

Modelagem de qualidade da água no rio São Marcos, bacia hidrográfica do alto Paraná

Water quality modeling in the São Marcos River, Upper Paraná River Basin

• **Data de entrada:**
03/09/2017

• **Data de aprovação:**
08/06/2018


Marcio Ricardo Salla^{1*} | Nathália Barcelos Cunha¹ | Sérgio Siqueira Prado Soares¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.003>

ORCID ID

Salla M. R.  <https://orcid.org/0000-0003-2567-6173>

Soares S.S.P.  <https://orcid.org/0000-0002-6528-2411>

Cunha N. B.  <https://orcid.org/0000-0001-5877-4277>

Resumo

A bacia hidrográfica do rio São Marcos, localizada no alto Paraná entre os estados de Goiás e Minas Gerais e o Distrito Federal, apresenta conflito hídrico de grande relevância entre o setor hidrelétrico (operação em cascata das centrais hidrelétricas Batalha – potencial de 52,5 MW e Serra do Facão – potencial de 210 MW) e o setor agrícola (total outorgado de 65,7 hm³/mês em meados de 2017). O objetivo deste artigo foi avaliar a carga máxima afluyente de amônia, nitrato e fósforo total que os reservatórios suportam para ainda se enquadrar aos limites definidos na Resolução Conama 357:2005. A calibração do modelo a partir da ferramenta AQUATOOL, entre outubro de 2014 e setembro de 2017, forneceu bom ajuste entre as simulações e os dados medidos (para os parâmetros OD, DBO, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato e fósforo total) em quatro postos de monitoramento. Os cenários mostraram capacidade máxima de aporte de 4,19, 9,18 e 0,055 ton/km².mês de amônia, nitrato e fósforo total, respectivamente, para as sub-bacias de contribuição de Batalha e de 1,30, 3,34 e 0,019 ton/km².mês de amônia, nitrato e fósforo total, respectivamente, nas sub-bacias de contribuição de Serra do Facão, todas a jusante do reservatório de Batalha. De forma geral, o estudo contribuiu para o planejamento e gestão de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio São Marcos.

Palavras-chave: Modelagem. Conflito hídrico. AQUATOOL. Rio São Marcos. Uso e ocupação do solo.

Abstract

São Marcos river watershed is located in the state of Paraná, Brazil, between the states of Goiás, Minas Gerais and the Federal District. It presents a relevant hydric conflict between the hydroelectric sector (cascade operation of the Batalha hydroelectric plant - 52.5 MW of potential and Serra do Facão - 210 MW of potential) and the agricultural sector (granted of 65.7 hm³/month in 2017). This article aimed to assess the maximum affluent total load of ammonia, nitrate and phosphorus that the dams support and still be framed within the limits defined in the 357:2005 Conama Resolution. The model's calibration in AQUATOOL computational tool, between October 2014 and September 2017, provided a good adjustment between the simulations and the measured data (for the OD, DBO, organic nitrogen, ammonia, nitrate and total phosphorus) in four monitoring positions located in São Marcos River. The scenario has showed a maximum contribution capacity of 4.19, 9.18 e 0.055 ton/km².month of ammonia, nitrate and total phosphorus, respectively, in the contributions sub watersheds in Batalha and of 1.30, 3.34 and 0.019 ton/km².month of ammonia, nitrate and phosphorus in the contributions sub watersheds in Serra do Facão. In general, the study contributed for the planning and management of the soil use and occupation on the watershed.

Keywords: Modeling. Hydric conflict. AQUATOOL. São Marcos river. Use and occupation of soil.

¹ UFU - Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Civil – FECIV. Uberlândia (MG), Brasil.

* **Autor correspondente:** marcio.salla@ufu.br.

1 INTRODUÇÃO

O potencial hídrico no território brasileiro é 19 vezes superior ao mínimo estabelecido pela Organização das Nações Unidas, que é de 1.700 m³/hab.ano (Agência Nacional de Águas - ANA, 2007). Todavia, a distribuição hídrica é desigual geograficamente, o que ocasiona diversos conflitos de ordem quantitativa e qualitativa.

Diante desses conflitos, no ano de 1997 entrou em vigor a Lei nº 9.433, também conhecida como Lei das Águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). De acordo com essa lei, a água é considerada um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico, e a gestão dos recursos hídricos deve proporcionar os usos múltiplos de forma descentralizada e participativa, contando com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades (BRASIL, 1997).

Dentre as doze grandes regiões hidrográficas no Brasil, a grande bacia hidrográfica do Paraná merece destaque, visto que se estende por regiões com grande desenvolvimento econômico e social, incluindo parcelas do Distrito Federal e dos estados de São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Goiás e Santa Catarina. A densidade populacional elevada e a grande quantidade de indústrias dos diversos ramos de atuação prejudicam a capacidade de autodepuração dos corpos hídricos superficiais, enquanto a elevada disponibilidade hídrica associada às características geomorfológicas favoráveis acentuam os conflitos de ordem quantitativa entre os irrigantes e o setor hidrelétrico (ANA, 2015).

Dentro da grande bacia hidrográfica do Paraná, quando o foco está no conflito de interesse entre o setor agrícola e hidrelétrico, a bacia hidrográfica do rio São Marcos tem grande importância. Em função da elevada disponibilidade hídrica e

das características geomorfológicas favoráveis, essa bacia hidrográfica possui grande quantidade de outorgas consuntivas para irrigação (cerca de 97 mil hectares irrigados até 2016, de acordo com a Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa - ABRAGEL, 2016), além de duas outorgas não-consuntivas para reservação de água nas centrais hidrelétricas de Batalha (potencial de 52,5 MW) e Serra do Facão (potencial de 210 MW) (FURNAS, 2018).

Nos últimos anos, após o início do enchimento do reservatório de Batalha em 2010, os conflitos entre os irrigantes e o setor hidrelétrico se agravaram. As Resoluções da ANA 562 (ANA, 2010a) e 564 (ANA, 2010b) foram elaboradas para, respectivamente, estabelecer o marco regulatório da bacia hidrográfica pactuado entre a ANA e os órgãos gestores de Goiás (Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMARH) e Minas Gerais (Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM) e para revisar a outorga da Usina Hidrelétrica (UHE) de Batalha. Entretanto, as vazões disponibilizadas para usos consuntivos foram superadas pelas demandas existentes, o que tem motivado, por parte do Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Paranaíba, a criação de grupos de trabalho para revisão, acompanhamento e fiscalização do cumprimento do marco regulatório (ANA, 2014).

Contudo, além da necessidade da otimização hídrica quantitativa na bacia hidrográfica do rio São Marcos, uma gestão eficiente carece também da avaliação dos impactos qualitativos causados pelo lançamento progressivo de defensivos agrícolas e fertilizantes sobre os reservatórios de acumulação de Batalha e Serra do Facão. Nesse contexto, o objetivo geral deste artigo foi avaliar a máxima carga afluyente de amônia, nitrato e fósforo total por sub-bacia para que o rio São Marcos (em seu trecho lótico) e os reservatórios de acumulação de Batalha e Serra do Facão ainda mantenham os limites de qualidade da água de-

finalizados no Conselho Nacional de Meio Ambiente a partir da Resolução Conama 357 (BRASIL, 2005). Todas as simulações computacionais foram realizadas com o auxílio da ferramenta computacional AQUATOOL, para o período de outubro de 2014 até setembro de 2017, que engloba os módulos de quantidade de água (SIMGES) e de qualidade da água (GESCAL).

O presente estudo almeja auxiliar tecnicamente o Comitê da bacia hidrográfica do rio Paranaíba na melhor gestão hídrica no rio São Marcos, cuja topologia do sistema hídrico já estruturada facilita as simulações de novos arranjos hídricos de demanda consuntiva e não consuntiva e de futuros cenários de uso e ocupação do solo.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Toda a caracterização da bacia hidrográfica do rio São Marcos foi realizada a partir da ferramenta QGIS, por meio do processamento do modelo digital do terreno formado pelo mosaico de oito folhas do Topodata 30 x 30 (15S48_ZN, 15S495ZN, 16S48_ZN, 16S495ZN, 17S48_ZN, 17S495ZN, 18S48_ZN e 18S495ZN), disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2017).

A bacia hidrográfica do rio São Marcos localiza-se na região central do Brasil, entre as coordenadas UTM (Zona 23 Sul) 191905 - 286161 mE e 8089111 - 8121130 mN, com uma área de drenagem de 11.950 km², sendo 0,6% pertencente ao Distrito Federal, 71,9% ao estado de Goiás e 27,5% ao estado de Minas Gerais (ANA, 2017). De domínio federal, o rio São Marcos percorre cerca de 480 km, da sua nascente no córrego Sambaíba (Brasília), altitude de aproximadamente 1000 m, até o encontro com o rio Paranaíba (formador do rio Paraná), na altitude aproximada de 650 m. A bacia abrange terras do sul e sudes-

te goiano e uma pequena faixa alongada no oeste mineiro, cujos municípios pertencentes são Catalão, Cristalina, Ouidor, Campo Alegre de Goiás, Ipameri e Davinópolis no estado de Goiás, além de Paracatu, Unai e Guarda-Mor no estado de Minas Gerais.

Na região predomina o clima tropical úmido, com os períodos seco e úmido bem definidos. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2017), a precipitação anual na bacia varia entre 1330 e 1550 mm, sendo a média de aproximadamente 1426 mm. Já a evapotranspiração média anual é de cerca de 900 mm. As temperaturas médias anuais predominantes ficam entre 18 e 22° C, com máxima de 37°C entre janeiro e março e mínima de 0° C entre maio e julho.

De acordo com a Fig. 1a, o relevo a montante da central hidrelétrica de Batalha é formado por chapadões e vales abertos em suas porções mais altas, ideais para a agricultura tecnificada de sementes, grãos e hortícolas (via pivô central). Já a geomorfologia da calha principal do rio São Marcos é formada por vales encaixados em suas porções média e baixa, com acentuada declividade, propícios para a geração de energia hidrelétrica (SILVA e HORA, 2015).

A Usina Hidrelétrica de Batalha está localizada entre os municípios de Cristalina (GO) e Paracatu (MG) e possui capacidade de gerar 52,5 MW _energia suficiente para abastecer uma cidade de 130 mil habitantes, com outorga não consuntiva de uso da água emitida à Furnas Centrais Elétricas. Já a UHE Serra do Falcão localiza-se no estado de Goiás, entre os municípios de Catalão e Davinópolis, cujo reservatório abrange terras de cinco municípios goianos (Ipameri, Campo Alegre de Goiás, Catalão, Davinópolis e Ouidor), além de um mineiro de Guarda-Mor. Essa usina apresenta capacidade de 210 MW, suficiente para atender a uma cidade com 1,2 milhão de habitantes, sendo um dos maiores empreendi-

mentos de seu Estado, com outorga não consuntiva emitida à Furnas Centrais Elétricas (BRASIL, 2011; FURNAS, 2018).

As altitudes na bacia hidrográfica variam de pouco mais de 640 m, na foz do rio São Marcos, a mais de 1200 m no domo de Cristalina, localizado no município de Cristalina-GO (Fig. 1a). O domo de Cristalina possui diâmetro de 30 a 40 km, tendo sido originado a partir do arqueamento de corrente tectônica que ocasionou dobramentos em toda área circunvizinha (BRASIL, 2003). Já na Fig. 1b é possível notar quão heterogêneo é o terreno, com declividade máxima de 25%. Nos trechos superiores, o relevo é plano a ondulado; já na parte inferior, o relevo é acidentado e montanhoso. As áreas com chapadões e vales abertos e suaves favorecem a prática da agricultura irrigada.

Inserida no bioma cerrado, a bacia hidrográfica apresenta vegetação variando de campos limpos até cerradões, relativamente mais densos. Cabe destacar que o elevado índice de cobertura vegetal na bacia deve-se especialmente à presença de amplos terrenos com maior declividade, estando também mais suscetíveis a processos de erosão e assoreamento (ANA, 2014). Os solos que predominam na região são de baixa fertilidade natural, sendo então necessária a aplicação de fertilizantes e corretivos de solo. Outra importante característica da bacia hidrográfica é a presença de solos profundos e bem drenados, principalmente nos chapadões. Esses solos possuem alta capacidade de infiltração e de armazenamento de água, favorecendo a alimentação de córregos, rios e ribeirões durante longos períodos de estiagem.

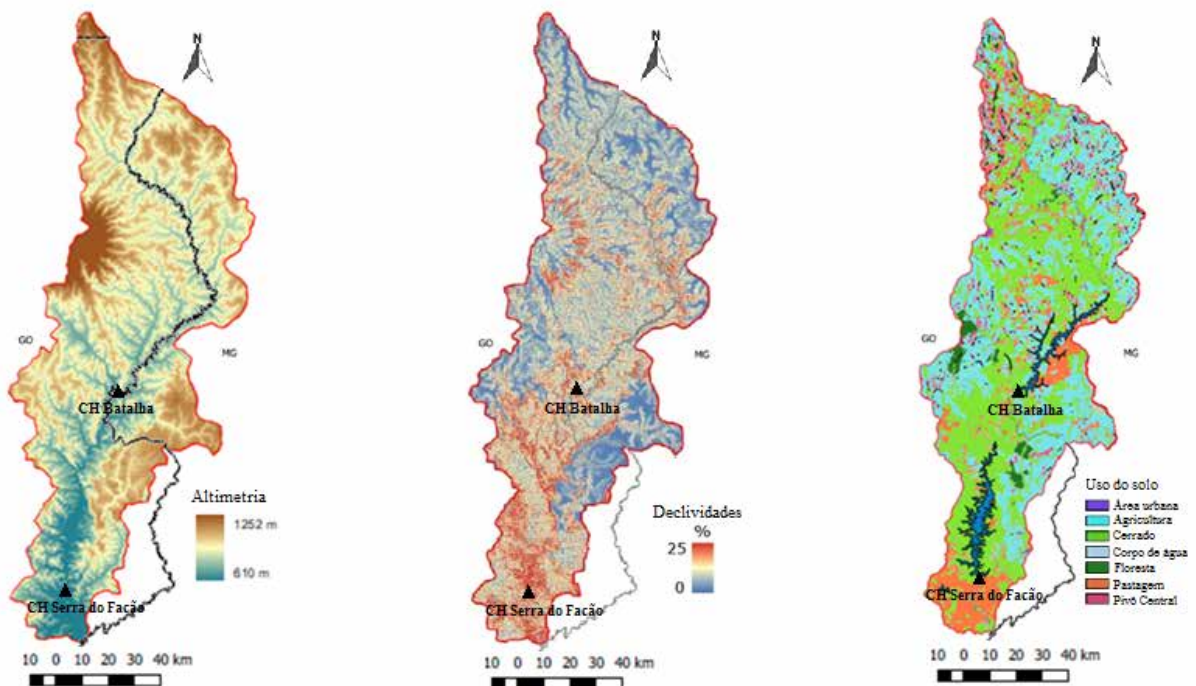


Figura 1 – Na bacia hidrográfica do rio São Marcos: (a) Mapa de altitude; (b) Mapa de declividade; (c) Mapa de uso do solo

O mapeamento do atual uso e ocupação do solo na bacia (ver Fig. 1c) demonstra a predominância das atividades de agricultura nas áreas de cabeceira, inclusive com concentração de pivôs centrais de irrigação em alguns trechos. Ainda na Fig. 1c, dentre os diversos usos e ocupação do solo na bacia, a área urbana corresponde a 12,50 km² (0,1% da área total), a agricultura corresponde a 4026,19 km² (33,6% da área total), o cerrado corresponde a 5330,95 km² (44,4% da área total), a área florestal corresponde a 208,86 km² (1,7% da área total), a pastagem corresponde a 1675,19 km² (14,0% da área total) e a irrigação por pivô central corresponde a 708,57 km² (5,9% da área total), enquanto a área inundada dos ambientes lântico e lótico corresponde a 33,79 km² (0,3% da área total).

2.2 Dados de entrada

2.2.1 Dados fluviométricos

As séries históricas de vazão afluente, vertente e turbinada nas barragens dos reservatórios de Batalha e Serra do Facão (fornecidas pelo Sistema de Acompanhamento de Reservatórios - SAR) foram utilizadas neste estudo para estimar, a partir do método de descarga específica, as séries sintéticas de vazão para as contribuições difusas e para as sub-bacias afluentes ao rio São Marcos (FURNAS, 2018).

2.2.2 Dados de qualidade da água e climatológicos

Os parâmetros de qualidade da água incluem temperatura da água, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total, nitrogênio orgânico (NO), amônia e nitrato, obtidos junto à Serra do Facão Energia SA - SE-FAC (2018) e IGAM (2017). Os postos de monitoramento identificados na Fig. 2a como BAT01 (a montante da área represada da UHE Batalha), SF06 (logo a jusante da central hidrelétrica de Batalha), SF02 (logo a jusante da central hidrelétrica de Serra do Facão) e SF01 (no final no trecho do rio São Marcos, próximo à confluência com o rio Paranaíba), todos inseridos ao longo do rio São Marcos, foram utilizados no processo de calibração dos coeficientes de reações bioquímicas e das constantes de sedimentação. Já os postos identificados como BAT02, SF17, SF18, SF19, SF20, SF21 e SF22 (Fig. 2a) foram utilizados como dados de entrada de qualidade da água para os respectivos tributários.

No processo de calibração do modelo, a qualidade da água para os outros tributários, cujos dados não foram monitorados pelos órgãos ambientais (identificados na Fig. 2a por Afl 1 até Afl 24 e Difusas 1, 2 e 3), foram assumidos dentro do padrão de qualidade do rio classe 2, de acordo com o CONAMA 375 (BRASIL, 2005), além de seguir as recomendações de Von Sperling (2014).

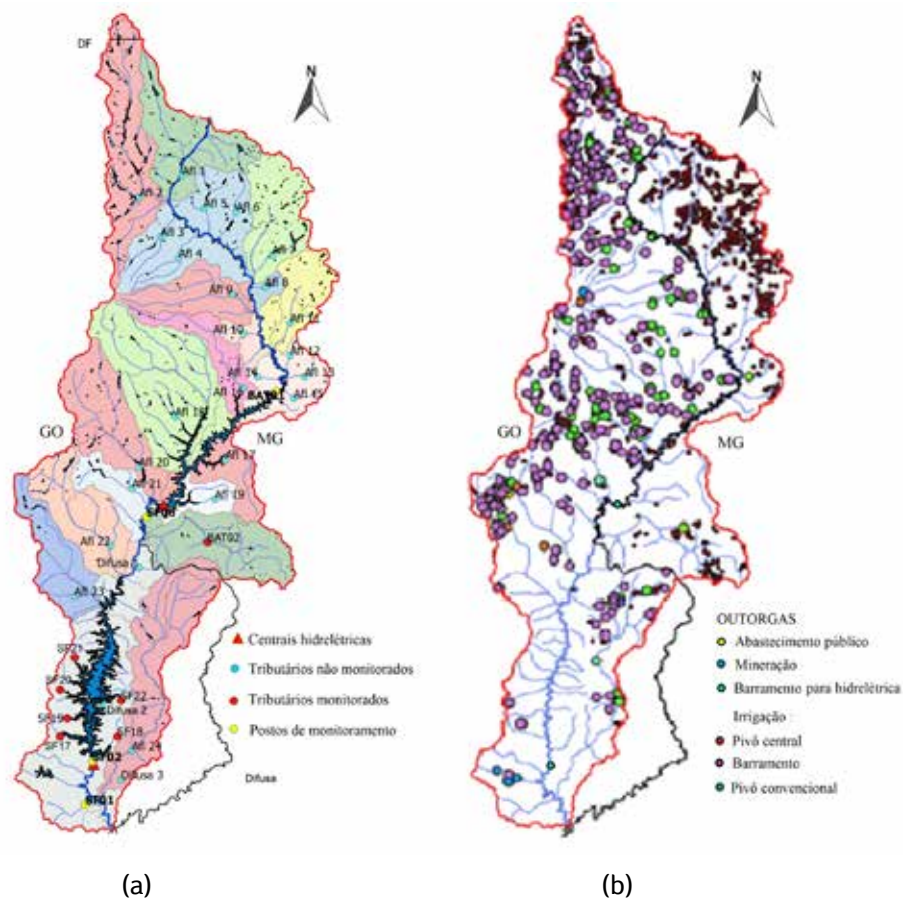


Figura 2 – Localização dos postos de monitoramento de qualidade da água e das demandas

Os dados climatológicos utilizados foram a evaporação nos reservatórios e a temperatura da água nos quatro postos de monitoramento ao longo do rio São Marcos (BAT01, SF06, SF02 e SF01). A Tabela 1 traz as coordenadas geográficas das estações de qualidade da água e climatológica utilizadas.

Com relação à temperatura, em cada posto de monitoramento foi gerada uma curva mensal de temperatura. Para as conduções ou trechos de

rio localizados a montante da estação BAT01, foi adotada a curva da estação BAT01. Para os trechos entre as estações BAT01 e SF06 foi adotada a curva da estação SF06. Para os trechos entre as estações SF06 e SF02 foi adotada a curva da estação SF02 e, por fim, para os trechos entre as estações SF02 e SF01 foi adotada a curva da estação SF01. A jusante de SF01 foi adotada a curva da estação SF01.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas das estações de qualidade da água e climatológica

Posto de monitoramento	Descrição da estação de amostragem (trechos em ambiente lótico)	Latitude Decimal	Longitude Decimal
SF01	Rio São Marcos, logo a jusante de Serra do Facão	-18,10	-47,69
SF02	Rio São Marcos, a 3 km a jusante de Serra do Facão	-18,06	-47,67
SF06	Rio São Marcos, logo a jusante de Batalha	-17,38	-47,52
SF17	Ribeirão Pires	-17,99	-47,76
SF18	Ribeirão São João da Cruz	-17,99	-47,60
SF19	Ribeirão Buracão	-17,94	-47,74
SF20	Ribeirão Segredo	-17,86	-47,76
SF21	Ribeirão Pirapetinga	-17,77	-47,72
SF22	Córrego Anta-Gorda	-17,89	-47,59
BAT01	Rio São Marcos, entre Córrego Crioulos e Cachorros	-17,03	-47,16
BAT02	Rio Batalha	-17,45	-47,35

Com relação à temperatura, em cada posto de monitoramento foi gerada uma curva mensal de temperatura. Para as conduções ou trechos de rio localizados a montante da estação BAT01, foi adotada a curva da estação BAT01. Para os trechos entre as estações BAT01 e SF06 foi adotada a curva da estação SF06. Para os trechos entre as estações SF06 e SF02 foi adotada a curva da estação SF02 e, por fim, para os trechos entre as estações SF02 e SF01 foi adotada a curva da estação SF01. A jusante de SF01 foi adotada a curva da estação SF01.

2.2.3 Demandas consuntivas e não consuntivas outorgadas

Os dados georreferenciados foram fornecidos pela Agência Nacional de Águas, pela Superintendência Regional de Meio Ambiente - SUPRAM/IGAM e SEMARH-GO, com abrangência das demandas consuntivas para abastecimento público, irrigação, mineração e não consuntivas superficiais outorgadas do setor hidrelétrico, conforme a Fig. 2b. Na avaliação das vazões outorgadas foram consideradas apenas as outorgas em vigência no período de realização da modelagem de qualidade da água.

2.2.4 Dados hidráulicos e batimétricos

Com relação aos dados hidráulicos em ambiente lótico, a partir da escolha na ferramenta pela equação de Manning, os dados requeridos foram: largura da superfície do canal, declividade de fundo do canal, declividade de talude lateral e coeficiente de rugosidade de Manning. A sequência traz o procedimento utilizado para a obtenção dos dados e distribuições espaciais ao longo do rio São Marcos.

Inicialmente, as coordenadas geográficas de cada nó (obtidas no QGIS) foram lançadas na ferramenta de uso livre Google Earth. A partir daí foi possível mensurar a largura do canal principal do rio São Marcos em cada nó, a altitude em cada nó e o comprimento longitudinal entre os nós.

A largura em cada trecho de rio (formado entre dois nós) foi assumida como a média entre as larguras nos nós de montante e jusante. A declividade longitudinal em cada trecho foi obtida a partir da razão entre a diferença de altitude entre os nós e o comprimento do trecho. A declividade lateral do talude (nas margens direita e esquerda) foi considerada fixa e igual a 45° em todo o trecho de rio estudado.

Quanto ao coeficiente de rugosidade de Manning, dentre as inúmeras metodologias para estimá-lo, optou-se por utilizar o método Cowan (CHOW, 1959). Esse método permite uma análise conjunta dos diversos fatores que influenciam a resistência ao escoamento, tais como material envolvido, grau de irregularidade, variação da seção transversal, efeitos de obstruções, intensidade da vegetação e grau de meandrização.

Os dados batimétricos dos reservatórios de Batalha e Serra do Facão foram fornecidos por FURNAS (2018), com informações de cota mínima (relativo ao volume morto) até a cota máxima vertente. Dentro da ferramenta AQUATOOL são inseridas apenas dez séries dos valores de cota líquida, área de inundação e volume inundado. Com isso, foram escolhidas séries aleatórias para alimentação da ferramenta.

2.2.5 Período de monitoramento

Para a realização da modelagem de qualidade da água foram utilizados os dados de outu-bro de 2014 até setembro de 2017, que corresponde ao período em que as duas usinas hidrelétricas estavam em operação, visto que a UHE Serra do Facão começou a operar em 2010 e a UHE Batalha em 2014.

2.3 Regionalização de vazão

A reduzida quantidade de postos fluviométricos existentes no Brasil, associada a uma distribuição espacial não uniforme, faz com que os profissionais da área de recursos hídricos utilizem mecanismos para estimar as séries sintéticas de vazão em regiões com ausência de dados. Dentre os mais utilizados, destaca-se o conceito de descarga específica, que representa a vazão por unidade de área da bacia hidrográfica.

As vazões difusas e pontuais dos afluentes, em todo o trecho do rio São Marcos estudado, foram estimadas pelo conceito de descarga específica utilizando as vazões turbinada, vertida e afluente nas duas centrais hidrelétricas como dados de entrada. As duas centrais hidrelétricas em cascata, localizadas ao longo dos cursos médio e baixo do rio São Marcos, mantêm o registro diário das vazões vertida, turbinada e afluente.

As Eq. (1) e (2) representam o cálculo das vazões pontuais (das sub-bacias) e difusas no trecho a montante da central hidrelétrica de Batalha, respectivamente, enquanto as Eq. (3) e (4) representam o cálculo das vazões pontuais (das sub-bacias) e difusas no trecho entre as centrais hidrelétricas de Batalha e Facão, respectivamente.

$$Q_{\text{sub-bacia1i}} = (Q_{\text{Aflu-Batalha}} / A_{\text{total 1}}) \cdot A_{\text{sub-bacia1i}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{difusa1i}} = [(Q_{\text{Aflu-Batalha}} / A_{\text{total 1}}) \cdot A_{\text{sub-bacia1i}}] / L_{\text{trecho1i}} \quad (2)$$

$$Q_{\text{sub-bacia2i}} = ((Q_{\text{Aflu-Facão}} - Q_{\text{Deflu-Batalha}}) / A_{\text{total 2}}) \cdot A_{\text{sub-bacia2i}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{difusa2i}} = [(Q_{\text{Aflu-Facão}} - Q_{\text{Deflu-Batalha}}) / A_{\text{total 2}}] \cdot A_{\text{sub-bacia1i}} / L_{\text{trecho1i}} \quad (4)$$

Nas quais: *i* corresponde a uma determinada sub-bacia; 1 é a área de contribuição ou o trecho do rio São Marcos a montante da UHE Batalha (km²); 2 é a área de contribuição ou o trecho do rio São Marcos entre as UHEs de Facão e Batalha (km²); $Q_{\text{Aflu-Batalha}}$ é a vazão afluente na UHE Batalha (hm³/mês); $Q_{\text{Deflu-Batalha}}$ é a vazão defluente na UHE Batalha (hm³/mês); $Q_{\text{Aflu-Facão}}$ é a vazão afluente na UHE Serra do Facão (hm³/mês); $Q_{\text{sub-bacia}}$ é a vazão em cada sub-bacia (hm³/mês); Q_{difusa} é a vazão em cada sub-bacia difusa (km²); A_{total} é a área total de contribuição (km²); $A_{\text{sub-bacia}}$ é a área total de contribuição de cada sub-bacia (km²); L_{trecho} é o comprimento de cada trecho (m).

2.4 Ferramenta AQUATOOL

É uma interface para edição, simulação, revisão e análise de modelo de gestão de bacias hidrográficas, em escala mensal, incluindo o módulo de quantidade de água (SIMGES) e de qualidade da água em ambientes lântico e lótico (GESCAL) (AQUATOOL, 2015).

As simulações na bacia hidrográfica do rio São Marcos iniciaram com a criação da topologia do sistema hídrico na interface da ferramenta AQUATOOL, onde os elementos do modelo foram inseridos sobre uma imagem da hidrografia da bacia. Os elementos utilizados neste estudo foram: as entradas dos tributários pontuais e difusos, as saídas referentes às demandas consuntivas de irrigação e não consuntivas para fins hidrelétricos, os retornos totais das demandas não consuntivas, os reservatórios de Batalha e Serra do Facão, as conduções (que representam os trechos) e os nós (posicionados em todas as confluências). A Fig. 3 traz a topologia do sistema hídrico da bacia do rio São Marcos criado na interface da ferramenta AQUATOOL e o diagrama unifilar.

2.4.1 Módulo SIMGES

Em escala mensal, o módulo SIMGES realiza a simulação do sistema de superfície por meio do uso de um algoritmo de otimização de rede de fluxo conservativo. O referido algoritmo é responsável por determinar a vazão no sistema, tentando satisfazer ao máximo múltiplos objetivos para minimizar déficits e a máxima adaptação às curvas de volumes alvo de reservatórios e metas de produção hidrelétrica (SALLA et al., 2014).

Para a realização do balanço hídrico no módulo SIMGES foram necessárias, como dados de entrada, as séries sintéticas de vazão para os tributários pontuais e difusos, as demandas consuntivas e não-consuntivas outorgadas e

as batimetrias dos reservatórios. Para validar o ajuste da série quantitativa simulada com a série histórica de vazão, foram utilizados o coeficiente de determinação (CD), o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e a razão da raiz do erro médio quadrático pelo desvio padrão (RSR).

2.4.2 Módulo GESCAL

A simulação de qualidade da água no módulo GESCAL é a etapa seguinte ao balanço hídrico. O módulo GESCAL permite a simulação integrada dos ambientes lótico e lântico (AQUATOOL, 2015), considerando estado estacionário e processo apenas longitudinal de advecção e dispersão (unidimensional).

De acordo com Paredes et al. (2009), independentemente do parâmetro estudado, o processo de autodepuração ao longo dos trechos de rio discretizados é representado pela equação de advecção-difusão, conforme a Eq. (5).

$$0 = \frac{d}{dx} \left(E \cdot \frac{dC}{dx} \right) - \frac{d(u \cdot C)}{dx} + \frac{(S_d + C_e \cdot q_e - C_s \cdot q_s + V \sum W_i)}{V} \quad (5)$$

Na qual: E é o coeficiente de dispersão longitudinal (m²/dia); C é a concentração de um parâmetro qualquer (mg/L); C_e é a concentração deste parâmetro no aquífero ao qual o rio está inserido (mg/L); x é a distância ao longo do trecho de rio (m); u é a velocidade média da água (m/dia); V é o volume da massa de água do trecho estudado (m³); q_e é a vazão de entrada do aquífero (m³/dia); q_s é a vazão filtrada para o aquífero (m³/dia); S_d é a carga de entrada de um parâmetro qualquer de forma difusa (mg/dia); ΣW_i representa o conjunto de processos que aumentam ou diminuem a carga de um determinado parâmetro na massa líquida. Os processos considerados foram a degradação, sedimentação, reaeração, nitrificação e ressurgimento de fundo.

O GESCAL permite modelar a qualidade da água em reservatório a partir de duas camadas estratificadas (epilímnio e hipolímnio) ou em uma única camada com mistura completa. A modelagem nos reservatórios é realizada de forma dinâmica, enquanto nos trechos do rio são consideradas as condições estacionárias. Apesar do potencial da ferramenta de adotar uma termoclina, neste estudo foi considerado como mistura completa, ou seja, não foi inserido valor da altura termoclina. Deste modo, as simulações foram realizadas considerando apenas a região de epilímnio, conforme a Eq. (6).

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} + C_1 \frac{dV_1}{dt} = Q_{1e}C_e - Q_{1s}C_1 + V_1 \sum W_i \quad (6)$$

Na qual: o subscrito 1 representa o epilímnio (mistura completa); V_1 é o volume do epilímnio (m^3); C_1 é a concentração do epilímnio (mg/L); t é a variável de tempo (dia); Q_{1e} é a entrada de fluxo no intervalo de tempo (m^3/dia); Q_{1s} é a saída no intervalo de tempo (m^3/dia); W_i é o conjunto de processos de degradação, sedimentação, reação, nitrificação e ressurgimento de fundo.

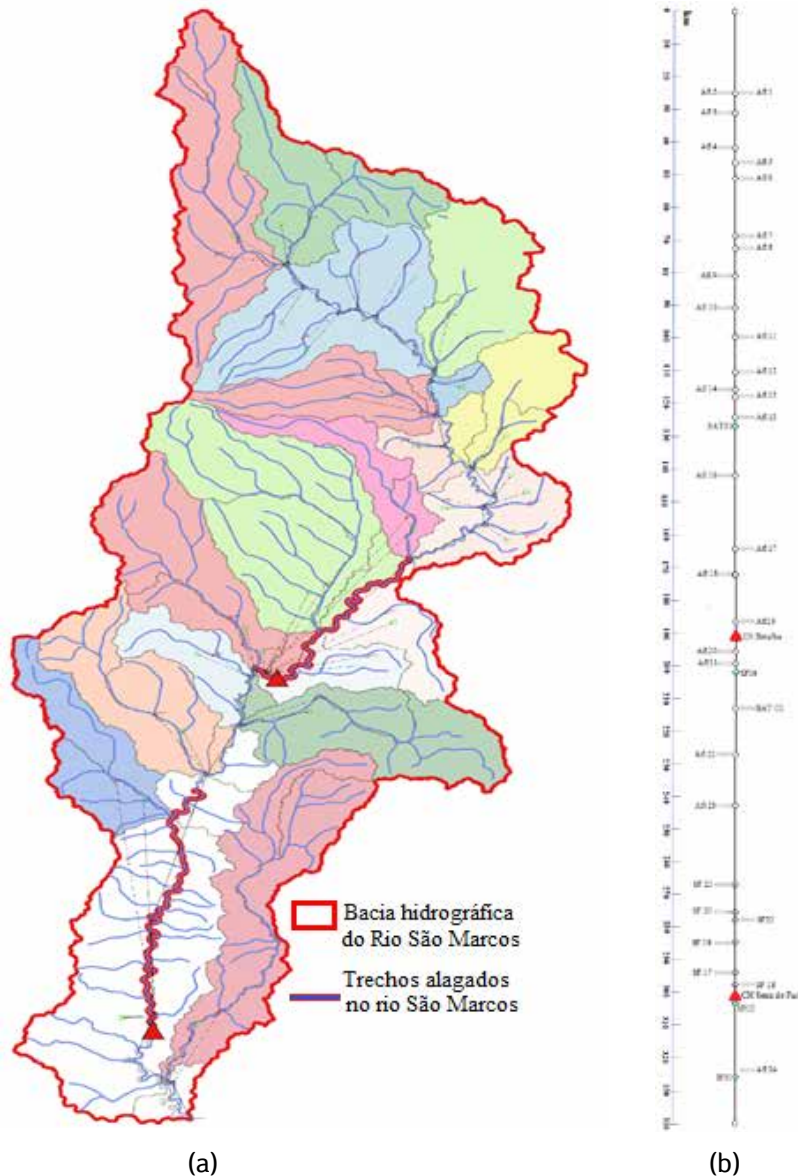


Figura 3 - (a) Topologia do sistema hídrico; (b) Diagrama unifilar

Os processos físicos e bioquímicos W_i , inseridos nas Eq. (5) e (6), são representados nas Eq. (7) até (12) para todos os parâmetros de qualidade da água analisados.

$$\begin{aligned} \sum W_{OD} = & K_a \theta_a^{T-20} (O_{sat} - O) - K_d \theta_d^{T-20} L - r_a \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{n1/2}} \right) N_a + \\ & + r_{ocresc} \cdot \left[K_{g \max} \theta_g^{T-20} \cdot \text{Min} \left(\frac{N}{N + K_{NF1/2}}; \frac{P}{P + K_{P1/2}} \right) \right] A - r_{oresp} K_{resp} \theta_{resp}^{T-20} A \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sum W_{DBO} = K_d \theta_d^{T-20} \frac{O}{O + K_{d1/2}} L - \frac{VSL}{h} L \quad (8)$$

$$\sum W_{NO} = -K_{Noa} \theta_{Noa}^{T-20} N_o - \frac{VS_{NO}}{h} N_o + r_{na} K_{resp} \theta_{resp}^{T-20} A \quad (9)$$

$$\sum W_{amônia} = K_{Noa} \theta_{Noa}^{T-20} N_o - \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{n1/2}} \right) N_a - r_{na} F_n K'_g A \quad (10)$$

$$\sum W_{nitrito} = \left(K_{Nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + K_{nai1/2}} \right) N_a - \left(K_{no3} \theta_{no3}^{T-20} \frac{K_{no31/2}}{O + K_{no31/2}} \right) N_{o3} - r_{na} (1 - F_n) K'_g A \quad (11)$$

$$\sum W_{fósforo} = -K_p \theta_{mp}^{T-20} P_{or} + f_p r_{pa} k_{resp} \theta_{resp}^{T-20} A - \frac{VSP}{h} P_{or} \quad (12)$$

Nas quais: O é a concentração de oxigênio dissolvido no rio (mg/L); O_{sat} é a concentração de saturação do oxigênio dissolvido (mg/L); K_a é a constante de reaeração (dia^{-1}); θ_a é o fator de correção da temperatura para a reaeração; r_a representa o consumo do oxigênio por oxidação da amônia (mgO/mgN); r_{ocresc} representa o oxigênio produzido pelo crescimento das algas; r_{oresp} representa o oxigênio consumido pela respiração das algas; $k_{g \max}$ é a constante máxima de crescimento das algas; P é a concentração de fósforo total (mg/L); N é a concentração de nitrogênio total (mg/L); θ_g é o fator de correção da

temperatura para o crescimento das algas; θ_{resp} é o fator de correção da temperatura na fase de respiração das algas; $K_{NF1/2}$ é a constante de semi-saturação do nitrogênio total; $K_{p1/2}$ é a constante de semi-saturação do fósforo total; L é a concentração de matéria orgânica no rio (mg/L); K_d é a constante de desoxigenação a 20°C (dia^{-1}); θ_d é a constante de correção da temperatura da constante K_d ; VSL é a velocidade de sedimentação (m/dia); h é o nível líquido (m); T é a temperatura da massa de água (°C); $K_{d1/2}$ é a constante de semi-desoxigenação a 20°C (dia^{-1}); K_{Noa} é a constante de amonificação (dia^{-1}); θ_{Noa} é o coe-

ficiente de correção da constante anterior para a temperatura a 20°C; N_o é a concentração do nitrogênio orgânico no rio (mg/L); VS_{NO} é a velocidade de sedimentação do nitrogênio orgânico (m/dia); r_{na} é a concentração de nitrogênio presente nas algas (mgN/mgA); K_{resp} é a constante de respiração para o fitoplâncton (T^{-1}); θ_{resp} é o coeficiente de correção da constante de velocidade para a temperatura; A é a concentração das algas no rio (mg/L); N_a é a concentração de amônia, NH_4^+ , no rio (mg/L); K_{Nai} é a constante de nitrificação de amônia para nitritos (dia^{-1}); θ_{nai} é o coeficiente de correção de temperatura da constante de nitrificação; $K_{n1/2}$ é a constante de semi-saturação do nitrogênio (mg/L); F_n representa o fator de preferência por amônia em relação aos nitratos; r_{na} é o coeficiente estequiométrico (mgN/mgA); K'_g é a constante de crescimento de fitoplâncton, considerando o fator de correção de temperatura, limitação de nutrientes e atenuação da luz (dia^{-1}); N_{O3} é a concentração de nitrato (mg/L); K_{no3} representa a constante de desnitrificação (dia^{-1}); θ_{no3} é o fator de correção de temperatura para a constante de desnitrificação; $K_{no31/2}$ é a constante de semi-saturação considerando que a desnitrificação só ocorre em condições anóxicas (mg/L); Por é a concentração de fósforo orgânico (mg/L); K_p é a constante de mineralização do fósforo orgânico (dia^{-1}); θ_{mp} é o coeficiente de correção da temperatura da constante de mineralização; r_{pa} é o coeficiente estequiométrico (mgP/mgA); VS_p é a velocidade de sedimentação do fósforo orgânico (m/dia); f_p é a fração do fósforo orgânico que é gerada na respiração do fitoplancton.

2.5 Calibração dos coeficientes e análise de sensibilidade

2.5.1 Calibração dos coeficientes

A calibração dos principais coeficientes de reações bioquímica e de sedimentação foi realizada

pelo método de tentativa e erro. Nesse processo, os diversos parâmetros de qualidade simulados foram ajustados aos dados de qualidade monitorados nos postos BAT01, SF06, SF02 e SF01 (ver a localização na Fig. 2a).

2.5.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade teve a função de identificar os coeficientes e parâmetros mais sensíveis dentro do processo de autodepuração. Neste estudo, a identificação da sensibilidade foi obtida a partir das porcentagens de variação dos parâmetros nos postos BAT01, SF01, SF02 e SF06, comparando o perfil simulado com o perfil calibrado.

Na análise de sensibilidade dos coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação foi utilizado o método fatorial para +10% e -10% dos valores calibrados. De acordo com Loucks et al. (2005), na análise de dois níveis são realizadas 2ⁿ simulações diferentes, na qual n é o número de coeficientes analisados.

Cada parâmetro nos tributários pontuais e difusos não monitorados também sofreu variação pelo método individualizado e simultâneo. Foram variados +100% dos valores inicialmente estimados dos parâmetros DBO, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato e fósforo total e -80% dos valores inicialmente calibrados de OD.

2.6 Cenário crítico

Foi considerado como cenário crítico a situação em que o rio São Marcos apresenta concentração limite para amônia (3,7 mg/L em ambientes lântico e lótico), nitrato (10 mg/L em ambientes lântico e lótico) e fósforo total (0,030 mg/L em ambiente lântico e 0,1 mg/L em ambiente lótico), de acordo com a Resolução CONAMA 357 -

classe 2 (BRASIL, 2005). Para isso, desde a cabeceira até as proximidades do exutório, foram estimadas as cargas máximas de amônia, nitrato e fósforo total por sub-bacia afluyente ao rio São Marcos (em ton/km².mês).

É importante salientar que, neste cenário, não foi considerada a capacidade de autodepuração dos tributários ao rio São Marcos, o que traz maior segurança aos resultados alcançados.

3 RESULTADOS

3.1 Dados de entrada

3.1.1 Dados fluviométricos

Conforme já mencionado anteriormente, as vazões difusas e pontuais dos tributários em todo o trecho do rio São Marcos foram estimadas pelo conceito de descarga específica, utilizando as vazões turbinada, vertida e afluyente nas duas centrais hidrelétricas como dados de entrada. A Tabela 2 mostra as séries sintéticas de vazão para as sub-bacias pontuais e difusas.

Tabela 2 - Séries sintéticas de vazão para as sub-bacias SB (em hm³/mês)

SB 1	SB 2	SB 3	SB 4	SB 5	SB 6	SB 7
2,8 - 49,2	7,9 - 66,9	0,5 - 18,0	0,5 - 18,0	0,4 - 14,6	0,4 - 14,7	21,8 - 59,8
15,8 ± 12,0	24,4 ± 15,3	5,4 ± 4,5	5,4 ± 4,5	4,1 ± 3,8	4,1 ± 3,8	31,7 ± 10,1
SB 8	SB 9	SB 10	SB 11	SB 12	SB 13	SB 14
0,3 - 4,9	3,7 - 32,7	0,3 - 8,7	3,6 - 31,7	0,7 - 7,5	0,7 - 7,5	0,3 - 5,3
1,5 ± 1,2	11,2 ± 7,7	2,5 ± 2,3	10,8 ± 7,5	2,5 ± 1,8	2,5 ± 1,8	1,5 ± 1,3
SB 15	SB 16	SB 17	SB 18	SB 19	SB 20	SB 21
0,7 - 7,5	1,9 - 23,8	1,2 - 20,4	9,3 - 92,0	0,4 - 13,9	6,2 - 40,3	0,9 - 13,7
2,5 ± 1,8	7,6 ± 5,8	6,2 ± 5,1	30,7 ± 22,0	3,9 ± 3,6	15,7 ± 8,9	4,5 ± 3,4
SB 22	SB 23	SB 24	SB 25	Difusas 1, 2 e 3		
1,4 - 33,2	5,0 - 34,2	2,6 - 23,9	4,2 - 47,4	3,1 - 82,1		
10,3 ± 8,3	13,2 ± 7,7	8,6 ± 5,6	16,3 ± 11,3	25,1 ± 20,8		

Mínimo - Máximo
Média ± Desvio padrão

3.1.2 Dados de qualidade da água e climatológicos

Os dados de qualidade da água monitorados nos afluentes e ao longo do rio São Marcos estão ilustrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados de qualidade da água monitorados nos afluentes e ao longo do rio São Marcos

Posto	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	NO (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
SF01	5,1 - 7,9	0,1 - 18,4	- -	0,03 - 0,91	0,01 - 0,60	0,03 - 0,43
SF02	5,3 - 8,4	0,1 - 4,8	- -	0,03 - 0,93	0,01 - 0,61	0,02 - 0,32
SF06	4,3 - 8,7	0,1 - 2,9	- -	0,07 - 1,26	0,10 - 0,60	0,003 - 1,23
SF17	4,2 - 8,0	0,5 - 4,0	- -	0,07 - 1,26	0,10 - 0,80	0,003 - 0,24
SF18	5,0 - 8,6	0,1 - 5,5	- -	0,03 - 0,84	0,01 - 0,50	0,003 - 0,16
SF19	4,9 - 8,2	1,0 - 3,3	- -	0,06 - 0,82	0,10 - 0,73	0,003 - 8,54
SF20	4,3 - 8,4	0,7 - 5,1	- -	0,06 - 4,25	0,10 - 1,40	0,003 - 0,65
SF21	5,1 - 8,4	0,1 - 2,6	- -	0,08 - 0,70	0,01 - 0,50	0,003 - 1,86
SF22	4,7 - 8,5	0,3 - 3,6	- -	0,03 - 0,57	0,01 - 0,60	0,003 - 0,66
BAT01	5,0 - 7,6	2,0 - 2,0	0,10 - 0,55	0,10 - 0,24	0,10 - 0,29	0,02 - 0,11
BAT02	7,1 - 8,7	2,0 - 2,0	0,10 - 0,48	0,10 - 0,18	0,10 - 0,31	0,02 - 0,20

Mínimo - Máximo

Como já descrito anteriormente, a qualidade da água para os tributários não monitorados foi assumida dentro do padrão de qualidade do rio classe 2, de acordo com o CONAMA 375 (BRASIL, 2005). Nesse contexto, a DBO adotada foi de 2 mg/L (inferior ao limite de 5 mg/L), OD adotado foi de 5 mg/L (similar ao limite mínimo), nitrogênio orgânico foi de 0,1 mg/L (recomendação de Von Sperling, 2014), amônia adotada foi de 0,1 mg/L (inferior ao limite de 3,7 mg/L) e nitrato adotado foi de 0,2 mg/L (inferior ao limite de 10 mg/L). A Fig. 4 traz as curvas mensais de tempe-

ratura assumidas nos postos de monitoramento BAT01, SF01, SF02 e SF06, além da curva de evaporação assumida para os reservatórios de Batalha e Serra do Facão. Em função da ausência de dados de evaporação nos reservatórios, foi assumida a série temporal obtida por Curtarelli et al. (2013) para o reservatório de Itumbiara/GO no rio Paranaíba, cujo barramento fica aproximadamente 152 km a jusante da confluência do rio São Marcos com o rio Paranaíba.

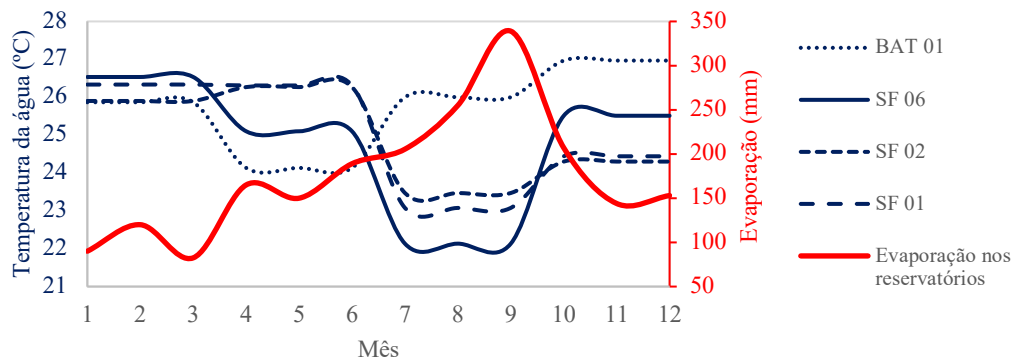


Figura 4 – Curvas mensais de temperatura da água e evaporação nos reservatórios

3.1.3 Demandas consuntivas e não consuntivas outorgadas

A Tabela 4 apresenta as demandas totais outorgadas por sub-bacia.

As outorgas subterrâneas praticamente se equiparam às superficiais, tanto em volume como em quantidade. Apesar de sua importância, as outorgas subterrâneas foram desconsideradas, visto que o foco de estudo foi o escoamento superficial.

Tabela 4 - Demandas outorgadas por sub-bacia

Sub-bacia	Demanda (m³/s)	Sub-bacia	Demanda (m³/s)	Sub-bacia	Demanda (m³/s)	Sub-bacia	Demanda (m³/s)
SUB-1	1,09	SUB-8	0,07	SUB-15	0,19	SUB-22	0,25
SUB-2	3,06	SUB-9	1,11	SUB-16	0,1	SUB-23	1,66
SUB-3	0,2	SUB-10	0	SUB-17	0,24	SUB-24	0,81
SUB-4	0,2	SUB-11	1,04	SUB-18	2,62	SUB-25	1,22
SUB-5	0	SUB-12	0,19	SUB-19	0	Difusa	0,42
SUB-6	0	SUB-13	0,19	SUB-20	2,08		
SUB-7	7,99	SUB-14	0,04	SUB-21	0,23		

3.1.4 Dados hidráulicos e batimétricos

De acordo com o método de Cowan aplicado, o coeficiente de rugosidade resultou em 0,04875. Esse valor está próximo da estimativa para cerrado, igual a 0,05, além de estar no intervalo estabelecido para canais naturais de grande porte, em que o mínimo é 0,035 e o máximo é 0,100 (CHOW, 1959). De acordo com o método de Cowan, foram assumidas as seguintes características ao longo do rio São Marcos: possibilidade de

assoreamento, reduzido grau de irregularidade ou erosão, variações ocasionais de irregularidade nas seções transversais, obstrução nula no curso de água (com exceção aos barramentos para fins hidrelétricos), desprezível influência da vegetação no escoamento e grau de meandrização severo.

A Tabela 5 traz os valores levantados em cada nó e trecho. O diagrama unifilar da Fig. 3b auxilia na identificação de cada nó e trecho (entre nós).

Tabela 5 – Características geométricas levantadas

Nó	Distância (m)	Cota (m)	B (m)	Bmédio (m)	Nó	Distância (m)	Cota (m)	B (m)	Bmédio (m)
1	36210	840,64	23,67	22,45	13	162544	798,27	149,84	506,59
2	45384	832,71	21,23	26,71	14	188293	790,65	863,33	459,91
3	61959	834,24	32,19	38,27	15	238183	791,57	56,49	53,98
4	63247	848,87	44,35	47,12	16	239792	779,07	51,47	57,21
5	70006	839,72	49,88	95,32	17	243011	774,19	62,95	70,38
6	97687	835,46	140,75	207,51	18	262323	777,54	77,81	65,45
7	100423	852,83	274,27	181,45	19	281635	773,28	53,08	1066,87
8	111045	813,82	88,63	97,45	20	349228	704,09	2080,65	1097,94
9	122954	819,00	106,27	103,23	21	354056	720,55	115,22	149,76
10	134380	839,11	100,18	69,14	22	381415	667,51	184,30	125,12
11	147094	818,39	38,10	52,78	Nó Final	399117	647,70	65,94	
12	151761	808,02	67,45	108,65					

3.2 Balanço hídrico

A fim de avaliar os resultados do balanço hídrico, a Fig. 5 faz uma comparação entre as vazões simuladas e monitoradas a jusante das barragens de Batalha e Serra do Facão (representada como vazão defluente na Fig. 5). Como vazão monitorada a jusante de cada reservatório (vazão defluente), foi considerada a soma das vazões vertente e turbinada.

Uma visão geral na Fig. 5 mostra um bom ajuste entre o simulado e monitorado. O coeficiente

NSE para Batalha foi de 0,84 e Serra do Facão 0,98, enquanto o coeficiente de determinação para Batalha foi de 0,89 e Serra do Facão 0,99, que corresponde a uma combinação muito boa entre as vazões simulada e monitorada. Outro coeficiente que confirma a eficácia desse balanço hídrico é o RSR, já que o valor para Batalha foi de 0,40 e para Serra do Facão 0,16, ambos dentro do intervalo definido como muito bom, sendo o ajuste de Serra do Facão mais satisfatório do que Batalha.

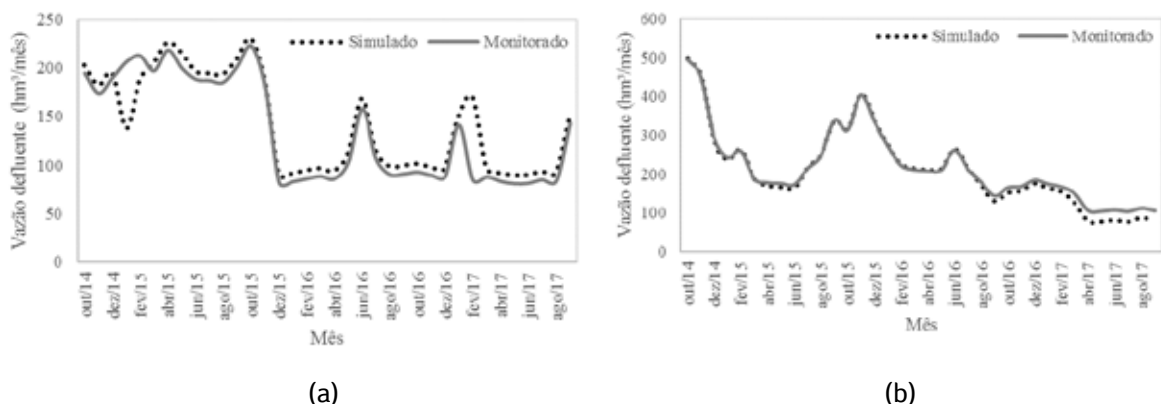


Figura 5 – Comparação entre as vazões simuladas e monitoradas a jusante das barragens: (a) Batalha e (b) Serra do Facão

3.3 Calibração do modelo de qualidade da água

Os perfis temporais simulados dos parâmetros OD, DBO, NO, amônia, nitrato e fósforo total foram ajustados aos dados de qualidade monitorados nos pontos de monitoramento BAT01, SF01, SF02 e SF06. A Fig. 6 traz uma comparação entre perfis simulados e dados monitorados no posto SF-01.

Na Fig. 6 observa-se que houve ajuste entre o calibrado e o monitorado no posto SF01. Ajustes similares foram observados nos postos BAT-01, SF-02 e SF-06. A boa qualidade da água no rio São Marcos impossibilitou um melhor ajuste dos perfis. A Tabela 6 traz os valores dos coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação calibrados.

Tabela 6 – Coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação calibrados

Trecho do rio	k_a (1/dia)	k_d (1/dia)	VS_L (1/dia)	Kn_{oa} (1/dia)	Vs_{no} (m/d)	K_{no} (1/d)	K_{nai} (1/dia)	K_p (1/dia)	VS_p (m/dia)
Cabeceira-BAT01	0,4	0,02	0,01	0,02	0,001	0,001	0,01	0,01	0,001
BAT01-SF06	0,1	0,02	0,01	0,02	0,001	0,001	0,01	0,01	0,001
SF06-SF02	0,1	0,02	0,01	0,02	0,001	0,001	0,01	0,01	0,001
SF02-SF01	0,8	0,02	0,01	0,02	0,001	0,001	0,01	0,01	0,001

Paredes et al. (2010) e Salla et al. (2014) utilizaram coeficientes próximos aos calibrados neste estudo para cursos de água similares quanto à disponibilidade hídrica e qualidade da água. Todavia, quando existem lançamentos pontuais em ambiente lótico de cargas poluidoras de origem sanitário, os coeficientes bioquímicos se elevam. Como exemplo, Kannel et al. (2007), em uma modelagem de autodepuração no rio Bagmati (Nepal), alcançaram valores máximos de 4,2 dia⁻¹ para k_d , 10 dia⁻¹ para kN_{ai} e 0,7 dia⁻¹ para k_p . Em dois estudos no Triângulo Mineiro, Salla et al.

(2013) alcançaram valores máximos de 0,22 dia⁻¹ para k_d , 0,4 dia⁻¹ para kN_{oa} e 0,1 dia⁻¹ para k_{Nai} no rio Jordão, enquanto Salla et al. (2016) alcançaram valores máximos de 0,8 dia⁻¹ para k_d , 0,9 dia⁻¹ para k_{Nai} e 0,8 dia⁻¹ para k_p no rio Uberabinha.

O coeficiente de reaeração natural k_a tem relação direta com as características hidráulicas no ambiente hídrico. Em ambiente lótico, a influência da turbulência de superfície prevalece, influenciada pela vazão associada à declividade de fundo, seção transversal e rugosidade de fundo e paredes laterais. Já em ambiente lêntico, em escala redu-

zida de reaeração em comparação ao ambiente lótico, a área superficial governa a transferência de massa global na interface ar/água. Nesse contexto, Salla et al. (2014) alcançaram valores de k_a

entre 0,1 a 2,3 dia^{-1} em uma bacia hidrográfica com quatro reservatórios de acumulação para fins hidrelétricos em cascata, valores estes próximos a 0,1 a 0,8 dia^{-1} obtidos neste estudo.

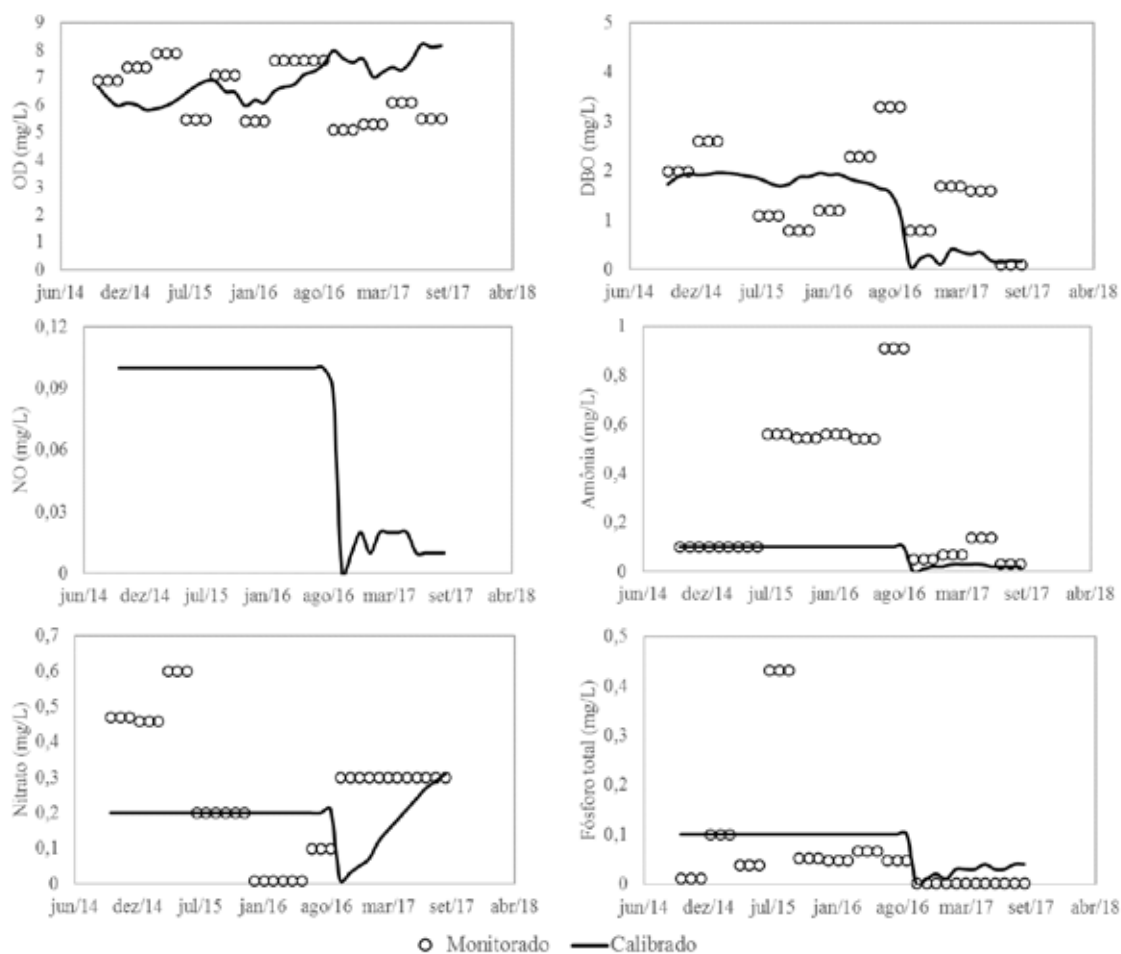


Figura 6 – Comparação entre perfis simulados e dados monitorados no posto SF-01

Todavia, outros trabalhos com características hidráulicas diferentes da bacia hidrográfica do rio São Marcos alcançaram valores de k_a maiores. Simulações da capacidade de autodepuração nos rios Uberaba (afluente do rio Grande em sua margem direita) e Jordão (afluente do rio Paranaíba em sua margem esquerda) chegaram a valores máximos de k_a iguais a 4,0 dia^{-1} e 6,4 dia^{-1} , respectivamente (Salla et al., 2013 e 2014).

3.4 Análise de sensibilidade

3.4.1 Coeficientes de reações bioquímicas

Os coeficientes k_a , k_d , VS_L e Kn_{ai} apresentaram maior influência nos perfis simulados dos parâmetros de qualidade OD, DBO, amônia e nitrato. Os parâmetros nitrogênio orgânico e fósforo total não foram analisados pois, de acordo com as Eq. (7) até (12), a variação dos coeficientes k_a , k_d ,

VS_L e Kn_{ai} não interfere nestes parâmetros. A Fig. 7 representa as porcentagens de variação temporal para os parâmetros OD, DBO, amônia e nitrato junto ao posto de monitoramento SF-01.

A análise geral da Fig. 7 mostrou que as variações de +10% e -10% dos coeficientes k_a , k_d , VS_L e Kn_{ai} geraram:

- Reduzida sensibilidade no perfil de OD calibrado de $\pm 1,5\%$ para a maioria das séries fatoriais (ver Fig. 7a). Não ficou nítida a maior % de variação de OD em função da maior turbulência de superfície nos períodos chuvosos (entre outubro e março). Resultados similares foram obtidos por Salla et al. (2014);

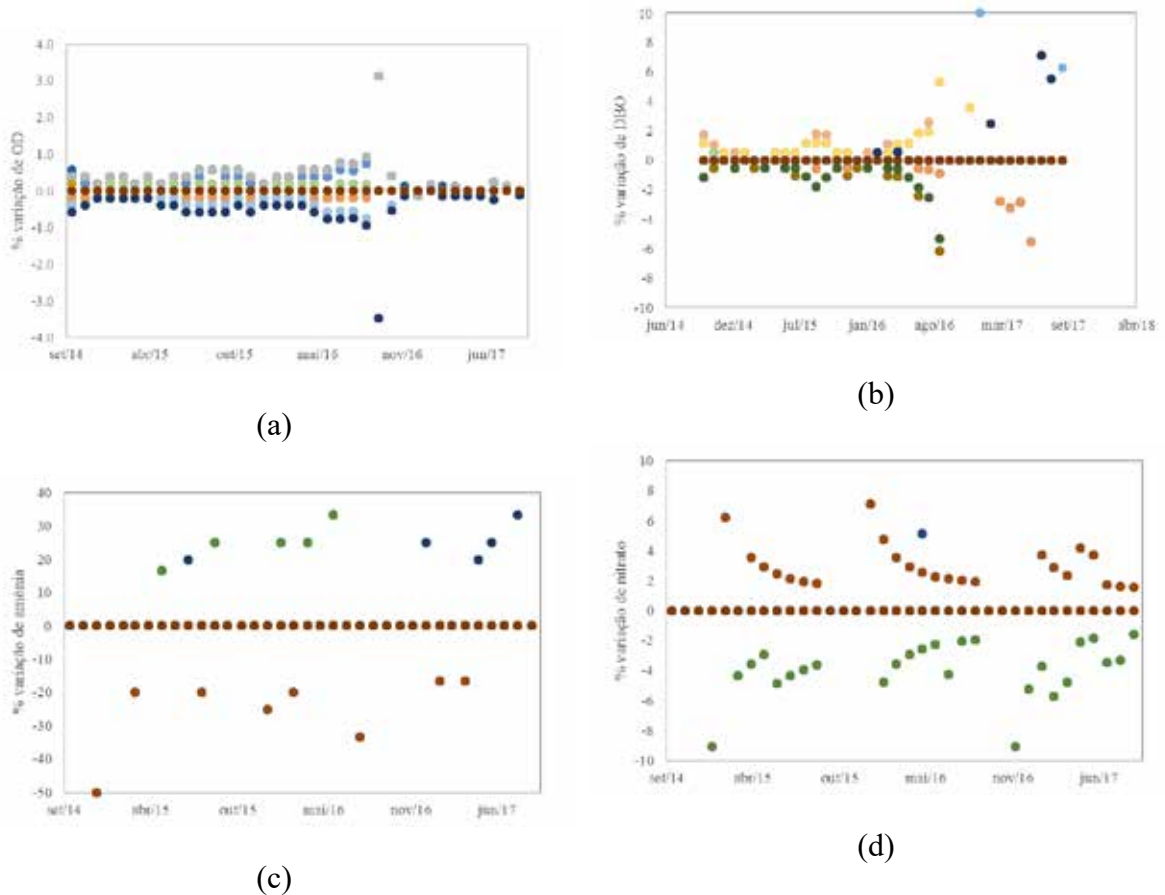


Figura 7 – % de variação temporal após as análises de sensibilidade junto ao posto de monitoramento SF-01: (a) OD; (b) DBO; (c) Amônia; (d) Nitrato

- Sensibilidade no perfil de DBO calibrado de $\pm 5,0\%$ para a maioria das séries fatoriais, com máxima de 16,7% e mínima de -6,2% em SF01 (ver Fig. 7b). Foi constatada a influência do período seco (abril a setembro) na maior % de variação de DBO, em função do impacto que a sedi-

mentação de particulado com matéria orgânica carbonácea adsorvida exerce neste período do ano. Esse impacto é agravado pelo extenso alcance do remanso dos reservatórios sobre o rio São Marcos. Resultados similares foram obtidos por Salla et al. (2014);

- A variação $\pm 10\%$ de Kn_{ai} impactou por mais meses o parâmetro nitrato do que amônia (ver as Fig. 7c e 7d). Foi observada sensibilidade oscilatória e em poucas séries fatoriais para a amônia calibrada, com valores limites de $\pm 33\%$ em SF01 (ver Fig. 7c). Já o nitrato calibrado apresentou sensibilidade em maior número de séries fatoriais, com máxima de 7,1% e mínima de -11,0% em SF01 (ver Fig. 7d). Não foi constatada a influência de período seco ou chuvoso na % de variação de amônia e nitrato.

3.4.2 Parâmetros de qualidade dos tributários sem monitoramento

Focando-se do posto de monitoramento SF-01, a variação dos parâmetros, de forma simultânea, em todos os tributários não monitorados mostrou que: +100% no valor do parâmetro DBO ocasionou o aumento de até 97,3% para DBO e diminuição de apenas 1% de OD, sem interferências significativas na série de nitrogênio; +100% no valor do parâmetro nitrogênio orgânico ocasionou o aumento de até 98,2% para nitrogênio orgânico, até 33,8% para amônia e 30,2% para nitrato, sem interferência significativa em OD; +100% no valor do parâmetro amônia ocasionou o aumento de até 98,9% para amônia e até 27,6% para nitrato, sem interferência significativa em OD; +100% no valor do parâmetro nitrato ocasionou o aumento de até 99,2% para amônia, sem interferência significativa em OD; +100% no valor do parâmetro fósforo total ocasionou o aumento de até 93,9% para o fósforo total; -80% no valor do parâmetro OD ocasionou uma redução de até 20,9% para OD e aumento de até 63,8% para DBO, sem interferências significativas na série de nitrogênio. Essa análise de sensibilidade demonstra a importância do frequente monitoramento de qualidade da água em cursos de água, como subsídio para adequada calibração de modelo.

3.5 Cenário crítico

A Fig. 8 traz a carga máxima no mês mais crítico em cada sub-bacia (em ton/km².mês) para os parâmetros amônia, nitrato e fósforo total. Nesse contexto, manteve-se, ao longo de todo o rio São Marcos, a concentração limite para os parâmetros de acordo com a resolução CONAMA 357 - classe 2 (BRASIL, 2005).

Uma visão geral da Fig. 8 mostra a nítida influência do volume de reservação na definição das cargas máximas de amônia, nitrato e fósforo total afluentes ao rio São Marcos. No reservatório de Batalha, em função do menor volume em comparação à Serra do Facão, observaram-se as reduzidas cargas máximas afluentes para as sub-bacias que confluem diretamente com a área represada (0,027 a 0,029 ton/km².mês para amônia, 0,088 a 0,095 ton/km².mês para nitrato e 2,04 a 2,09 kg/km².mês para fósforo total nas sub-bacias 16, 17, 18 e 22 – ver a localização das sub-bacias na Fig. 2), enquanto nas sub-bacias confluentes ao reservatório de Serra do Facão a carga máxima foi maior (0,175 a 0,199 ton/km².mês para amônia, 0,413 a 0,538 ton/km².mês para nitrato e 2,38 a 3,23 kg/km².mês para fósforo total). Em função do processo de autodepuração do rio São Marcos em seus trechos lóticos, foram alcançadas cargas máximas superiores para as sub-bacias nessas regiões (0,250 a 0,383 ton/km².mês para amônia, 0,348 a 1,031 ton/km².mês para nitrato e 2,03 a 5,18 kg/km².mês para fósforo total).

A capacidade máxima de aporte ao reservatório de Batalha foi de 4,19, 9,18 e 0,055 ton/km².mês, respectivamente, para os parâmetros amônia, nitrato e fósforo total, enquanto no reservatório de Serra do Facão, na região entre os dois reservatórios, a capacidade máxima de aporte foi de 1,30, 3,34 e 0,019 ton/km².mês.

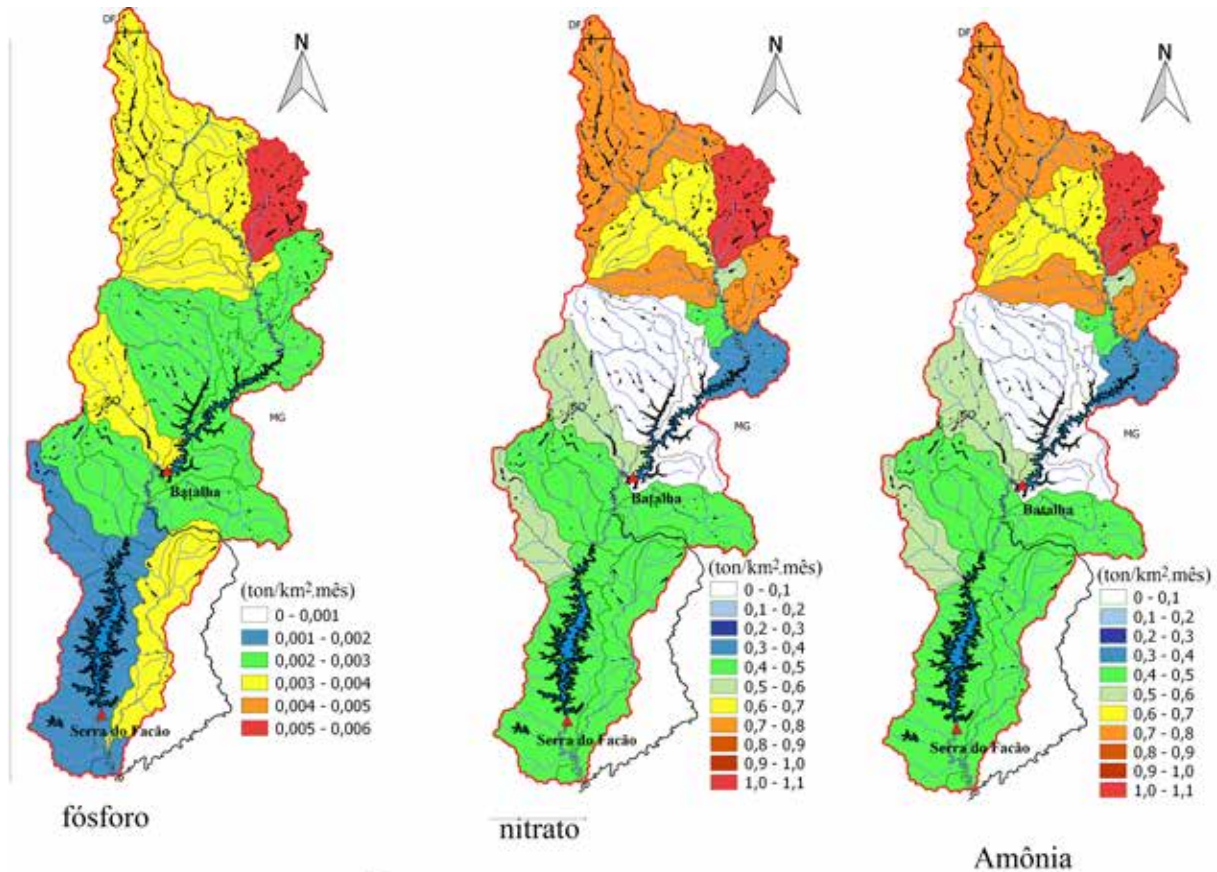


Figura 8 – Carga máxima em cada sub-bacia (em ton/km².mês): (a) amônia; (b) nitrato; (c) fósforo total

4 CONCLUSÕES

As análises estatísticas revelaram índices de performance muito bons para o balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio São Marcos, utilizando a vazão defluente dos reservatórios de Batalha e Serra do Facão como base de análise. A boa performance no balanço hídrico foi muito importante na avaliação da capacidade de autodepuração neste curso de água.

A boa qualidade da água no rio São Marcos, comprovada pelos limites definidos na Resolução CONAMA 357, facilitaram o processo de calibração dos coeficientes bioquímicos e de sedimentação, alcançando valores baixos e similares aos obtidos em outras bacias hidrográficas com características quantitativas e qualitativas próximas. As porcentagens de variação de OD, DBO, amônia e nitrato para os coeficientes mais sen-

síveis k_a , k_d , VS_L e kn_{ai} permitiram concluir que: a turbulência de superfície prevalece sobre a área superficial alagada na capacidade de transferência de massa de OD na interface ar/líquido; as vazões reduzidas no período seco, associado ao extenso trecho de remanso, impactaram na sedimentação de particulado com matéria orgânica carbonácea e nitrogenada adsorvida.

As análises de sensibilidade dos parâmetros de qualidade dos tributários mostraram considerável influência na qualidade de água no rio São Marcos, enfatizando a importância do frequente monitoramento por parte dos gestores da bacia.

O estudo do cenário de carga máxima de amônia, nitrato e fósforo total mostrou a influência do volume de reservação na estimativa dessas cargas, principalmente nos tributários que afluem

diretamente na área represada. A capacidade de autodepuração do ambiente lótico também permitiu maiores cargas nessas regiões.

De uma forma geral, a dinâmica operacional na ferramenta AQUATOOL facilitou a realização deste estudo, cuja topologia do sistema hídrico já implementada, associada à calibração do modelo de qualidade da água, permitirá futuros estudos relacionados à influência de diferentes culturas no uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio São Marcos.

5 REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Componente da série de relatórios sobre o Estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil**. Brasília: ANA, jan, 62p, 2007. Disponível: < <http://arquivos.ana.gov.br/wfa/sa/GEO%20Brasil%20Recursos%20H%C3%ADricos%20-%20Resumo%20Executivo.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Resolução nº 562/2010**, de 25 de outubro de 2010. 2010a. Disponível: < <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/marcos-regulatorios/562-2010.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Resolução nº 564/2010**, de 25 de outubro de 2010. 2010b. Disponível: < <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2010/564-2010.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Subsídios para a discussão da compatibilização da geração de energia hidrelétrica com expansão da agricultura irrigada na bacia do rio São Marcos: Irrigação e geração de energia hidrelétrica na Bacia do rio São Marcos**. Brasília, 68 p. jan. 2014. Disponível: < [file:///C:/Users/Marcio/Downloads/UsosMultiplosdaAguanabaciadoRioSaoMarcos%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Marcio/Downloads/UsosMultiplosdaAguanabaciadoRioSaoMarcos%20(1).pdf)>. Acesso em: 21 mar. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras**. Brasília: 163 p. Edição Especial., 2015. Disponível: < <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>>. Acesso em: 19 mar. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **TDR para contratação de empresa para prestação de serviços técnicos de apoio à gestão de recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do rio São Marcos a montante da UHE Batalha**. Brasília, 43 p. abr. 2017.
- AQUATOOL. **Manual de Usuario Versión 1.0**. 2015. Disponível em: < www.upv.es/aquatool/>. Acesso em: 20 março 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA LIMPA. ABRAGEL. **Definição de prioridades de outorga de direitos de uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Marcos a montante da UHE Batalha**. Goiânia: ABRAGEL, ago. 2016. 16p. Disponível em: < <https://www.abragel.org.br/>>. Acesso em: 5 jul. 2018.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Disponível: < www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 20 jan. 2016.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Governo do Estado de Goiás – Secretaria do Planejamento e do Desenvolvimento; Prefeitura Municipal de Cristalina. **Plano Diretor do Município de Cristalina – GO: Relatório Final Consolidado**. Cristalina: CGA/ Interplan, p.179, 2003.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 357**, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2005.
- BRASIL. Controladoria Geral da União. **Relatório de Auditoria Especial nº 00190.001631/2011-17, em Furnas Centrais Elétricas S/A**. Brasília: CGU, p. 107, 2011. Disponível em: < <file:///C:/Users/Marcio/Downloads/RelatorioViabilidadeFurnas-CGU.pdf>>. Acesso em: 20 março 2016.
- CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. McGraw-Hill International Book Company, 1959.
- CURTARELLI, M. P.; ALCÂNTARA, E. H.; ARAÚJO, C.A.S.; STECH, J. L.; LORENZ-ZETTI, J.A. Avaliação da dinâmica temporal da evaporação no reservatório de Itumbiara, GO, utilizando dados obtidos por sensoriamento remoto. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n.1, p. 01-18, 2013.
- FURNAS. **Sistema Furnas de geração e transmissão: Parque Gerador**. 2018. Disponível em: < <http://www.furnas.com.br/>>. Acesso em: 5 nov. 2018.
- INSTITUTO DE GESTÃO DAS ÁGUAS MINEIRAS – IGAM. 2017. **Monitoramento da qualidade das águas**. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2>. Acesso em: 15 fev. 2018.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. 2017. **Precipitação total anual válida para 2017**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual>. Acesso em: 15 fev. 2018.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAIS - INPE. **TOPODATA: Banco de dados geomorfométricos do Brasil**. 2017. Disponível em: < <http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

KANNEL, P. R.; LEE, S.; LEE, Y. S.; KANEL, S. R.; PELLETIER, G. J. Application of au-tomated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. **Ecological Modelling**, v. 20, n.2, p 503-517, 2007.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E.; STEDINGER, J. R.; DIJKMAN, J. P.M.; VILLARS, M. T. **Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications**. UNESCO, Paris, ISBN:92-3-103998-9, 2005.

PAREDES-ARQUIOLA, J.; ÁLVAREZ, J. A.; MONERRIS, M. M.; SOLERA, A. Water quantity and quality models applied to the Jucar river basin, Spain. **Journal of water resources planning and management**, v. 24, n. 11, p. 2759-2779, 2010.

PAREDES-ARQUIOLA, J.; ÁLVAREZ, J.A.; SOLERA, A. **Modelo GES-CAL para la simulación de la calidad del agua en sistemas de recursos hídricos. Manual de usuario**. Versión 1.0. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2009. Disponível em: <<https://www.upv.es/aquatool/files/manuales/ManualGescal.pdf>>.

SALLA, M. R.; PEREIRA, C. E.; FILHO, J. E. A.; PAULA, L. M.; PINHEIRO, A. M. Estudo da autodepuração do rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do rio Dourados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 105-114, 2013.

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA J.; SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. Integrated modeling of water quantity and quality in the Araguari River basin, Brazil. **Latin American Journal of Aquatic Research**, v. 42, n. 1, p. 224-244, 2014.

SALLA, M.R.; FERNANDES, L.E.; PEREIRA, C.E.; SILVA JHUNIOR, H.C.; LIMA, G. Importance of calibration for mathematical modeling of self-purification of lotic environments. **Acta Limnologica Brasiliensis**, v. 28, e27, p 1-18, 2016.

SERRA DO FAÇÃO ENERGIA SA - SEFAC. **Programas ambientais**. 2018. Disponível em: <<http://www.sefac.com.br/meio-ambiente/prgramas-ambientais/>>. Acesso em: 23 jan. 2018.

SILVA, L. M. C.; HORA, M. A. G. M. Conflito pelo uso da água na bacia hidrográfica do rio São Marcos: o estudo de caso da UHE Batalha. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 17, n.2, p.166-174, 2015.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água em rios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 359 p., 2014.