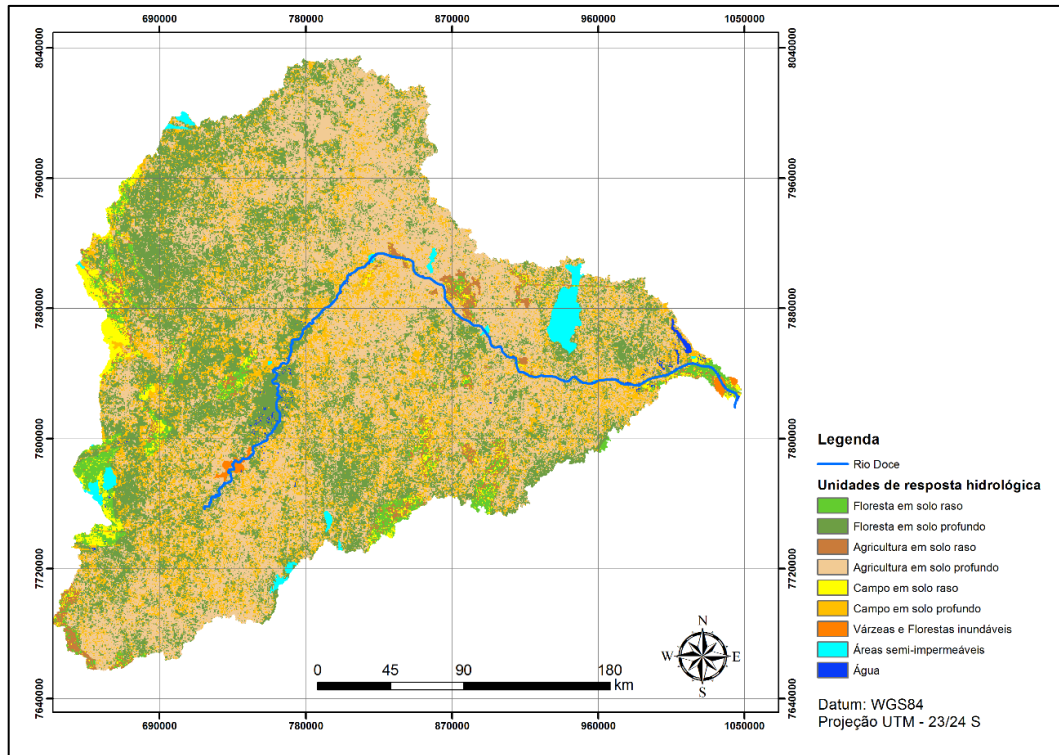


Figura 3.- Classes de URH na bacia hidrográfica do rio Doce

Os dados de chuva foram então interpolados utilizando o método Inverso da Distância ao Quadrado (método padrão usado no modelo MGB) para o centroide de cada minibacia a fim de espacializar essa variável.

Os dados de clima utilizados foram aqueles disponíveis na base interna do MGB, provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET conforme apresentado por Fan e Collischonn (2014). Para o estudo foram utilizadas 9 estações meteorológicas. Ressalta-se que os dados de clima utilizados foram normais climatológicas, que segundo o INMET são valores médios mensais e anuais dos parâmetros meteorológicos.

Calibração dos parâmetros

O processo de calibração dos parâmetros hidrológicos do modelo MGB para a bacia hidrográfica do rio Doce foi executado como descrito por Pontes et al. (2015), utilizando o método de propagação Muskingum-Cunge devido ao tempo de processamento do modelo simplificado ser mais rápido quando comparado ao modelo Inercial. A calibração dos parâmetros foi realizada de forma manual, sem o uso de algoritmos de otimização, objetivando manter os parâmetros hidrológicos semelhantes de acordo com o tipo e uso de solo da bacia.

A definição dos parâmetros na calibração manual é feita pelo usuário, os parâmetros ajustados no modelo para o presente trabalho foram: armazenamento máximo de água no solo (W_m); parâmetros relacionados aos escoamentos subsuperficial (K_{int}) e subterrâneo (K_{bas}); parâmetros relacionados ao tempo de propagação dos escoamentos superficial (CS), subsuperficial (CI) e subterrâneo (CB).

Os parâmetros que mais influenciam no comportamento do hidrograma no período de seca são C_b e K_{bas} , que são diretamente proporcionais à vazão de estiagem. Já o W_m , que caracteriza a capacidade do solo de armazenar água, influencia nos picos de cheia do hidrograma, sendo inversamente proporcional a essa vazão. Dessa forma, de acordo com o comportamento dos hidrogramas, os parâmetros para cada sub-bacia foram ajustados manualmente.

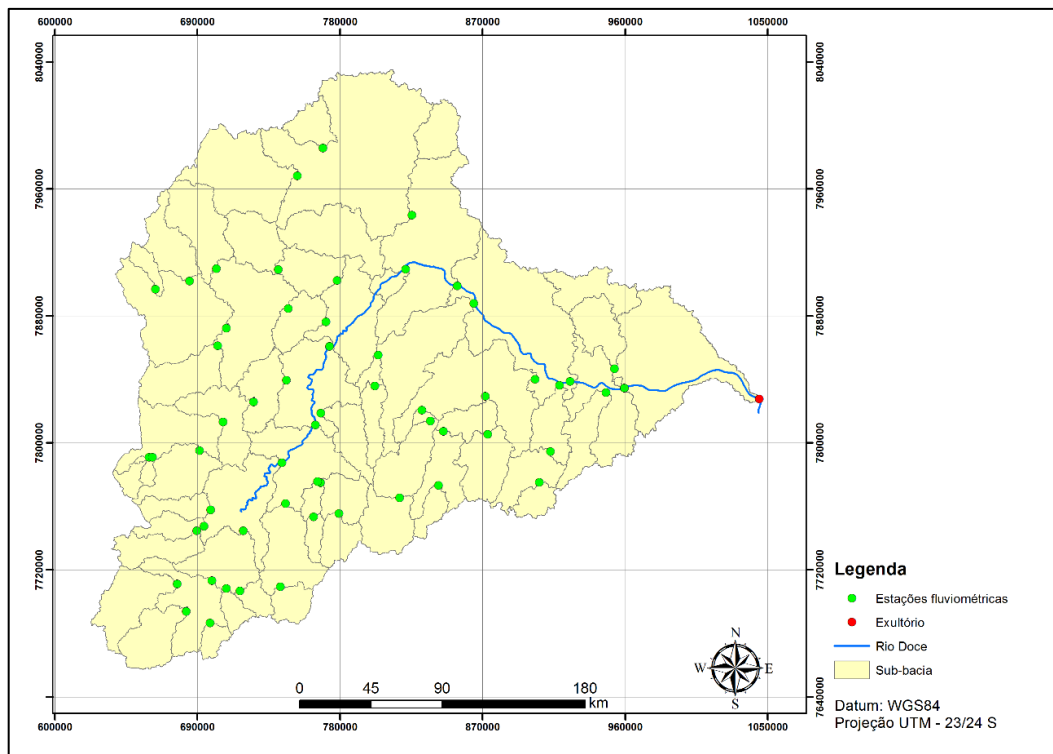


Figura 4.- Discretização da bacia em sub-bacias

Também como descrito por Pontes et al. (2015), após a calibração do modelo, foi realizada uma verificação utilizando o modelo Inercial para o mesmo período de calibração. Essa verificação teve como objetivo analisar se ocorreria uma melhoria na representação do processo de propagação de vazão, em relação ao modelo simplificado. As vazões simuladas foram comparadas com dados de vazões observadas oriundas das estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA). As vazões simuladas foram avaliadas através de três medidas de desempenho.

As medidas de desempenho consideradas foram: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe das vazões simuladas e observadas (ENS); o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões simuladas e observadas (ENSLog); e o erro relativo de volume total dos hidrogramas (ΔV).

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^N (QO_i - QOm)^2} \quad [1]$$

$$ENSLog = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QC_i) - \text{Log}(QO_i))^2}{\sum_{i=1}^N (\text{Log}(QO_i) - QOmLog)^2} \quad [2]$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^N QC_i - \sum_{i=1}^N QO_i}{\sum_{i=1}^N QO_i} \quad [3]$$

Onde QC_i a vazão calculada num intervalo de tempo i ; QO_i é a vazão observada neste mesmo intervalo de tempo; N é o número de intervalos de tempo; e QOm é a média das vazões observadas no período de N intervalos de tempo e $QOmLog$ é a média dos logaritmos das vazões observadas no período de N intervalos de tempo (Pontes et al., 2015).

O coeficiente de Nash-Sutcliffe (ENS) varia de 0 a 1, e quanto maior, melhor o ajuste entre vazões calculadas e observadas. Seu valor é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, por isto, quanto mais próximo de 1, o modelo está obtendo um bom ajuste para as cheias. Quando o coeficiente supera 0,75, considera-se que o desempenho do modelo é adequado, e acima de 0,36 o modelo é considerado aceitável (Gotschalk e Motovilov, 2000).

O valor do coeficiente de Nash dos logaritmos das vazões (ENSlog) também tem valor máximo igual a 1, e é mais fortemente influenciado pelas vazões mínimas do que o ENS. Valores de

ENSlog próximos da unidade significam que o modelo está simulando adequadamente os períodos de recessão do hidrograma e as estiagens (Collischonn, 2001).

O erro no volume (ΔV) não tem valor máximo nem mínimo, e não é influenciado de forma diferenciada por períodos de cheias ou de estiagens, mas expressa a diferença relativa entre a soma de todas as vazões, calculadas e observadas, sem considerar sua sequência temporal. Esta função objetivo é útil para observar se as perdas de água por evapotranspiração estão sendo corretamente calculadas (Collischonn, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio do modelo foram avaliados para duas minibacias, que continham postos fluviométricos, uma localizada a jusante no rio principal e outra a montante. A Tabela 1 contém informações dos postos fluviométricos que foram utilizados para a análise. As localizações das estações fluviométricas podem ser visualizadas no mapa da Figura 5.

Tabela 1. – Sumarização das estações fluviométricas utilizadas na análise dos resultados

Código da Estação	Nome	Estado	Município	Latitude	Longitude
56539000	Cachoeira dos Óculos Montante	MG	Córrego Novo	-19.7769	-42.4764
56994500	Colatina	ES	Colatina	-19.5333	-40.6297

Os gráficos contendo os resultados obtidos por meio da simulação utilizando o método Inercial, para os postos fluviométricos 56539000 e 56994500 podem ser visualizados nas Figuras 6 e 7 respectivamente. As linhas em vermelho representam as vazões simuladas e em azul as observadas. O Nash é o coeficiente de Nash-Sutcliffe, o Nash-Log é o coeficiente de Nash dos logaritmos das vazões e o Bias é o erro relativo de volumen total dos hidrogramas.

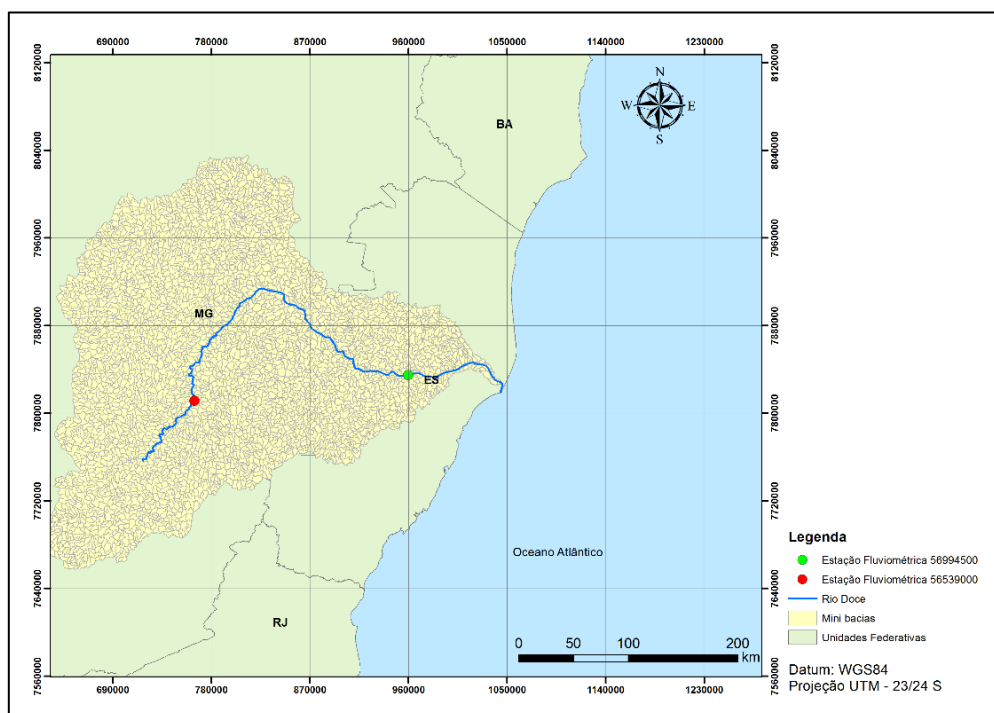


Figura 5. – Localização das estações fluviométricas utilizadas na análise dos resultados

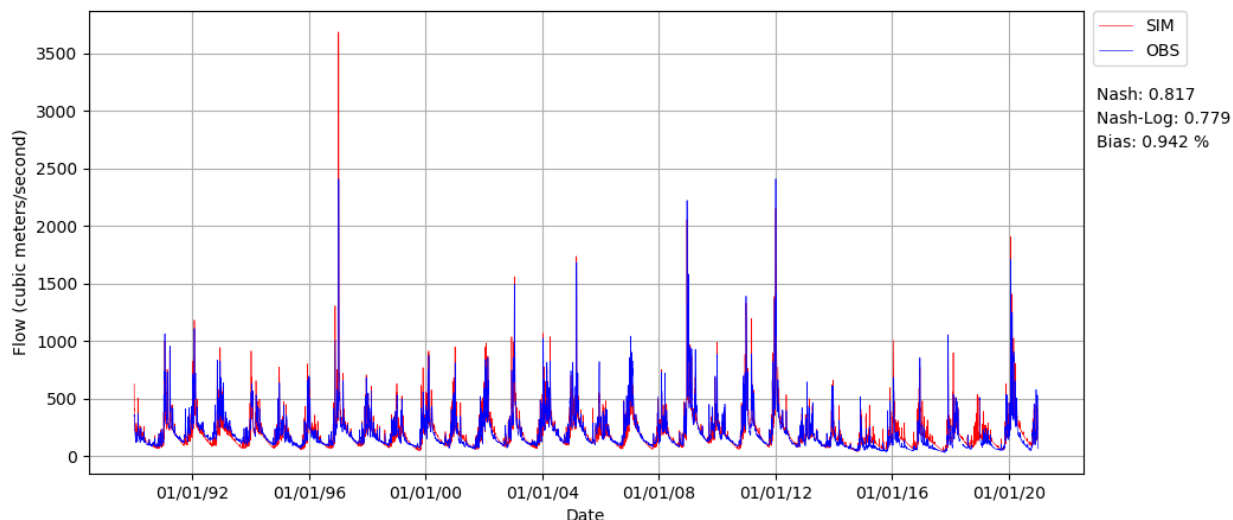


Figura 6. – Hidrograma de saída no posto 56539000

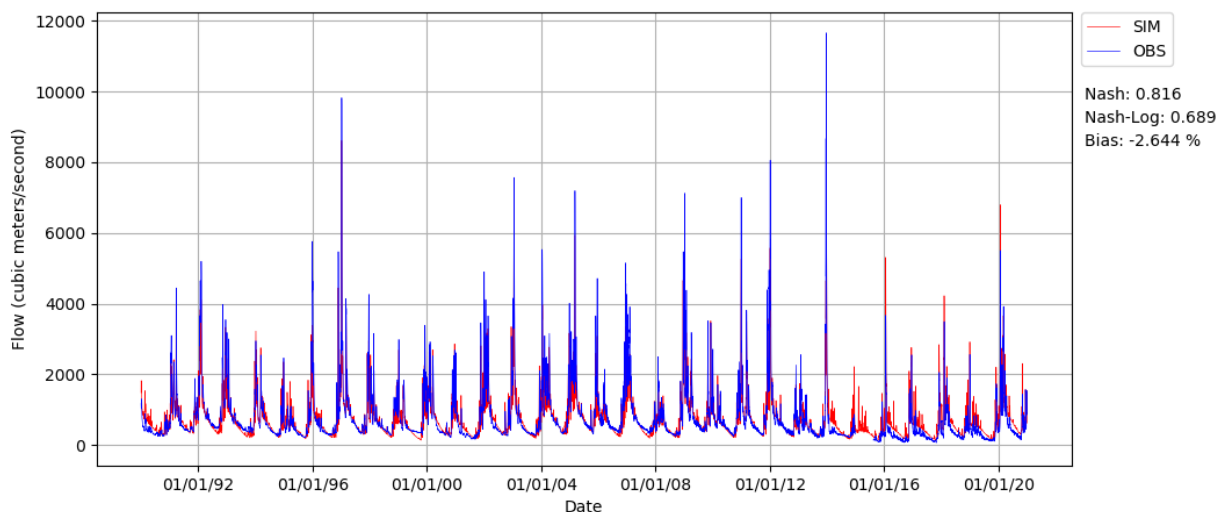


Figura 7. - Hidrograma de saída no posto 56994500

Nota-se que logo após o ano de 2012, as vazões observadas em ambos os hidrogramas diminuem consideravelmente, isso se deve ao fato de a bacia entrar em um período de estiagem. Entretanto, pode-se observar que as vazões simuladas nesse período estão superdimensionadas em ambos os postos. Para melhor visualização das vazões superdimensionadas, foram gerada curvas de permanência das vazões a partir do ano de 2012 para ambos os postos. Essas curvas podem ser visualizadas nas Figuras 8 e 9, onde em azul são as vazões observadas e em vermelho as simuladas.

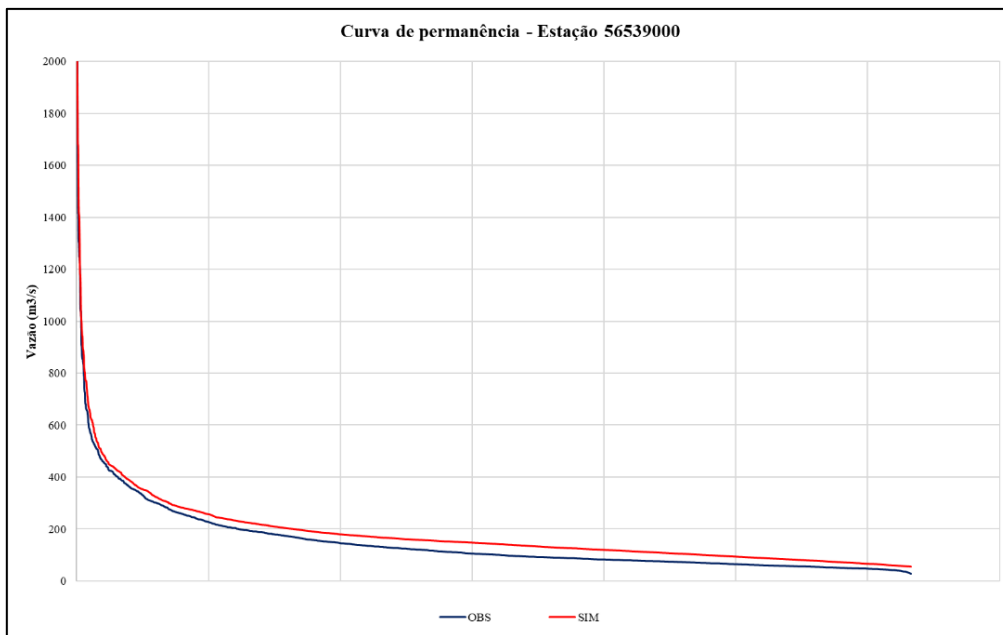


Figura 8. – Curva de permanência para a estação fluviométrica 56539000 (2012-2020)

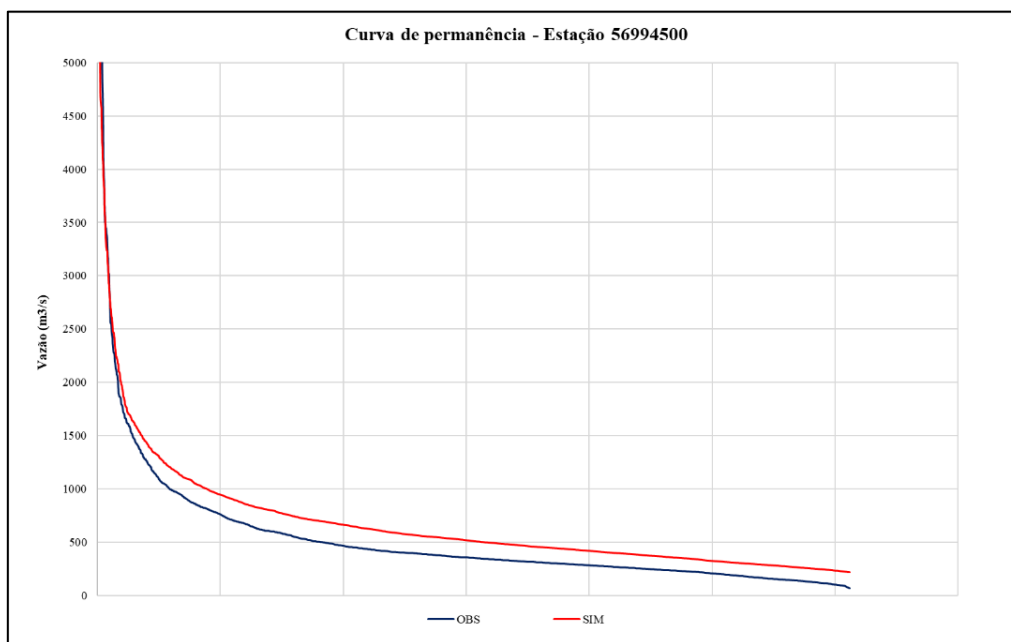


Figura 9. – Curva de permanência para a estação fluviométrica 56994500 (2012-2020)

Nota-se que em ambas estações, à medida que as vazões observadas diminuem a diferença entre as vazões simuladas e observadas aumenta. Chegando à uma diferença de 48% na primeira estação, com diferença média de 23% e na segunda estação 68% com diferença média de 30%.

Essa superdimensionalização das vazões simuladas tem sido objeto de estudo nos últimos anos, com isso, algumas tentativas de explicação desse fato são baseadas em:

- Relações altamente não lineares entre os reservatórios do modelo: no MGB o processo de retardo e amortecimento dos hidrogramas dos escoamentos é representado através da passagem deles por três reservatórios lineares, sendo um para cada tipo de escoamento gerado: superficial, subsuperficial (ou interno) e subterrâneo (Collischonn et al., 2020), conforme ilustrado na Figura 10.

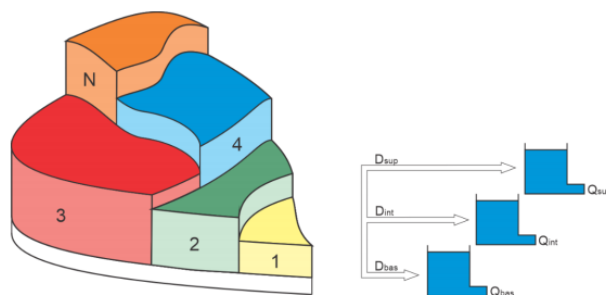


Figura 10. – Ilustração de escoamento no interior das minibacias e URH, antes de atingir a rede de drenagem.

Entretanto, em períodos de seca o modelo poderá apresentar uma incapacidade de rastrear o acúmulo de déficit de água, o que significa que eles provavelmente superestimarão os fluxos nesse período. No MGB isso pode ser justificado pela não linearidade dos reservatórios durante a seca, o que significa que um evento relativamente pequeno de chuva pode ser suficiente para conduzir a umidade do solo de volta a um estado de produção de escoamento superficial mais alto, representando o período de estiagem de forma irrealista (Fowler et al., 2020);

- Utilização de normais climatológicas: o MGB utiliza para a simulação dados de normais climatológicas que são valores médios mensais e anuais dos parâmetros meteorológicos. Dessa forma, secas plurianuais muitas vezes não são representadas nesses dados, assim, o modelo não consegue acompanhar as variações da vazão que ocorrem nesse período. Uma sugestão para estudos posteriores, é avaliar a performance do modelo para eventos de seca utilizando dados climatológicos diários;
- Calibração dos parâmetros do modelo: como a calibração do modelo é feita analisando os valores de vazões máximas e mínimas para toda série histórica utilizada no estudo, a calibração tende a buscar uma relação ótima média, assim, em períodos de estiagem ela pode não funcionar tão bem. Uma hipótese para teste, seria, como descrito em Fowler et al. (2020), calibrar os parâmetros para os diferentes períodos (chuvoso e seco).

CONCLUSÕES

Nesse artigo, o modelo MGB foi utilizado para simular as vazões na bacia hidrográfica do rio Doce, que tem passado por um período de seca desde 2012, com objetivo de avaliar sua performance nesses períodos. As vazões simuladas foram comparadas com as vazões observadas disponibilizadas pela ANA. Dessa forma, pôde-se constatar que para períodos de estiagem as vazões mínimas simuladas são superestimadas quando comparadas com as vazões observadas, chegando à uma diferença de 68% em uma das estações de análise.

Concluí-se que o modelo não possui uma boa performance, ao representar as vazões mínimas, em épocas de seca para essa área de estudo. Essa baixa performance pode ser atribuída a três fatores: relações não lineares entre os reservatórios do modelo nesses períodos, utilização de normais climatológicas em detrimento de dados climatológicos diários e calibração dos parâmetros para toda série histórica. Ressalta-se que são necessários estudos mais aprofundados nesse quesito para que se chegue a uma conclusão satisfatória da performance do MGB em eventos de seca.

REFERÊNCIAS

- Alves, M.E.; et al.** (2020). Manual de aplicação do modelo MGB utilizando o IPH-HYDRO Tools. Manual Técnico, HGE, IPH, UFRGS.
- Agência Nacional de Águas - ANA.** (2016). Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce: Rompimento da Barragem em Mariana/MG. Brasília(DF): s.n.
- Buarque, D. C.; et al.** (2009). Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 14(2), pp. 91-103.
- Buarque, D. C.** (2015). Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do rio Madeira. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre, 182p.
- Collischonn, W.** (2001). Simulação Hidrológica de grandes bacias. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 270 p.
- Collischonn, W. & Tucci, C. E.** (2001). Simulação Hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, V. 6, pp. 15-35.
- Collischonn, W.; et al. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895.
- Collischonn, W., et al.;** (2020). Manual de Referência Teórica do MGB. HGE, IPH, UFRGS.
- Cunge, J. A.; Holly, F. M.; Verwey, A.** (1980). Practical aspects of computational river hydraulics. Boston: Pitman. 420 p.
- Fagundes, H de O.** (2017). Modelagem hidrossedimentológica de grandes bacias com apoio de dados in situ e sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Porto Alegre. 201 f.
- Fan, F. M.; et al.** (2013). Sobre o início da rede de drenagem definida a partir dos modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(3), pp. 241-257.
- Fan, F. M., Pontes, P. R. M. & Paiva, R. C. D.** (2014). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, pp. 137-147.
- Fan, F. M.; et al.** (2015). Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Novembro, Brasília-DF.
- Fan, F. M.; Collischonn, W.** (2014). Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. RBRH - *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, p. 243-254.
- Fowler, K.; et al.** (2020). Many Commonly Used Rainfall-Runoff Models Lack Long, Slow Dynamics: Implications for Runoff Projections. *Water Resources Research*, 56 (5), 1-27.
- Gottschalk, L.; Motovilov, Y.** (2000). Macro-scale hydrological modelling – a scandinavian experience. International Symposium on: „Can science and society save the water crisis in the 21st century – Reports from the World,, Japan Society of Hydrology and Water Resources. Tokyo. pp. 38-45
- IBIO - Instituto BioAtlântica.** (2017). Uso e Cobertura do Solo (mapa). Disponível em: <https://www.igeo.org.br/map#>. Acesso em: 20 jun de 2021.
- Lima, R. P. C.** (2016). Avaliação de índices de severidade de seca na bacia do rio Doce visando ao desenvolvimento de sistema de classificação de secas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 85 f.
- PIRH.** (2010). Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce: Relatório Final-Volume I. Consórcio Ecoplan-Lume.
- Pontes, P. R. M.;** et al. (2015). Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, pp. 888- 904. 2015.
- Siqueira, V. A.;** et al. (2017). Desenvolvimento de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a América do Sul: parte 1. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH.
- Tucci, C. E. M.** (2005). Modelos Hidrológicos. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 679 p.