

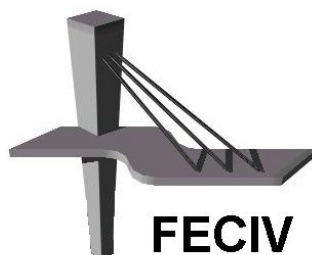


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Dissertação DE MESTRADO

**CONFLITOS NO APROVEITAMENTO HÍDRICO  
SUPERFICIAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO SÃO MARCOS, ALTO PARANAÍBA**

**SÉRGIO SIQUEIRA PRADO SOARES**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**SÉRGIO SIQUEIRA PRADO SOARES**

**CONFLITOS NO APROVEITAMENTO HÍDRICO  
SUPERFICIAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
SÃO MARCOS, ALTO PARANAÍBA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos  
para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Orientador: Prof. Dr. MARCIO RICARDO SALLA**

Uberlândia, 30 de agosto de 2019

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S676 2019	<p>Soares, Sérgio Siqueira Prado, 1990- Conflitos no aproveitamento hídrico superficial na bacia hidrográfica do rio São Marcos, Alto Paranaíba [recurso eletrônico] / Sérgio Siqueira Prado Soares. - 2019.</p> <p>Orientador: Marcio Ricardo Salla. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Civil. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2434">http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2434</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1 . Engenharia civil. I. Ricardo Salla, Marcio, 1976-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. III. Título.</p> <p>CDU: 624</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 244, PPGEC				
Data:	09 de setembro de 2019	Hora de início:	14 h 0 min	Hora de encerramento:	16h 10 min
Matrícula do Discente:	11712ECV009				
Nome do Discente:	Sérgio Siqueira Prado Soares				
Título do Trabalho:	Conflitos no aproveitamento hídrico superficial na bacia hidrográfica do rio São Marcos, Alto Paranaíba				
Área de concentração:	Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	O mização do aproveitamento hídrico na bacia do rio São Marcos: conflitos de interesse na quantidade e qualidade da água				

Reuniu-se na Sala de Reuniões Prof. Márcio Antônio Ribeiro da Silva, bloco 1Y, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta: Professores Doutores: José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU, Fabrício Aníbal Corradini – IELACHS/UFTM e Marcio Ricardo Salla - FECIV/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Marcio Ricardo Salla, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

#### **Aprovado**

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.



Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Ricardo Salla, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/09/2019, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Eduardo Alamy Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 09/09/2019, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabício Anibal Corradini, Usuário Externo**, em 16/09/2019, às 09:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1449881** e o código CRC **FCAFF59C**.

# DEDICATÓRIA

---

À minha mãe Maria de Fátima (*in memorian*), que se faz presente em todos os dias da minha vida, sei que de onde estiveres olhas por mim e vibra com cada vitória conquistada.

Ao meu pai Donizetti (*in memorian*), que por quinze anos foi pai e mãe e sempre foi meu maior exemplo de vida. De onde estiveres, sei que está muito orgulhoso.

# AGRADECIMENTOS

---

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir que meus sonhos se realizem, por tudo que coloca em meu caminho e contribui para meu crescimento e por me dar forças para superar os momentos de dificuldade.

Ao meu orientador, Prof. Marcio Ricardo Salla por todo conhecimento compartilhado, pela atenção, dedicação e paciência. Agradeço pelos conselhos e incentivo a não desistir.

À todos meus familiares, pelo incentivo e pelas orações.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, por fornecer o apoio necessário para a realização deste trabalho.

À minha noiva, que sempre me incentivou e nunca me deixou desistir, que esteve ao meu lado nos momentos bons e ruins, por ser sempre muito atenciosa e compreensiva.

À todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

SOARES, S. S. P. Conflitos no aproveitamento hídrico superficial na bacia hidrográfica do rio São Marcos, Alto Paranaíba. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

## RESUMO

---

Atualmente no território brasileiro várias bacias hidrográficas apresentam conflitos de interesse entre os irrigantes e o setor hidrelétrico pelo uso da água superficial (ANA, 2017). A otimização de um sistema de recursos hídricos é um problema complexo de engenharia, sendo necessária a formulação matemática atrelada aos algoritmos computacionais para que se consiga descrever a dinâmica do sistema natural. O objetivo deste trabalho foi otimizar o aproveitamento hídrico superficial na bacia hidrográfica do rio São Marcos, minimizando os conflitos de uso da água entre as Centrais Hidrelétricas de Batalha e Serra do Facão e a irrigação por meio de pivôs centrais. Esta bacia está localizada na região centro-oeste do território brasileiro, cujo curso de água principal é afluente do rio Paranaíba em sua margem direita. As simulações matemáticas foram realizadas com o auxílio da ferramenta computacional AQUATOOL, que atua como um sistema de suporte à decisão de recursos hídricos em escala de bacia hidrográfica. Dentro da ferramenta foi utilizado o módulo de otimização OPTIGES. Em função da limitação dos dados fluviométricos e climatológicos na bacia, as simulações foram realizadas entre outubro de 2014 até setembro de 2017. Foram simulados critérios de outorga diferentes dos adotados atualmente pelos Estados de Minas Gerais e Goiás, com porcentagens maiores e menores que a vazão máxima outorgável em bases anuais, além da comparação dos critérios atuais com vazões de referência determinadas em bases sazonais (seis meses mais secos e os seis mais chuvosos). No estudo da disponibilidade hídrica verificou-se que a substituição dos critérios de outorga atuais (50% da  $Q_{7,10}$  em Minas Gerais e 70% da  $Q_{95}$  no Estado de Goiás) para 30% da  $Q_{7,10}$  foi o que trouxe os piores resultados, em que mais de 27% de toda área da bacia excedeu os limites máximos outorgáveis. A melhor situação foi encontrada com a utilização dos critérios 80% da  $Q_{7,10}$  e 70% da  $Q_{95}$ , em que 2,3% e 5,5%, respectivamente, foram as áreas acima dos limites outorgáveis. Para a alteração das vazões de referência calculadas com bases sazonais, percebeu-se uma piora na disponibilidade hídrica ao utilizar o período de estiagem, aumentando a área crítica em 8% quando comparado à base anual (aproximadamente 1.000 km<sup>2</sup>). Para o período chuvoso, a melhora na disponibilidade hídrica foi de apenas 2% em

relação à base anual. Nas regiões em que as situações de escassez são mais recorrentes, foram ponderados níveis de prioridades para cada tipo de demanda, enfocando principalmente no atendimento à irrigação, geração de energia elétrica e manutenção da vazão mínima residual (ou ecológica) em cada trecho do rio São Marcos. A montante do reservatório de Batalha, os valores máximos de cortes no volume captado para demandas de irrigação chegaram a 89%, focando na manutenção da vazão ecológica e na geração de energia hidrelétrica. Neste contexto, o estudo auxiliará tecnicamente nas tomadas de decisão nesta bacia hidrográfica, além de contribuir com a temática sobre novos critérios de outorga.

**Palavras-chave:** AQUATOOL, OPTIGES, outorgas, otimização hídrica, conflito pelo uso da água, rio São Marcos.

## ABSTRACT

---

Currently in the Brazilian territory several river basins present conflicts of interest between irrigants and the hydroelectric sector due to the use of surface water (ANA, 2017). The optimization of a water resources system is a complex engineering problem, requiring the mathematical formulation linked to computational algorithms in order to describe the dynamics of the natural system. The objective of this work was to optimize the surface water use in the São Marcos river basin, minimizing the conflicts of water use between the Batalha and Serra do Facão Hydroelectric Plants and the irrigation through central pivots. This basin is located in the central-western region of the Brazilian territory, whose main watercourse is tributary of the Paranaíba river on its right bank. The mathematical simulations were performed with the aid of the computational tool AQUATOOL, which acts as a decision support system for water resources in a watershed scale. Within the tool the optimization module OPTIGES was used. Due to the limitation of fluvimetric and climatological data in the basin, the simulations were performed from October 2014 to September 2017. Different grant criteria were simulated from those currently adopted by the States of Minas Gerais and Goiás, with higher and lower percentages than the flow. maximum allowable on an annual basis, in addition to comparing the current criteria with reference flows determined on a seasonal basis (six driest and six wettest months). In the study of water availability it was found that the substitution of the current grant criteria (50% of Q7,10 in Minas Gerais and 70% of Q95 in Goiás State) to 30% of Q7,10 was the one that brought the worst results. where more than 27% of the entire basin area exceeded the maximum allowable limits. The best situation was found using the criteria 80% of Q7,10 and 70% of Q95, where 2.3% and 5.5%, respectively, were the areas above the grantable limits. For the change of reference flows calculated on seasonal basis, a worsening of water availability was observed when using the drought period, increasing the critical area by 8% when compared to the annual base (approximately 1,000 km<sup>2</sup>). For the rainy season, the improvement in water availability was only 2% over the annual basis. In regions where scarcity situations are more frequent,

priority levels were considered for each type of demand, focusing mainly on irrigation, electricity generation and maintenance of minimum residual (or ecological) flow in each stretch of the São Marcos. Upstream of the Batalha reservoir, maximum cut-offs in the volume captured for irrigation demands reached 89%, focusing on maintaining ecological flow and generating hydroelectric power. In this context, the study will technically assist decision-making in this basin. as well as contributing to the theme of new grant criteria.

**Keywords:** AQUATOOL, OPTIGES, grants, water optimization, conflicts over water use, São Marcos river.

# LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 - Evolução da escassez hídrica no mundo .....	26
Figura 2 - Panorama hídrico de Minas Gerais .....	29
Figura 3 - Panorama hídrico dos principais rios mineiros da bacia hidrográfica do São Marcos.....	30
Figura 4 - Disponibilidade hídrica no Estado de Goiás. ....	31
Figura 5 - Balanço hídrico no Estado de Goiás .....	32
Figura 6 - Empreendimentos em operação no Brasil.....	35
Figura 7 – Localização georreferenciada da bacia hidrográfica do rio São Marcos .....	51
Figura 8 - Altimetria na bacia hidrográfica do rio São Marcos.....	53
Figura 9 - Principais afluentes do rio São Marcos.....	54
Figura 10 - Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio São Marcos .....	56
Figura 11 - Porcentagens de cada uso e ocupação do solo.....	57
Figura 12 - Folhas do TOPODATA com destaque para a bacia hidrográfica do rio São Marcos.....	59
Figura 13 - Mosaico do MDE.....	59
Figura 14 - Estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio São Marcos .....	64
Figura 15 - Estações Climatológicas na bacia hidrográfica do rio São Marcos .....	65
Figura 16 - Outorgas para uso superficial.....	67
Figura 17 - Elemento "Nó" de uma topologia .....	69
Figura 18 - <i>Layout</i> para configuração do elemento "condução" .....	69
Figura 19 - <i>Layout</i> para configuração do elemento "entrada" .....	71
Figura 20 - <i>Layout</i> para configuração do elemento "demanda" .....	72
Figura 21 - <i>Layout</i> para configuração do elemento "toma" .....	74
Figura 22 - <i>Layout</i> do elemento "retorno".....	76
Figura 23 - <i>Layout</i> para configuração do elemento "reservatório".....	77
Figura 24 - <i>Layout</i> para configuração de volumes do elemento "reservatório" .....	78
Figura 25 - Volumes de um reservatório.....	79
Figura 26 - <i>Layout</i> para configuração de superfície e volume no elemento “reservatório” .....	80
Figura 27 - <i>Layout</i> para configuração da evaporação do elemento "reservatório" .....	80



Figura 28 - Detalhe da topologia da bacia hidrográfica do rio São Marcos.....	86
Figura 29 - Opções de gerenciamento para o modelo OPTIGES.....	87
Figura 30 - Divisão das sub-bacias na bacia hidrográfica do rio São Marcos .....	95
Figura 31 – Vazão defluente simulada e monitorada nos reservatórios de: (a) Batalha; (b) Serra do Facão. Batalha e Serra do Facão .....	96
Figura 32 - Variação de volume simulado e monitorado nos reservatórios de: (a) Batalha; (b) Serra do Facão.....	97
Figura 33 - Pontos de controle (PARH).....	98
Figura 34 - Percentual hídrico utilizado baseado nos critérios vigentes com base anual ..	101
Figura 35 - Percentual hídrico baseado nos critérios vigentes com base sazonal para o período seco.....	104
Figura 36 - Percentual hídrico baseado nos critérios vigentes com base sazonal para o período chuvoso.....	105
Figura 37 - Áreas da bacia hidrográfica e limites outorgáveis .....	107
Figura 38 - Utilização da vazão de referência de 30% Q7,10 .....	108
Figura 39 - Utilização da vazão de referência de 50% Q7,10 .....	110
Figura 40 - Utilização da vazão de referência de 80% Q7,10 .....	111
Figura 41 - Utilização da vazão de referência de 70% Q95 .....	113
Figura 42 - Trechos mais críticos na bacia hidrográfica do rio São Marcos.....	115
Figura 43 - Relatório da sub-bacia do rio Samambaia referente à demanda de irrigação ..	118
Figura 44 - Relatório da sub-bacia do ribeirão Capipumba referente à demanda de irrigação .....	119
Figura 45 - Relatório da sub-bacia do alto São Marcos referente à demanda de irrigação	119
Figura 46 - Relatório da sub-bacia do ribeirão Soberbo referente à demanda de irrigação .....	120
Figura 47 - Relatório da sub-bacia córrego do Rocha referente à demanda irrigação.....	120
Figura 48 - Relatório da sub-bacia do ribeirão Arrojado referente à demanda de irrigação .....	121
Figura 49 - Relatório da sub-bacia ribeirão Mundo Novo referente à demanda de irrigação .....	121
Figura 50 - Relatório da sub-bacia ribeirão Cristal referente à demanda de irrigação .....	122
Figura 51 - Relatória da sub-bacia do Alto Batalha referente à demanda de irrigação .....	122

Figura 52 - Relatório da sub-bacia ribeirão São Firmino referente à demanda de irrigação .....	123
Figura 53 - Relatório da sub-bacia Médio São Marcos referente à demanda de irrigação	123
Figura 54 - Volumes acumulados nos reservatórios de Batalha e Serra do Facão .....	124
Figura 55 - Relatório referente à demanda do reservatório de Batalha .....	125
Figura 56 - Relatório referente à demanda do reservatório de Serra do Facão .....	125
Figura 57 - Relatório referente à demanda do reservatório de Batalha para vazão máxima turbinada.....	126
Figura 58 - Relatório referente à demanda do reservatório de Batalha para vazão máxima turbinada.....	126
Figura 59 - Topologia do sistema hídrico da bacia hidrográfica do rio São Marcos.....	137

# LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 - Precipitação, vazões médias e disponibilidade hídrica por região hidrográfica .	27
Tabela 2 - Usos consuntivos no Brasil no ano 2017 .....	33
Tabela 3 - Matriz energética brasileira .....	34
Tabela 4 - Usos consuntivos segundo Resoluções ANA .....	37
Tabela 5 - Métodos para determinação da vazão ecológica por grupos de classificação ....	38
Tabela 6 - Critérios adotados para concessão de outorga de captação de águas superficiais no Brasil .....	41
Tabela 7 - Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio São Marcos.....	57
Tabela 8 - Estações de monitoramento na bacia hidrográfica do rio São Marcos.....	61
Tabela 9 - Sub-bacias e suas características .....	92
Tabela 10 - Dados dos pontos de controle .....	98
Tabela 11 - Dados dos pontos de controle .....	99
Tabela 12 - Vazões de referência no exutório das sub-bacias.....	99
Tabela 13 - Porcentagens dos limites outorgáveis.....	106
Tabela 14 - Sub-bacias com áreas críticas .....	116
Tabela 15 - Exigências operacionais dos reservatórios da bacia hidrográfica do rio São Marcos.....	124

# SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

---

## SÍMBOLOS

$A_{total}$	Área total de contribuição
$A_{sub-bacia}$	Área total de contribuição de cada sub-bacia
$^{\circ}C$	Graus Celsius
$G_m$	Garantia Mensal
$G_a$	Garantia Anual
$I$	Infiltração
$Q_{7,10}$	Vazão mínima de 7 dias consecutivos e 10 anos de período de retorno
$Q_{90}$	Vazão associada à permanência de 90% no tempo
$Q_{95}$	Vazão associada à permanência de 95% no tempo
$Q_{sub-bacia}$	Vazão em cada sub-bacia
$Q_{difusa}$	Vazão difusa
$Q_{Incr-Batalha}$	Vazão incremental na UHE Batalha
$Q_{Incr-Facão}$	Vazão incremental na UHE Serra do Facão
$Q_{outorgada\ i\ (\%)}$	Percentual usado da parcela $Q_{7,10}$ permissível para outorga no segmento $i$
$NG_m$	Nível de Falha Mensal
$R$	Retorno de água para o sistema
$S_{sup}$	Volume captado pela demanda
$X$	Água consumida
$x$	Porcentagem da $Q_{7,10}$ permissível para outorga
$\alpha$	Coeficiente de Retorno
$\beta$	Coeficiente de Consumo
$\Sigma Q_{mt\ i}$	Somatório das vazões já outorgadas a montante do segmento $i$ , inclusive as vazões outorgadas no próprio segmento

## ABREVIATURAS

<i>Hab</i>	Habitantes
<i>hm<sup>3</sup></i>	Hectômetro cúbico
<i>km</i>	Kilômetro
<i>km<sup>2</sup></i>	Kilômetro quadrado
<i>km<sup>3</sup></i>	Kilômetro cúbico
<i>L</i>	Litro
<i>m</i>	Metro
<i>m<sup>3</sup></i>	Metro cúbico
<i>mm</i>	Milímetro

## SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AQUATOOL	Ferramenta de Gestão de Água
CEA	Comissão Especial de Acompanhamento
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CH	Central Hidrelétrica
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DF	Distrito Federal
DSS	Decision Support Systems
GO	Goiás
HEC-RAS	Sistema de Análise de Rio do Centro de Engenharia Hidráulica do Exército dos EUA
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MG	Minas Gerais
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos

PARH	Plano de Ação de Recursos Hídricos
QGIS	Quantum Gis
SAGA	System for Automated Geoscientific Analyses
SAR	Sistema de Acoplamento de Reservatórios
SECIMA	Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos
SEFAC	Serra do Facão Energia S. A
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SEMARH – GO	Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado de Goiás
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRTM	Shuttle Radar Topography
UGHs	Unidades de Gestão Hídricas
UHE	Usina Hidrelétrica
UNESCO	Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura
UTM	Universal Transversa de Mercator

# SUMÁRIO

---

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Disponibilidade hídrica .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Usos múltiplos da água.....</b>	<b>32</b>
<i>2.2.1 – Usos múltiplos da água na bacia hidrográfica do rio São Marcos .....</i>	<i>35</i>
<b>2.3 Vazão ecológica.....</b>	<b>37</b>
<b>2.4 Sistema de suporte à decisão em recursos hídricos .....</b>	<b>46</b>
<i>2.4.1 AQUATOOL.....</i>	<i>46</i>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
<b>3.1 Área de Estudo .....</b>	<b>50</b>
<i>3.1.1 Delimitação da bacia hidrográfica .....</i>	<i>57</i>
<b>3.2 Dados climatológicos e fluviométricos .....</b>	<b>60</b>
<b>3.3 Demandas consuntiva e não consuntiva outorgadas .....</b>	<b>66</b>
<b>3.4 Módulo OPTIGES.....</b>	<b>68</b>
<b>3.5 Regionalização da vazão.....</b>	<b>81</b>
<b>3.6 Determinação da vazão <math>Q_{7,10}</math>.....</b>	<b>82</b>
<b>3.7 Determinação da vazão <math>Q_{95}</math>.....</b>	<b>83</b>
<b>3.8 Regionalização da vazão <math>Q_{7,10}</math> e <math>Q_{95}</math> .....</b>	<b>84</b>
<b>3.9 Topologia do sistema hídrico .....</b>	<b>86</b>
<b>3.10 Balanço hídrico.....</b>	<b>86</b>
<b>3.11 Otimização do aproveitamento hídrico .....</b>	<b>87</b>
<i>3.11.1 Variações nos critérios de outorga (primeira e segunda análise) .....</i>	<i>88</i>
<i>3.11.2 Avaliação quanto às prioridades nas outorgas (terceira análise) .....</i>	<i>90</i>
<b>4 Resultados .....</b>	<b>92</b>
<b>4.1 Área de Estudo .....</b>	<b>92</b>
<b>4.2 Topologia .....</b>	<b>96</b>
<b>4.3 Balanço Hídrico .....</b>	<b>96</b>
<b>4.4 Determinação da <math>Q_{7,10}</math> .....</b>	<b>97</b>
<b>4.5 Determinação da <math>Q_{95}</math> .....</b>	<b>99</b>

<b>4.6 Otimização do aproveitamento hídrico .....</b>	<b>100</b>
<i>4.6.1 Impacto da substituição da vazão de referência anual pelas sazonais na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio São Marcos .....</i>	<i>100</i>
<i>4.6.2 Impacto da mudança do percentual máximo outorgável na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio São Marcos .....</i>	<i>106</i>
<b>4.7 Avaliação quanto as prioridades nas outorgas.....</b>	<b>114</b>
<i>4.7.1 Reservatórios.....</i>	<i>123</i>
<b>Conclusões.....</b>	<b>127</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO A – Topologia do sistema hídrico.....</b>	<b>137</b>



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países que possui a maior disponibilidade de água doce do mundo, porém os recursos hídricos estão distribuídos de forma desigual no território nacional. A vazão superficial média nos cursos de água é de 260.000 m<sup>3</sup>/s, sendo que 78,8% está localizada na bacia do rio Amazonas (ANA, 2017). Esta desigualdade de distribuição, associada à elevada densidade populacional em regiões com limitações hídricas superficiais, gera conflito entre os diversos usuários e a poluição dos corpos hídricos.

Em grande parte do território nacional, a sazonalidade das estações seca e chuvosa é bem definida e, muitas vezes, brutal para a população residente em regiões com sazonalidade interanual. Para que se consiga manter uma garantia de água ao longo de todo o ano é necessária a utilização de reservatórios ou açudes, reservando água em períodos úmidos para a sua utilização em períodos secos (ANA, 2016).

Em virtude dos conflitos pelo uso da água observados em diversos locais do país, surgiu a necessidade de criação de instrumentos que colaborassem no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido, o Brasil teve um grande avanço com a publicação da Lei nº 9.433/97, que criou a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que dentre seus instrumentos de gestão, está a outorga de direito de uso da água. A outorga tem o objetivo de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, superficiais ou subterrâneas, e o efetivo exercício dos direitos de acesso a este recurso natural. É o ato administrativo pelo qual o poder outorgante concede ao outorgado o direito de uso desse recurso por prazo determinado e conforme termos e condições expressas no ato da sua concessão (BRASIL, 2006).

No intuito de minimizar a pressão sobre os recursos hídricos e os conflitos entre os usuários, uma série de pesquisas foram desenvolvidas em diversas regiões hidrológicas no mundo

(VESTENA et al. 2012; PRUSKI et al. 2014; OLIVEIRA et al. 2013; CRUZ & TUCCI, 2005; SANTOS et al. 2011; LABADIE, 2004; MORAES et al. 2008; SIMÕES & OLIVEIRA, 2014; FIRMINO, 2007; AZEVEDO et al. 1998; SALLA et al. 2013, 2014a, 2014b; PAREDES-ARQUIOLA et al. 2014a; FERREIRA, 2014; COSTA, 2015; CHÁVEZ-JIMÉNEZA & GONZÁLEZ-ZEAS, 2015; PELLICER-MARTÍNEZ & MARTÍNEZ-PAZ, 2016). Tais estudos são comumente realizados por meio de ferramentas computacionais, que auxiliam como um sistema de suporte à decisão e fazem a gestão dos recursos em escala de bacia hidrográfica, avaliando-os de forma qualitativa e quantitativa.

De acordo com ANA (2015), aproximadamente 55% da demanda hídrica consuntiva em escala nacional é direcionada ao setor de irrigação. Os Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia e São Paulo concentram cerca de 80% da área irrigada por pivô central. Além disso, existem aproximadamente 267 centrais hidrelétricas instaladas nesses Estados, o que acirra os conflitos pelos usos múltiplos da água (ANEEL, 2018).

A bacia hidrográfica do rio São Marcos, foco deste estudo de mestrado, traz enormes conflitos entre os irrigantes e o setor hidrelétrico. De acordo com o IBGE (2015), a bacia é caracterizada por ser uma região de alta produtividade agrícola devido a irrigação por pivôs centrais, onde os municípios de Cristalina (GO) e Unaí (MG), respectivamente, estão na 5ª e 24ª posição de maiores PIB agrícolas do Brasil.

Atualmente estão em operação na bacia hidrográfica do rio São Marcos duas centrais hidrelétricas – CH em série, sendo, na sequência, Batalha (com início de operação em maio de 2014) e Serra do Facão (com início de operação em outubro de 2010). Os conflitos foram agravados após o término das obras da CH Batalha, o que motivou o estabelecimento do marco regulatório na bacia, conforme Resolução ANA 562/2010, pactuado entre a Agência Nacional das Águas e os órgãos gestores de Goiás (Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMARH) e Minas Gerais (Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM), além da revisão da outorga nesta CH, conforme Resolução ANA nº 564/2010. Entretanto, as vazões disponibilizadas pelo marco para usos consuntivos já foram superadas pelas demandas existentes, o que tem motivado a sua revisão e a negociação entre os órgãos gestores e os usuários. Neste sentido, de acordo com a Portaria ANA nº 778/2012, foi criada

uma Comissão Especial de Acompanhamento da Gestão de Recursos Hídricos da bacia do rio São Marcos (CEA), com a finalidade de revisar, acompanhar e fiscalizar o cumprimento do marco regulatório. Essa comissão busca a integração entre ambos os lados do conflito (irrigantes e setor hidrelétrico), definindo diretrizes para minimizar o conflito pelos recursos hídricos.

De acordo com o Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Paranaíba (CBH, 2017), a CEA propôs limitar os valores para irrigação na bacia hidrográfica do rio São Marcos e também uma eventual redução da vazão outorgada a FURNAS pela Resolução ANA nº 564/2010, buscando garantir a geração de energia elétrica na Usina Hidrelétrica (UHE) Batalha. Segundo o CEA (2017), os irrigantes encaminharam uma proposta de antecipar a vazão máxima de 13,61 m<sup>3</sup>/s como vazão limite atual para os usos consuntivos (valor que era previsto para o ano de 2040), além de adoção da outorga sazonal para número significativo de irrigantes. Já o posicionamento de FURNAS foi de que fosse mantido os valores determinados em resolução, que foram a base do Contrato de Concessão da usina, com vigência até 2041.

Diante do exposto, o presente estudo fundamenta-se na hipótese de que a variabilidade temporal e espacial da disponibilidade hídrica e o uso de critérios menos restritivos trazem alternativas que minimizam o conflito pelo uso da água observado na bacia hidrográfica do rio São Marcos. Sendo assim, o objetivo geral deste estudo foi avaliar novos critérios de outorga para a otimização do aproveitamento hídrico superficial na bacia hidrográfica do rio São Marcos. Diante dos critérios de outorga atuais nos Estados de Minas Gerais (50% da  $Q_{7,10}$  anual) e Goiás (70% da  $Q_{95}$  anual), os objetivos específicos foram:

- Analisar a disponibilidade hídrica por meio de novos critérios de outorga de uso da água, únicos para toda a bacia, como: 70% da  $Q_{95}$  anual, 50% da  $Q_{7,10}$  anual, 30% da  $Q_{7,10}$  anual e 80% da  $Q_{7,10}$ , variando em bases anuais;
- Analisar a disponibilidade hídrica a partir dos critérios atuais calculados em base sazonal (abril à setembro que são os meses mais secos e de outubro à março que são os meses mais chuvosos);

- Identificar as regiões que possuem uma situação de escassez mais frequente e ponderar níveis de prioridade e restrições nos usos da água. As análises computacionais de otimização hídrica foram realizadas no módulo OPTIGES, vinculado ao sistema de suporte à decisão AQUATOOL, tendo como foco principal as sub-bacias com níveis críticos de disponibilidade hídrica e os dois reservatórios existentes no rio São Marcos (Batalha e Serra do Facão).

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Apresenta uma introdução aos temas abordados, incluindo a importância e motivação para desenvolvê-los. Além da apresentação do objetivo do estudo e estruturação do texto;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica com ênfase nos conceitos e assuntos que serão abordados durante o transcorrer do texto;
- Capítulo 3: No terceiro capítulo são expostos os métodos e programas computacionais utilizados para a caracterização da área de estudo e para as simulações matemáticas de balanço hídrico e otimização hídrica;
- Capítulo 4: Apresentação dos resultados obtidos: a topologia do modelo, o balanço hídrico, levantamento das vazões outorgadas, vazões de referência  $Q_{7,10}$  e  $Q_{95}$ , calculadas em base anual e sazonal e mudanças no percentual máximo outorgável.
- Capítulo 5: Conclusão da pesquisa.

Por último, as referências bibliográficas utilizadas durante a pesquisa.

# CAPÍTULO 2

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Disponibilidade hídrica

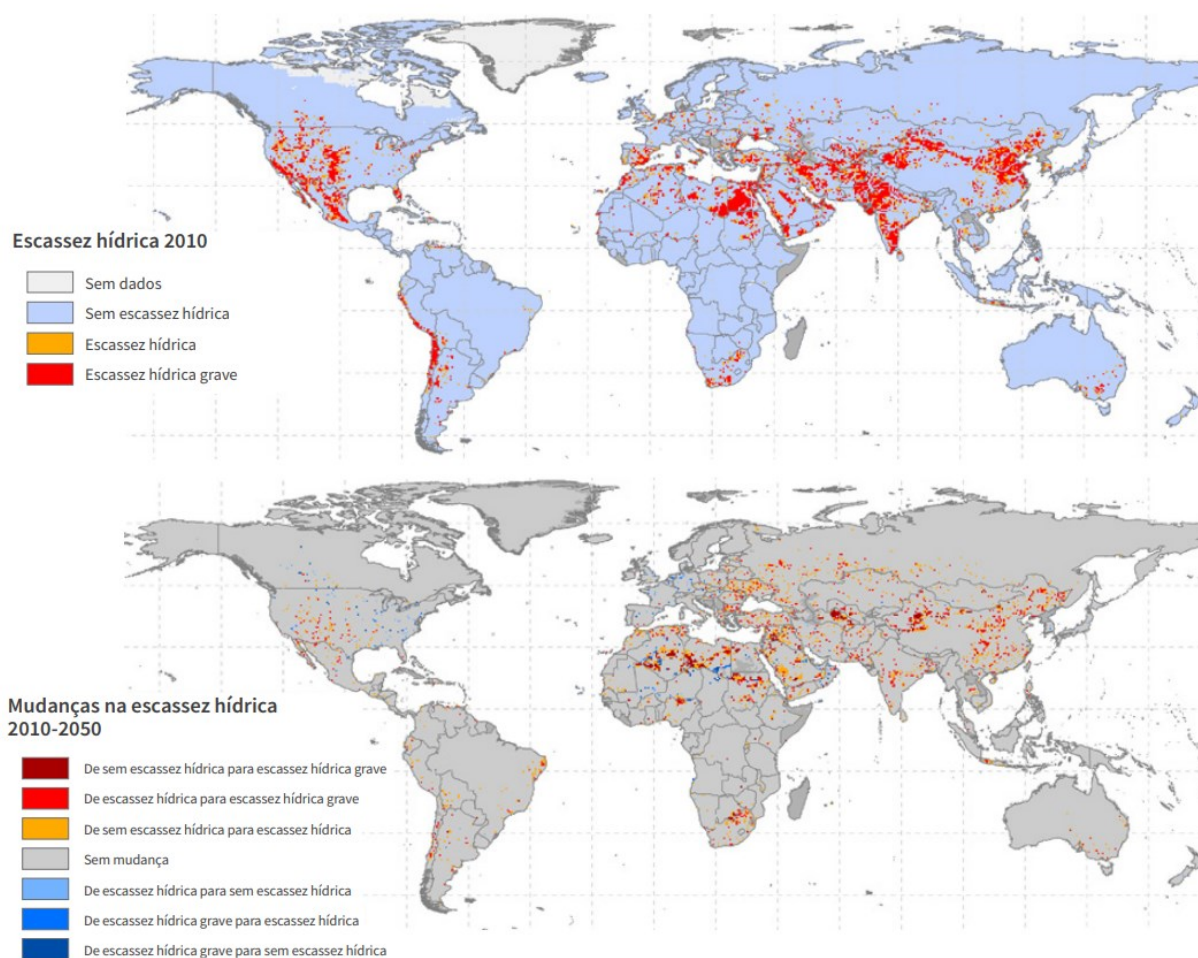
A água é um recurso fundamental para a garantia da vida e tem um papel importante para o desenvolvimento social e econômico de uma região. Entretanto, SCHOR (2006) mostrou que, devido à grande disponibilidade deste recurso no planeta, a água era vista como um recurso infinito, não existindo uma grande preocupação com a sua conservação. Segundo FAO (2009), no último século o consumo de água cresceu em um ritmo doze vezes superior ao da população mundial. De acordo com a WWF (2012a), atualmente 41% da população vive em regiões de estresse hídrico, 800 milhões de pessoas não têm acesso a água potável e 2,6 bilhões não têm acesso a condições sanitárias adequadas.

Na década de 2010, 1,9 bilhão de pessoas (27% da população mundial) viviam em áreas com potencial de serem gravemente afetadas pela escassez hídrica. Se a variabilidade mensal for levada em consideração, 3,6 bilhões de pessoas em todo o mundo (quase metade da população mundial) já vivem em áreas potencialmente escassas em água pelo menos durante um mês por ano, e esse número pode aumentar de 4,8 para 5,7 bilhões em 2050. Cerca de 73% das pessoas afetadas por essa situação vivem na Ásia (69% em 2050) (BUREK et al., 2016).

Ainda de acordo com Burek et al. (2016), as captações de água para irrigação foram identificadas como a principal causa da redução dos níveis das águas subterrâneas em todo o mundo. Prevê-se que, na década de 2050, ocorrerá um grande aumento das captações de águas subterrâneas, totalizando 1.100 km<sup>3</sup>/ano, o que corresponde a um aumento de 39% em relação aos níveis atuais.

Muitos países já estão passando por situações de escassez hídrica, e provavelmente terão que lidar com uma disponibilidade ainda menor de águas superficiais a partir de 2050. A Figura 1 traz a evolução da escassez hídrica no mundo.

Figura 1 - Evolução da escassez hídrica no mundo



Fonte: Burek et al. (2016)

O Brasil destaca-se por possuir a maior disponibilidade hídrica do planeta (8.233 km<sup>3</sup>/ano), porém aparece em 25º lugar com relação à disponibilidade hídrica social (43.487 m<sup>3</sup>/hab.ano), decorrente da grande desigualdade na distribuição dos recursos hídricos no país, com 57% dos recursos concentrados na região Norte e parte das regiões Nordeste e Centro-Oeste, onde a densidade populacional é muito baixa (BORGHETTI et al. 2011).

Ainda com relação à desigualdade hídrica no Brasil, Peixoto (2011) afirma que o país tem aproximadamente 12% da água doce do planeta, porém este recurso está distribuído de forma desigual, uma vez que a variabilidade hídrica no território brasileiro é significativa. Segundo a ANA (2017), em média, cerca de 260.000 m<sup>3</sup>/s de água escoam pelos cursos de água no território nacional. Apesar da abundância, cerca de 80% desse total está localizado na região Amazônica, onde reside a menor parcela da população e a demanda de água é menor. Estima-se que a disponibilidade hídrica superficial no Brasil seja em torno de 78.600 m<sup>3</sup>/s ou 30% da vazão média, sendo que a vazão de 65.617 m<sup>3</sup>/s corresponde à contribuição da bacia Amazônica (ANA, 2017). A Tabela 1 apresenta dados de precipitação média, vazão média e disponibilidade hídrica por região hidrográfica no território nacional.

Tabela 1 - Precipitação, vazões médias e disponibilidade hídrica por região hidrográfica

Região Hidrográfica	Precipitação Média Anual (mm)	Vazão Média (m <sup>3</sup> /s)	Disponibilidade Hídrica (m <sup>3</sup> /s)
Amazônica	2.253	208.457	65.617
Tocantins – Araguaia	1.760	14.895	3.098
Atlântico Nordeste Ocidental	1.791	3.112	397
Parnaíba	1.040	774	325
Atlântico Nordeste Oriental	841	791	218
São Francisco	938	2.914	875
Atlântico Leste	940	1.556	271
Atlântico Sudeste	1.400	4.843	1.325
Atlântico Sul	1.573	2.869	513
Uruguai	1.689	4.906	550
Paraná	1.490	12.398	4.390
Paraguai	1.342	2.836	1.023

Fonte: ANA (2017)

A disponibilidade hídrica é uma estimativa da quantidade de água que é ofertada aos diversos usos e que considera um determinado nível de garantia para fins de gestão. De acordo com ANA (2017), a disponibilidade hídrica nos trechos de rio corresponde à vazão de estiagem Q<sub>95</sub>. Nos trechos sob influência de reservatórios, a disponibilidade é estimada de forma específica, tal que a jusante da barragem se adota a vazão mínima defluente do reservatório somada às contribuições de vazões Q<sub>95</sub> que afluem a partir dali.

Em Minas Gerais, a vulnerabilidade da disponibilidade hídrica pode ocorrer devido ao seguinte: excesso de demanda para uma determinada área em função da disponibilidade hídrica existente; falha de infraestrutura de adução e/ ou distribuição da água ou falta de

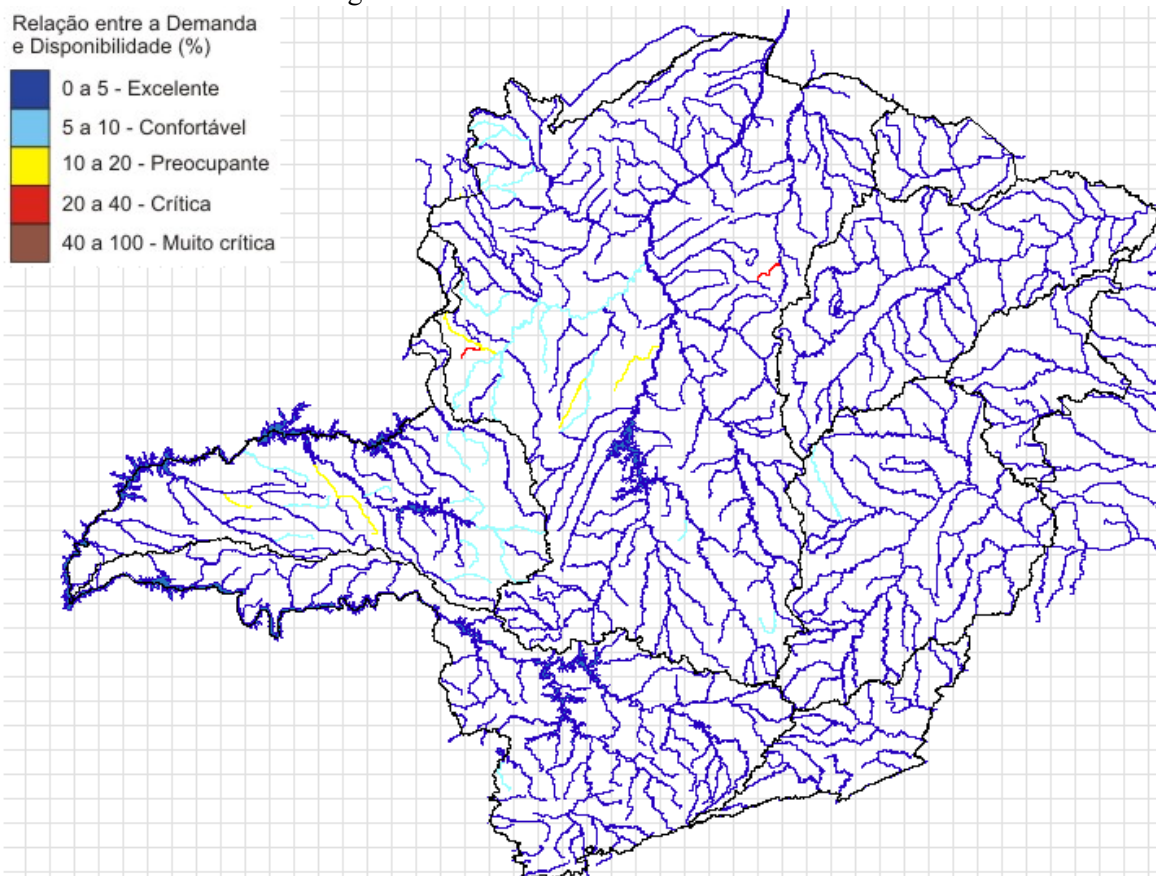
infraestrutura de regularização; escassez de água de qualidade por contaminação das fontes; eventos críticos provocados por secas excepcionais que tornam as condições de disponibilidade hídrica muito abaixo das condições de projeto, representando uma emergência (RHAMA, 2016).

Conforme o Atlas Digital das Águas de Minas, o balanço entre a demanda e a disponibilidade hídrica superficial nas regiões mineiras foi realizado com base em um índice determinado pela razão entre a vazão de retirada para usos consuntivos e a vazão média durante o período. A vazão outorgada é retirada dos cadastros de usuários disponíveis pelo IGAM e ANA, enquanto a vazão média foi obtida nos estudos de regionalização hidrológica. Para a definição de faixas de classificação, foram adotadas as seguintes: Excelente ( $< 5\%$ ): Pouca ou nenhuma atividade de gerenciamento é necessária. A água é considerada um bem livre; Confortável (5 a 10%): Pode ocorrer a necessidade de gerenciamento para solução de problemas locais de abastecimento; Preocupante (10 a 20%): A atividade é indispensável, exigindo a realização de investimentos médios; Crítica (20 a 40%): A situação exige intensa atividade de gerenciamento e grandes investimentos; Muito crítica ( $> 40\%$ ): Situação de extrema criticidade, exigindo uma atenção especial.

Os indicadores refletem a real utilização dos recursos hídricos e permite avaliar o quão relevante é a estrutura de gestão requerida na bacia. Quanto mais alto o índice, maior a complexidade da gestão requerida. A Figura 2 ilustra o panorama hídrico dos trechos dos principais rios de Minas Gerais.



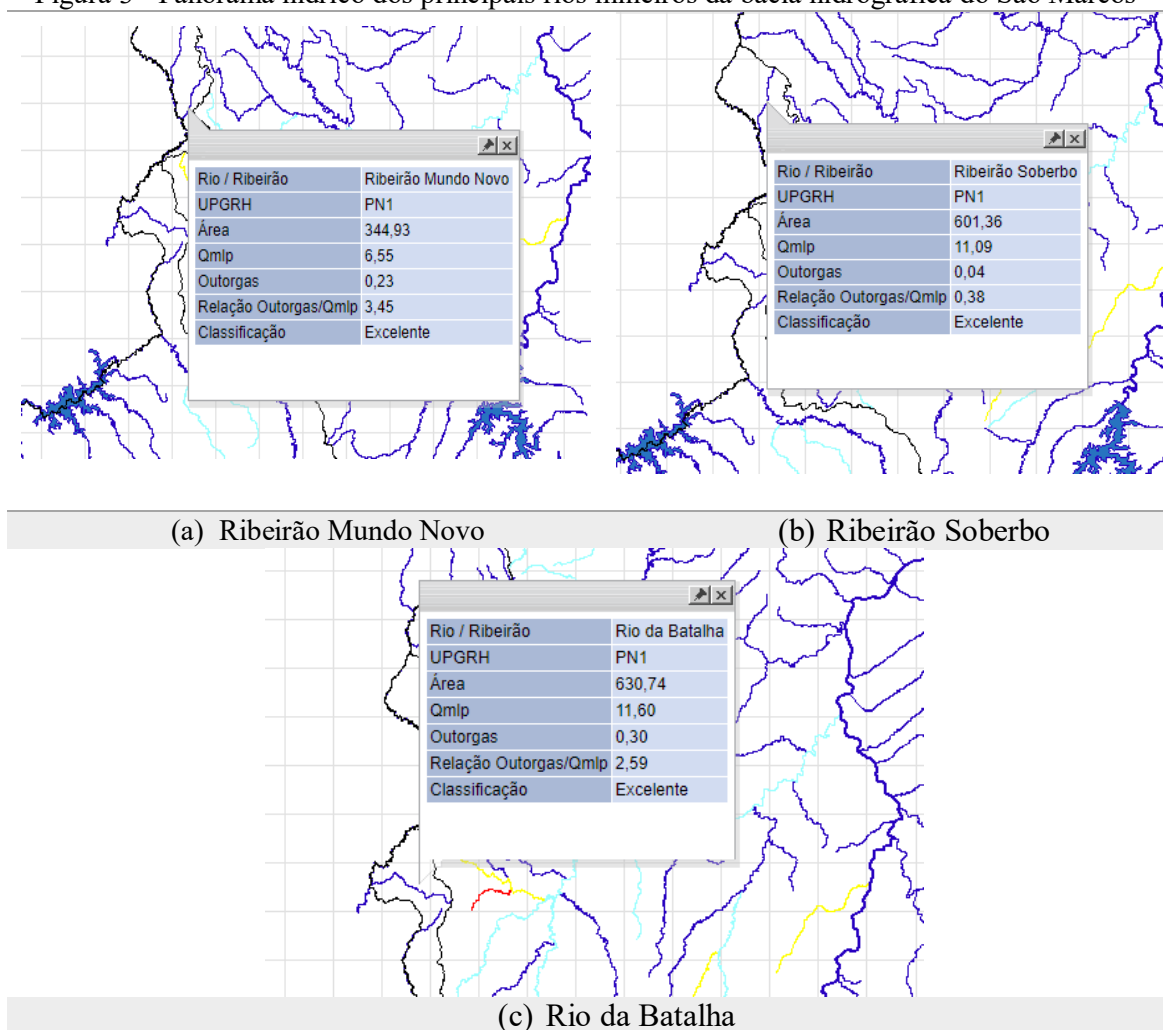
Figura 2 - Panorama hídrico de Minas Gerais



Fonte: Atlas Digital das Águas Mineiras (2018)

Alguns afluentes do rio São Marcos e que fazem parte de sua bacia hidrográfica podem ser visualizados no atlas, sendo eles o rio Batalha, ribeirão Soberbo e ribeirão Mundo Novo. A região onde estão localizados os rios citados é uma região com baixa demanda de recursos hídricos (Figura 9) e boa disponibilidade hídrica, o que permite classificá-los como “excelente”, conforme apresentado na Figura 3.

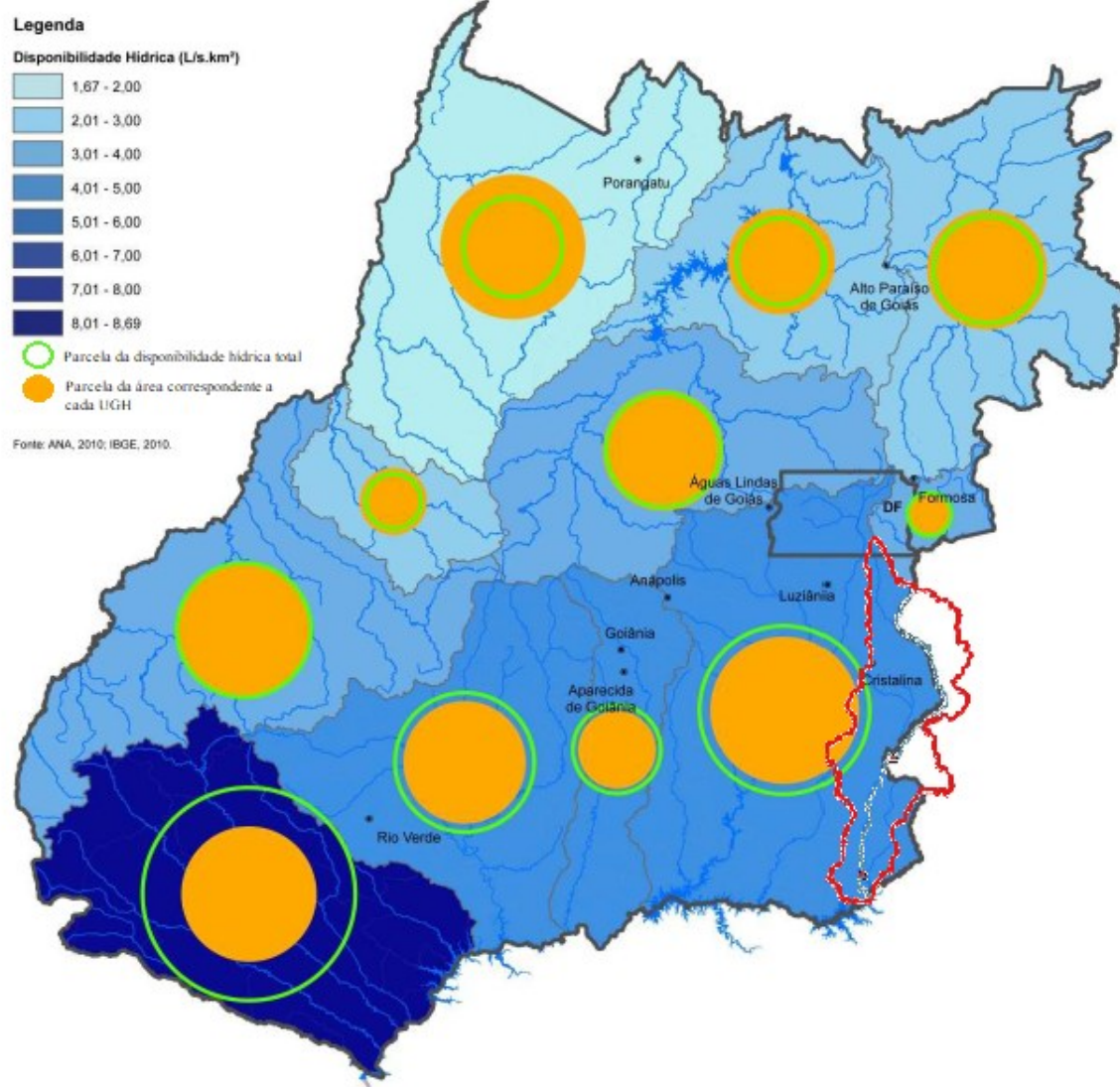
Figura 3 - Panorama hídrico dos principais rios mineiros da bacia hidrográfica do São Marcos



Fonte: Atlas Digital das Águas Mineiras

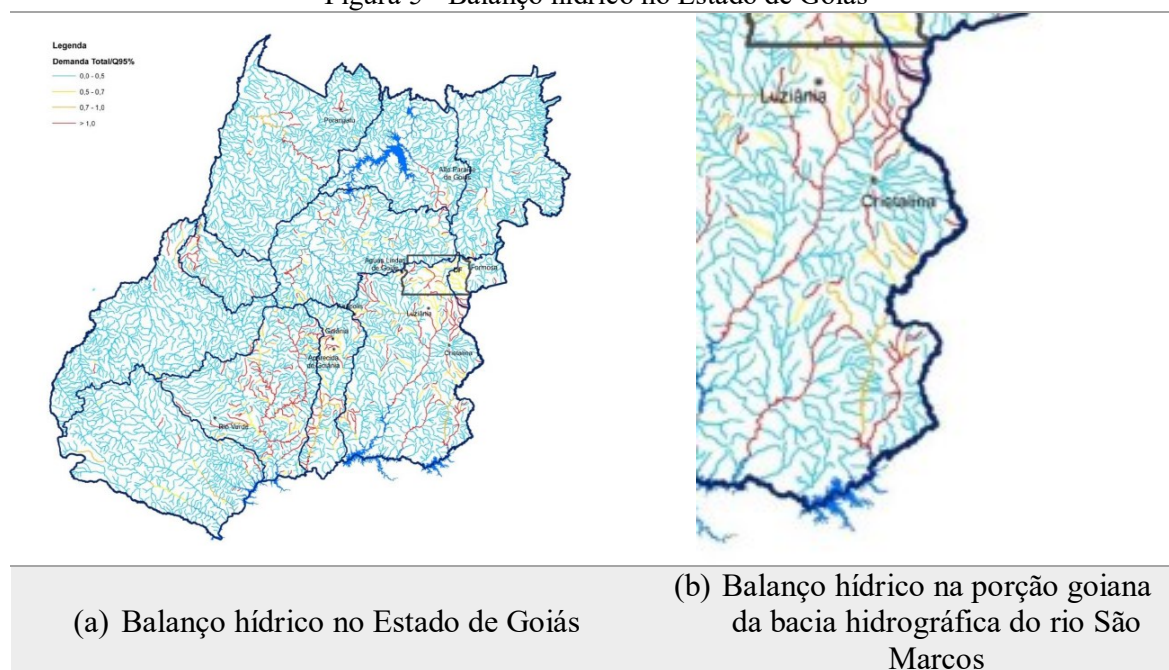
A bacia hidrográfica do rio São Marcos está inserida em sua maior parte no Estado de Goiás. Localizado no Centro-Oeste do Brasil, faz parte do Planalto Central brasileiro e, de acordo com o IBGE (2017), ocupa uma área de 340.086 km<sup>2</sup>, o que representa cerca de 4% do território nacional. Segundo COBRAPE (2015), o estado tem sua malha hidrográfica considerada uma das mais ricas do país e, apesar da abundância de recursos hídricos, eles estão distribuídos de maneira não uniforme. A Figura 4 permite visualizar a disponibilidade hídrica nas diversas UGHs em que foi dividido o estado. Nela, as esferas de cor laranja representam a parcela da área correspondente a cada UGH, enquanto os círculos verdes a parcela da disponibilidade hídrica total, adotada como a Q<sub>95</sub>%.

Figura 4 - Disponibilidade hídrica no Estado de Goiás.



A disponibilidade hídrica total do Estado é da ordem de 1.384,6 m³/s, enquanto a demanda captada total foi estimada em 307,1 m³/s. As demandas são maiores nos grandes centros urbanos (região metropolitana da capital Goiânia) e locais onde há grande atividade agrícola de irrigação, como a porção goiana da bacia hidrográfica do rio São Marcos (COBAPRE, 2015). A Figura 5 apresenta a avaliação feita considerando o acúmulo das disponibilidades hídricas e demandas captadas, nos trechos dos principais rios do Estado. Com essa avaliação, é possível analisar os trechos que apresentam criticidade.

Figura 5 - Balanço hídrico no Estado de Goiás



Fonte: Adaptado de COBRAPE (2015)

Na região onde está inserida a bacia hidrográfica é possível observar diversos trechos de rios em estado crítico. Na Figura 7 do item 3.1 pode ser visto a localização exata da bacia hidrográfica do rio São Marcos, para melhor entendimento.

## 2.2 Usos múltiplos da água

O Brasil já dispunha de um texto sobre o direito da água desde 1934, o Código das Águas. Porém este código das águas não foi capaz de incorporar meios para combater o desconforto hídrico, a contaminação das águas e os conflitos de uso, tampouco promover os meios de uma gestão descentralizada e participativa, exigência dos dias de hoje.

Exatamente por essas questões que foi elaborada a Lei nº 9.433, de janeiro de 1997 – Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. De acordo com a lei, o princípio dos usos múltiplos da água coloca todas as categorias usuárias em igualdade de condições ao acesso ao recurso natural. No Brasil, tradicionalmente o setor elétrico atuava como único agente do processo de gestão dos recursos hídricos superficiais, ilustrando a assimetria de tratamento conferida pelo poder central durante a primeira metade do século, o que favorecia esse setor em

detrimento das demais categorias de usuários. Com o rápido crescimento da demanda por água para outros usos, o número de conflitos de interesse envolvendo a água também cresceu (ANEEL, 2000).

Os usos múltiplos da água pela população são diversificados e sua intensidade está diretamente relacionada ao desenvolvimento industrial e social da região, além da densidade populacional e o grau de urbanização desta (TUNDISI, 2014). Portanto, fatores como costumes, renda e localização também são considerados em estudos sobre a demanda hídrica regional.

De acordo com ANA (2017), a demanda consuntiva total no Brasil foi de 2.057,8 m<sup>3</sup>/s. A vazão efetivamente consumida foi de 1.081,3 m<sup>3</sup>/s. A Tabela 2 apresenta um resumo com os usos consuntivos e suas respectivas porcentagens no Brasil para o ano de 2017.

Tabela 2 - Usos consuntivos no Brasil no ano 2017	
Usos Consuntivos	Consumo (%)
Irrigação	46,2
Abastecimento humano urbano	23,3
Industrial	9,2
Animal	7,9
Abastecimento humano rural	1,6
Mineração	1,6
Termelétricas	10,3

Fonte: ANA (2017)

A urbanização, o desenvolvimento industrial e a agrícola são os principais fatores que geram aumento na demanda de água. Sabe-se que a urbanização é uma tendência mundial e, de acordo com Tucci (2010), em 2050, 70% da população estará distribuída em áreas urbanas, podendo chegar a 86% em regiões mais desenvolvidas.

Além dos usos consuntivos, existem também os não consuntivos, que são aqueles que não envolvem o consumo direto da água, como a geração de energia hidrelétrica, o lazer, a pesca e a navegação. Segundo ANA (2017), o Brasil possui uma matriz energética predominantemente baseada em fontes renováveis, com destaque para os recursos hídricos. A potência de geração de energia instalada no país era de 150,14 GW em 2016, sendo a geração hidrelétrica a maior contribuição em termos de fonte de energia, correspondendo a

64,5% da energia instalada. A segunda maior fonte são as termelétricas, sendo responsáveis por 27% da geração de energia no Brasil. As fontes eólicas e solares ainda representam uma pequena parcela, porém, em expansão (Tabela 3).

Tabela 3 - Matriz energética brasileira	
Matriz Elétrica	Geração de energia (%)
Hidroeletricidade	64,5
Termelétrica	27,4
Termonuclear	1,3
Eólica e solar	6,8

Fonte: ANA (2017)

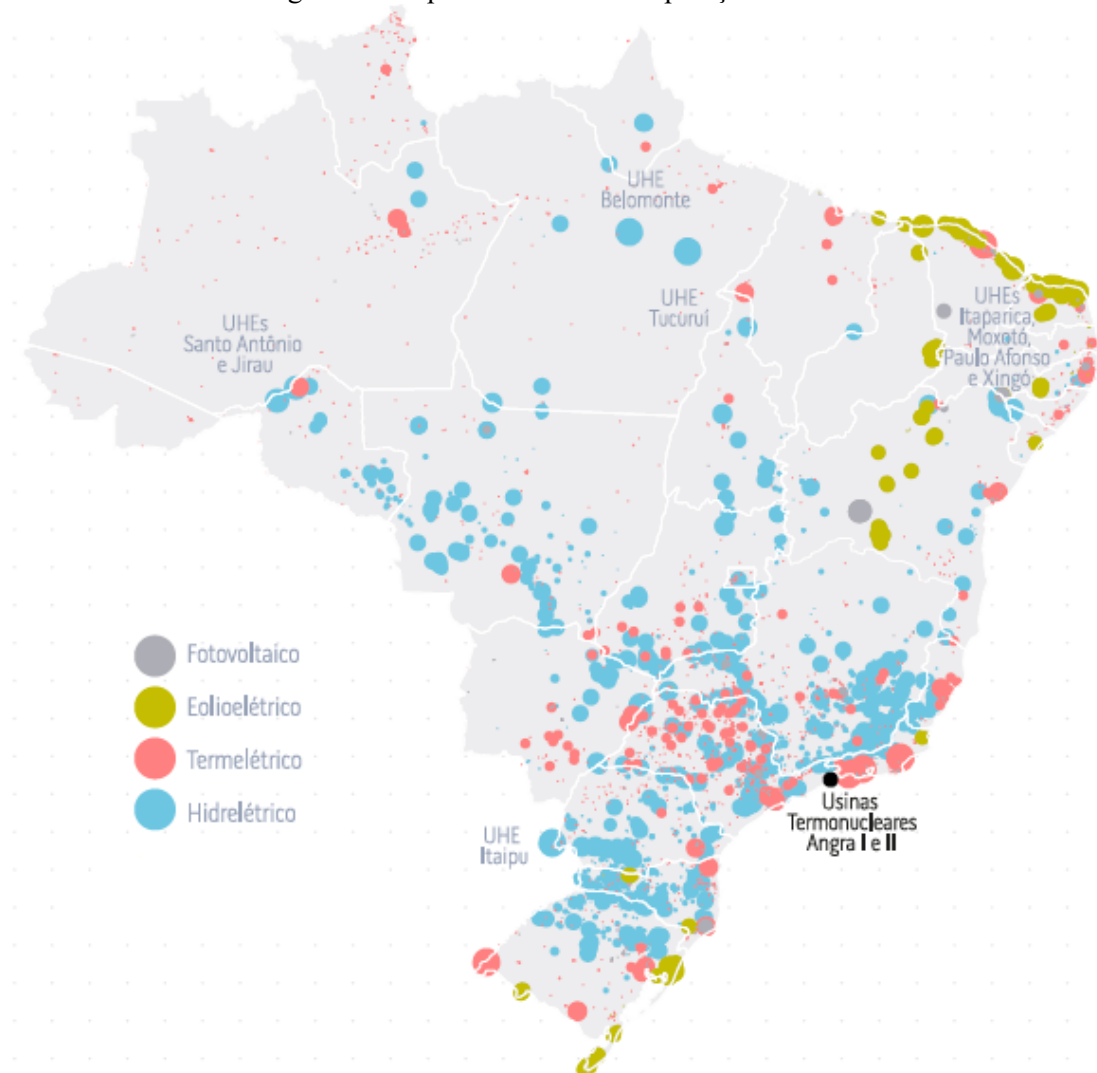
Ainda de acordo com ANA (2017), em 2016, existiam no Brasil 1.241 empreendimentos hidrelétricos em operação, sendo 581 centrais de geração hidrelétrica (CGH), 441 pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e 219 usinas hidrelétricas (UHE). Os dados da evolução da capacidade de produção de energia elétrica instalada no Brasil, considerada todas as fontes de energia, revelam um aumento de 9.864 MW em 2016 na capacidade total do sistema. A Figura 6 apresenta os empreendimentos em operação no Brasil. A variação do tamanho dos círculos é decorrente da potência do empreendimento.

Na bacia hidrográfica do rio São Marcos estão presentes duas Usinas Hidrelétricas. Segundo FURNAS (2018), a UHE Batalha, localizada entre os municípios de Cristalina (GO) e Paracatu (MG), tem capacidade instalada de 52,5 MW – energia suficiente para abastecer uma cidade de 130 mil habitantes. O empreendimento entrou em operação no ano de 2014 e gerou um reservatório com área de 138 km<sup>2</sup>.

Além de Batalha, existe também a UHE Serra do Facão, localizada no rio São Marcos entre os municípios de Davinópolis (GO) e Catalão (GO), já nas proximidades do exutório, e possui uma potência instalada de 212,58 MW, suficiente para abastecer uma demanda de energia de uma cidade de 1,2 milhões de habitantes. A usina foi inaugurada em outubro de 2010 e gerou um reservatório com área de 218,84 km<sup>2</sup> (FURNAS, 2018).



Figura 6 - Empreendimentos em operação no Brasil



Fonte: ANA (2017)

Diante deste fato, nota-se que, com o aumento da demanda por água, aumenta-se também a necessidade de planejamento e gestão hídrica, de modo a permitir o equilíbrio e a eficiência na resolução de conflitos, uma vez que a água se apresenta em quantidade limitada e a custos crescentes.

### 2.2.1 – Usos múltiplos da água na bacia hidrográfica do rio São Marcos

Os maiores conflitos pelo uso da água na bacia do rio São Marcos concentram-se nas demandas consuntivas para irrigação e nas demandas não-consuntivas para fins hidrelétricos. Existem duas centrais hidrelétricas (CH) em cascata em funcionamento no rio São Marcos (CH Batalha e Serra do Facão), com outorgas para reservação de água ao longo do ano. De

acordo com ANA (2010), entre os anos de 2013 e 2015, houve um acentuado aumento na área irrigada por pivôs centrais na bacia (82231 ha), que é quase 30% maior que a área estabelecida no Marco Regulatório para o ano de 2015.

Existem cerca de 1.005 pivôs de irrigação na bacia, que ocupam uma área de 87.670 hectares. O uso da agricultura irrigada por pivôs centrais nos Estados de Minas Gerais e Goiás aumentou cerca de 600 hectares em 1983 para aproximadamente 130 mil hectares em 2002 (GUIMARÃES et al., 2014).

O conflito pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos entre os irrigantes e a UHE Batalha se institui por meio do Artigo 1º da Resolução nº562/2010 (ANA, 2010a) da ANA, que estabeleceu o Marco Regulatório (MR), composto por um conjunto de regras gerais sobre o uso da água em uma bacia, que passa a valer como um marco referencial de regularização de seu uso e a partir da qual será desenvolvida a gestão dos seus recursos hídricos.

De acordo com Brunckhorst e Bias (2014), a principal diretriz estabelecida pelo MR foi a definição da vazão média anual disponibilizada para o consumo na bacia do São Marcos, a montante da UHE Batalha, no valor máximo de 8,7 m<sup>3</sup>/s. Para que essa marca fosse respeitada, definiu-se um limite de vazão média anual para cada Estado, ao qual está associado a uma área irrigada equivalente pelo método de pivô central (AIEPC), que representa a máxima vazão consumida, considerando variáveis climáticas da bacia e uma taxa de eficiência compatível com o método de pivô central (ANA, 2010a).

Em seguida, a vazão anual consumida foi recalculada para 8,63 m<sup>3</sup>/s (ANA, 2010b), valor que corresponde a AIEPC de 63.500 hectares, que deveria ser respeitada nas outorgas emitidas pelos órgãos envolvidos. Esta mesma resolução também prevê uma revisão do Marco Regulatório a cada cinco anos. A Tabela 4 apresenta os limites para os usos consuntivos de acordo com as resoluções da ANA.



Tabela 4 - Usos consuntivos segundo Resoluções ANA

Resoluções ANA	Ano/vazão (m³/s)						
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
nº 489/2008	1,62	2,08	2,69	3,49	4,53	5,89	7,67
Marco Regulatório (nº 562/2010)	-	-	-	-	-	-	8,7
Marco Regulatório (nº 564/2010)	7,59	8,63	9,62	10,62	11,62	12,62	13,61

Fonte: Brunckhorst e Bias (2014)

O uso da água para irrigação, entretanto, ocorre muitas vezes sob o descumprimento da legislação, conforme as normas de orientação da PNRH. Esse descumprimento decorre principalmente por falta de ações de controle e fiscalização, além da gestão ineficiente. Tem-se como exemplo a estimativa de que 56% dos usuários de pivôs centrais em Goiás estejam em situação irregular (SILVA, 2010).

### 2.3 Vazão ecológica

O crescimento na demanda de água para os diversos usos, tais como irrigação, abastecimento público, geração de energia elétrica, etc., contribui para a degradação do meio ambiente e em conflitos pelo uso da água. Segundo Pinto et al. (2016), a legislação brasileira adequa a gestão de recursos hídricos às heterogeneidades bióticas, entretanto a forma como sua integração é feita junto a gestão ambiental é defasada, pois ainda tem por base conceitos de vazões remanescentes, associadas às metodologias hidrológicas quantitativas, anteriores às metodologias ecológicas e ambientais atuais.

Em meio ao dilema entre preservar os ecossistemas aquáticos e a demanda para os diversos usos da água, surge um problema, por vezes complexo para a gestão dos recursos hídricos. Atualmente, o conflito entre captação de água e as necessidades da fauna e a flora aquáticas é uma realidade e, assim, uma questão fundamental a ser considerada por gestores dos recursos hídricos no mundo todo. Os métodos para determinação da vazão ecológica têm sido utilizados visando minimizar o impacto da captação de água nos recursos hídricos (SARMENTO, 2007).

Segundo Benetti, Lanna e Cobalchini (2003), a vazão ecológica é entendida como aquela necessária para garantir a manutenção e conservação de ecossistemas aquáticos naturais, após as retiradas para atender aos múltiplos usos dos recursos hídricos. Sarmento (2007) indica a existência de aproximadamente 207 metodologias, distribuídas em 44 países, para avaliação da vazão ecológica. Vestena et al. (2012) citam diferentes metodologias, sendo as principais fundamentadas em processos hidrológicos (séries temporais de vazões diárias ou mensais), hidráulicos (geometria hidráulica), habitats e holísticos. No Brasil, as autorizações de uso dos recursos hídricos são concedidas utilizando-se de um valor único de vazão ecológica, obtida geralmente por métodos hidrológicos que não consideram as limitações hídricas nos regimes naturais de vazões, como a variabilidade hidrológica e os padrões dos habitats (MEDEIROS et al. 2011).

Lanna e Benetti (2002) apresentam um resumo dos métodos de determinação da vazão ecológica, conforme classificados nos grupos (ver Tabela 5).

Tabela 5 - Métodos para determinação da vazão ecológica por grupos de classificação

<b>Grupo</b>	<b>Método</b>
<b>Modelos Hidrológicos</b>	Vazão $Q_{7,10}$
	Curva de Permanência de Vazões
	Vazão mínima anual de 7 dias
	Método de Tennant/Montana
	Método da Vazão Aquática de Base
	Método da Mediana das Vazões Mensais
	Método da Área de Drenagem
<b>Métodos Hidráulicos</b>	Método do Perímetro Molhado
	Método das Regressões Múltiplas
<b>Métodos de Classificação de Habitats</b>	Método Idaho
	Método do Dep. de Pesca de Washington
	Método IFIM
<b>Métodos Holísticos</b>	Método de construção de blocos (BBM)
<b>Outros Métodos</b>	Vazão de Pulso e de enchentes

Fonte: Lanna e Bennetti (2002)

Para Ribeiro e Lanna (2003), apesar dos diversos estudos realizados em relação à outorga de direito de uso da água, ainda existem muitos desafios a serem superados, sejam nos aspectos teóricos e de concepção ou nos aspectos práticos de operacionalização dos sistemas de outorgas. Dentre os desafios, os autores citam a definição do valor adequado para a vazão máxima outorgada, a falta de dados fluviométricos nas bacias hidrográficas, o

desconhecimento sobre usuários e respectivas demandas, as dificuldades na definição dos sistemas de outorgas dos recursos subterrâneos, o desenvolvimento de metodologias específicas para o estabelecimento dos valores adequados a serem outorgados como vazão ecológica, assim como de metodologias que integrem os aspectos quantitativos e qualitativos da outorga.

De acordo com a ANA (2011), as vazões de referência utilizadas para deferimento de usos da água no Brasil são baseadas em alguns métodos como: vazão média mínima de sete dias com período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ), vazões associadas às permanências de 95% e 90% e vazões médias de longo período ( $Q_{mlp}$ ).

Para se ter um entendimento melhor da vazão de referência  $Q_{7,10}$ , Von Sperling (2007) descreve como o valor anual da menor média de sete vazões diárias consecutivas que pode ser repetido, em média, uma vez a cada dez anos. Assim, em cada ano da série histórica, procede-se à análise de todas as médias diárias de vazão do ano, partindo do primeiro ao sétimo dia, posteriormente do segundo ao oitavo e assim sucessivamente. Tal processo é denominado de média móvel.

Cada Estado do Brasil estabelece critérios de outorga e direito de uso da água, ou seja, possui um método para a definição da vazão ecológica. A Tabela 6 apresenta um resumo dos critérios adotados por cada Estado da Federação.

Os corpos hídricos são bens públicos de uso comum BRASIL (2002), sob o domínio da União, dos Estados e do Distrito Federal (BRASIL, 1988), sendo assim qualquer pessoa física ou jurídica pode fazer o uso da água, desde que observe as normas administrativas vigentes. Para regular o uso da água, a União e todos os estados brasileiros estabeleceram políticas relacionadas aos recursos hídricos. Entretanto, quase todos os estados da região norte, que possuem a maior disponibilidade de recursos hídricos superficiais do Brasil, ainda não estabeleceram regras para concessão de direito ao uso da água.

Para a concessão de outorgas no Estado de Minas Gerais, segundo a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1.548/12, adota-se como vazão de referência para outorgas a fio de água, a vazão mínima com 7 dias de duração e 10 anos de recorrência ( $Q_{7,10}$ ), aplicando-se o percentual de 50% dessa vazão para maior parte do estado, e nas áreas declaradas de conflito pelo IGAM, aplica-se o percentual de 30% da mesma vazão de referência. Já o estado de Goiás, no qual a bacia hidrográfica do rio São Marcos também está inserida, segundo a Resolução nº 09/2005, adota-se como vazão de referência a vazão de 95% de permanência ( $Q_{95}$ ), e aplica-se o percentual de 70% dessa vazão.

Tabela 6 - Critérios adotados para concessão de outorga de captação de águas superficiais no Brasil

Domínio	Órgão gestor	Legislação que institui a política de recursos hídricos	Vazão máxima outorgável em cursos d'água superficiais	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
<b>União</b>	Agência Nacional de Águas (ANA)	Lei Nº 9.433/1997	70% da Q <sub>95</sub> podendo variar em função das peculiaridades de cada região. Sendo que para cada usuário individual, pode ser outorgado no máximo 20% da vazão outorgável. <sup>1</sup>	Não existe, em função das peculiaridades do País, podendo variar o critério. <sup>1</sup>	1,0 L s <sup>-1</sup>	Resolução ANA 542/2004 <sup>1</sup>
<b>Acre</b>	Instituto de Meio Ambiente do Acre (IMAC)	Lei Nº 1500/2003 <sup>2,5</sup>	-	-	-	-
<b>Alagoas</b>	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH)	Lei Nº 5.965/1997 <sup>6</sup>	90% da Q <sub>90reg</sub>	Decreto Estadual N.º 6/2001 <sup>7</sup>	1000 L h <sup>-1</sup> (0,28 L s <sup>-1</sup> )	Decreto Estadual Nº 6/2001 <sup>7</sup>
<b>Amapá</b>	Secretaria de Meio Ambiente do Amapá	Lei 686/2002 <sup>1,8</sup>	-	-	-	-
<b>Amazonas</b>	Secretaria de Mineração, Geodiversidade e Recursos Hídricos (SEMGRH)	Lei nº 2.712/2001 <sup>1</sup>	-	-	-	-
<b>Bahia</b>	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA-BA)	Lei Nº 11.612/2009 <sup>9</sup>	80% da Q <sub>90</sub>	Decreto Estadual Nº 6.296/97 <sup>10</sup>	0,5 L s <sup>-1</sup>	Decreto Estadual Nº 6.296/97 <sup>10</sup>
<b>Ceará</b>	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH-CE)	Lei Nº 14.844/2010 <sup>1,11</sup>	90% da Q <sub>90reg</sub>	Decreto Estadual Nº 23.067/94 <sup>12</sup>	2,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,56 L s <sup>-1</sup> – para águas superficiais e subterrânea)	Decreto Estadual Nº 23.067/94 <sup>12</sup>
<b>Distrito Federal</b>	Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal (ADASA-DF)	Lei Nº 2.725/2001 <sup>1,13</sup>	80% Q <sub>7,10</sub> , Q <sub>90</sub> ou Q <sub>ml</sub>	Decreto Nº 22.359/2001 <sup>14</sup>	1 L s <sup>-1</sup>	Decreto Distrital Nº 22.359/2001 <sup>14</sup>
<b>Espírito Santo</b>	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA-ES)	Lei Nº 5.818/1998 <sup>15</sup>	50% da Q <sub>7,10</sub> (exceto para os corpos de água na Região Hidrográfica do Rio Itaúnas, do Rio São Mateus, a vazão de referência a ser considerada é a Q <sub>90</sub> )	Instrução Normativa IEMA Nº 010/ 2007 <sup>16</sup>	1,5 L s <sup>-1</sup> (máximo 43200 L dia <sup>-1</sup> )	Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos CERH Nº 017/2007 <sup>16</sup>

Domínio	Órgão gestor	Legislação que institui a política de recursos hídricos	Vazão máxima outorgável em cursos d'água superficiais	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
<b>Goiás</b>	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH-GO)	Lei Nº 13.123/1997 <sup>17</sup>	70% da Q <sub>95</sub>	Resolução Nº 09/2005 <sup>17</sup>	Não estão ainda definidos	-
<b>Maranhão</b>	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais (SEMA-MA)	Lei Nº 8.149/2004 <sup>18</sup>	20% da Q <sub>90</sub>	Decreto Nº 27.845/2011 <sup>19</sup>	0,20 L s <sup>-1</sup>	Decreto Estadual Nº 27.845/2011 <sup>19</sup>
<b>Mato Grosso</b>	Secretaria de Estado de Meio Ambiente/Superintendência de Recursos Hídricos (SURH/SEMA)	Lei Nº 6.945/1997 <sup>1</sup>	70% da Q <sub>95</sub>	Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CEHIDRO) Nº 27/2009 <sup>20</sup>	0,25% da Q <sub>95</sub> para os cursos d'água com vazão de referência (Q <sub>95</sub> ) até 200 L s <sup>-1</sup> ; e até 0,5 L s <sup>-1</sup> para cursos d'água com vazão de referência (Q <sub>95</sub> ) superiores a 200 L s <sup>-1</sup>	Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CEHIDRO) Nº 27/2009 <sup>20</sup>
<b>Mato Grosso do Sul</b>	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL)	Lei Nº 2.406/2002 <sup>21</sup>	70% Q <sub>95</sub>	Resolução do Conselho estadual de recursos Hídricos CERH/MT Nº 25/2014 <sup>22</sup>	2,5 L s <sup>-1</sup> para derivações; 1,5 L s <sup>-1</sup> para captação por usuário; e 2,5 L s <sup>-1</sup> para atendimento a pequenas populações	Resolução do Conselho estadual de recursos Hídricos CERH/MT Nº 25/2014 <sup>22</sup>
<b>Minas Gerais</b>	Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM)	Lei Nº 13.199/1999 <sup>23</sup>	50% da Q <sub>7,10</sub> (30% da Q <sub>7,10</sub> nas bacias hidrográficas dos Rios Jequitai, Pacuí, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Pará, Paraopeba e Velhas, exceto as áreas destas bacias consideradas pelo IGAM como de conflito pelo uso da água, que será outorgado até o limite de 50% da Q <sub>7,10</sub> )	Resolução Conjunta SEMAD-IGAM Nº 1548/2012 <sup>24</sup>	1,0 L s <sup>-1</sup> para a maior parte do Estado e 0,5 L s <sup>-1</sup> para as regiões de escassez (águas superficiais)	Deliberação Normativa CERH - MG Nº 09, de 16 de junho de 2004 <sup>25</sup>
<b>Pará</b>	Secretaria de Estado de Meio Ambiente do Pará (SEMA-PA)	Lei Nº 6.381/2001 <sup>1</sup>	70% Q <sub>95</sub>	Diário Oficial Nº 31770/2010 Secretaria de Estado de Meio Ambiente Instrução Normativa Nº 55/2010 <sup>26</sup>	86 m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup> , com a vazão instantânea máxima de 1L s <sup>-1</sup> , para qualquer uso	Secretaria de Estado de Meio Ambiente Alteração da Resolução CERH N.º 09 /2009 <sup>27</sup>

Domínio	Órgão gestor	Legislação que institui a política de recursos hídricos	Vazão máxima outorgável em cursos d'água superficiais	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
<b>Paraíba</b>	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA-PB)	Lei N° 6.308/1996 <sup>1</sup>	90% da Q <sub>90reg</sub>	Decreto Estadual 19.260/1997 <sup>1</sup>	2,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,56 L s <sup>-1</sup> para águas superficiais e subterrâneas)	Decreto Estadual 19.260/1997 <sup>1</sup>
<b>Paraná</b>	Instituto das Águas do Paraná	Lei n° 12.726/1999 <sup>28</sup>	50% da Q <sub>95</sub>	Decreto Estadual 4646/2001 <sup>29</sup>	1,8 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,5 L s <sup>-1</sup> )	Instituto das águas do Paraná Portaria 006/2011 <sup>30</sup>
<b>Pernambuco</b>	Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC	Lei N.º 11.426/1997 <sup>1</sup>	80% Q <sub>90 2, 31</sub>	-	0,5 L s <sup>-1</sup> ou 43 m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup> (águas superficiais)	Decreto Estadual 20.423/98 <sup>32</sup>
<b>Piauí</b>	Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Piauí (SEMAR-PI)	Lei N° 5.165/2000 <sup>34</sup>	80% da Q <sub>95 2</sub>	-	-	-
<b>Rio Grande do Norte</b>	Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SERHID-RN)	Lei N° 6.908/1996 do Estado do Rio Grande do Norte <sup>1</sup>	90% da Q <sub>90reg</sub>	Decreto Estadual N° 13.283/97 <sup>35</sup>	1,0 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,28 L s <sup>-1</sup> )	Decreto Estadual N° 13.283/97 <sup>35</sup>
<b>Rio Grande do Sul</b>	Secretaria do Meio Ambiente do Rio Grande do Sul – SEMA-RS	Lei Estadual N° 10.350/1994 <sup>1</sup>	-	Não há ainda norma fixando essa vazão. <sup>4</sup>	Média mensal até 2,0 m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup> (águas subterrâneas)	Decreto Estadual 42047/2002 <sup>1</sup>
<b>Rio de Janeiro</b>	Instituto Estadual do Ambiente (INEA)	Lei 3239/1999 <sup>36</sup>	50% da Q <sub>7,10</sub>	Portaria da Superintendência Estadual de Rios e Lagoas (SERLA) N° 567/ 2007 <sup>37</sup>	0,4 L s <sup>-1</sup> e 34.560 L dia <sup>-1</sup>	Resolução do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) N° 63/2012 <sup>38</sup>
<b>Rondônia</b>	Secretaria de Estado de Desenvolvimento Ambiental (SEDAM)	Lei Complementar N° 255/2002 <sup>1</sup>	-	-	-	-

Domínio	Órgão gestor	Legislação que institui a política de recursos hídricos	Vazão máxima outorgável em cursos d'água superficiais	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
<b>Roraima</b>	Fundação Estadual do Meio Ambiente, Ciência e Tecnologia de Roraima – FEMACT <sup>39</sup>	Lei Nº 547/2006	80% da Q <sub>7,10</sub> ou Q <sub>90</sub> ou Q <sub>mlp</sub> , ou ainda, na ausência das anteriores, vazões instantâneas medidas pelo usuário pelo menos nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril que corresponde ao período seco no estado (no caso de abastecimento humano e dessedentação de animais, os limites poderão atingir até 90% da Q <sub>7,10</sub> )	Decreto nº 8.123/2007 <sup>40</sup>	1L s <sup>-1</sup>	Decreto nº 8.123/2007 <sup>40</sup>
<b>Santa Catarina</b>	Sistema de Informações de Recursos Hídricos do Estado de Santa Catarina (SIRHESC)	Lei Nº 9.748/1994 <sup>41</sup>	50% da Q <sub>98</sub>	Portaria SDS 036/08 - Critérios Gerais de Outorga alterada pela Portaria SDS nº 051/2008 <sup>42</sup>	1 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> (0,28 L s <sup>-1</sup> )	Portaria SDS 036/08 - Critérios Gerais de Outorga alterada pela Portaria SDS nº 051/2008 <sup>42</sup>
<b>São Paulo</b>	Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE)	Lei Nº 7.663/1991 <sup>43</sup>	50% da Q <sub>7,10</sub>	Lei Nº 9.034/1994 <sup>44</sup>	5 m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup>	Portaria DAEE nº 2292/2006 Retirada em 03/08/2012 <sup>45</sup>
<b>Sergipe</b>	Secretaria de Estado do Planejamento de Sergipe (SEPLAN/TEC/ SE)	LEI Nº 3.870/1997 <sup>46</sup>	90% da Q <sub>90</sub>	Resolução Nº 01/2001 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH/SE) <sup>47</sup>	2.500 L h <sup>-1</sup> , ou cerca de 0,7 L s <sup>-1</sup>	Resolução Nº 01/2001 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CONERH/SE) <sup>47</sup>
<b>Tocantins</b>	Instituto Natureza do Tocantins (NATURATINS)	Lei Nº 1.307/2002 <sup>1, 48</sup>	75% da Q <sub>90</sub>	Decreto Estadual Nº 2.432/2005 <sup>49</sup>	21,60 m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup>	Portaria NATURATINS Nº 118/2002 <sup>1</sup>

Fonte: Pinto (2015)

<sup>1</sup>(ANA, 2005) <sup>2</sup>(ANA, 2007) <sup>3</sup>(OLIVEIRA, IARA DE CASTRO E, 2013) <sup>4</sup>(GRANZIERA, 2013) <sup>5</sup>(ESTADO DO ACRE, 2003) <sup>6</sup>(ESTADO DE ALAGOAS, 1997) <sup>7</sup>(ESTADO DE ALAGOAS, 2001) <sup>8</sup>(ESTADO DO AMAPÁ, 2002) <sup>9</sup>(ESTADO DA BAHIA, 2009) <sup>10</sup>(ESTADO DA BAHIA, 1997) <sup>11</sup>(MATOS, 2012) <sup>12</sup>(ESTADO DO CEARÁ, 2010) <sup>13</sup>(DISTRITO FEDERAL, 2001b) <sup>14</sup>(DISTRITO FEDERAL, 2001a) <sup>15</sup>(ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 1998) <sup>16</sup>(IEMA, 2007) <sup>17</sup>(CERH/GO, 2012) <sup>18</sup>(ESTADO DO MARANHÃO, 2004) <sup>19</sup>(ESTADO DO MARANHÃO, 2011) <sup>20</sup>(CEHIDRO-MT, 2009) <sup>21</sup>(ESTADO DO MATO GROSSO DO SUL, 2002) <sup>22</sup>(CERH/MS, 2014) <sup>23</sup>(ESTADO DE MINAS GERAIS, 1999) <sup>24</sup>(IGAM, 2012) <sup>25</sup>(CERH/MG, 2004) <sup>26</sup>(SEMA/PA, 2010) <sup>27</sup>(CERH/PA, 2010) <sup>28</sup>(ESTADO DO PARANÁ, 1999) <sup>29</sup>(ESTADO DO PARANÁ, 2001) <sup>30</sup>(IAP, 2011) <sup>31</sup>(BENETTI; LANNA; COBALCHINI, 2003) <sup>32</sup>(ESTADO DE PERNAMBUCO, 1998) <sup>33</sup>(ESTADO DO PIAUÍ, 2000) <sup>34</sup>(ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE, 1997) <sup>35</sup>(ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1999) <sup>36</sup>(SERLA, 2007) <sup>37</sup>(INEA, 2012) <sup>38</sup>(INEA, 2012) <sup>39</sup>(ESTADO DE RORAIMA, 2006) <sup>40</sup>(ESTADO DE RORAIMA, 2007) <sup>41</sup>(ESTADO DE SANTA CATARINA, 1994) <sup>42</sup>(SDS/SC, 2008) <sup>43</sup>(ESTADO DE SÃO PAULO, 1991) <sup>44</sup>(ESTADO DE SÃO PAULO, 1994) <sup>45</sup>(DAEE, 2012) <sup>46</sup>(ESTADO DO SERGIPE, 1997) <sup>47</sup>(CONERH/SE, 2001) <sup>48</sup>(ESTADO DO TOCANTINS, 2002) <sup>49</sup>(ESTADO DO TOCANTINS, 2005)



Pruski et al. (2014) avaliaram o impacto da substituição das vazões de referência anuais pelas mensais no potencial de uso de água em uma sub-bacia do rio Paracatu. O emprego das vazões mensais em substituição às anuais representou um alto potencial para a melhoria das condições de uso dos recursos hídricos na bacia analisada. A substituição da vazão  $Q_{7,10}$  anual pela  $Q_{7,10}$  mensal correspondeu em aumentos no potencial de uso que variam de 10% nos meses de menor disponibilidade até valores que excedem os 200% nos meses de maior abundância dos recursos hídricos de superfície. A utilização da vazão  $Q_{95}$  mensal em substituição à  $Q_{95}$  anual resultou em variações do potencial que vão de reduções de até 37% nos meses de escassez até valores que excedem os 100% nos meses chuvosos. Assim, os resultados mostraram que o uso de vazões com bases mensais possibilita um aproveitamento mais racional e segura dos recursos hídricos.

Vestena et al. (2012) estimaram a vazão ecológica e avaliaram a disponibilidade hídrica em um trecho do rio das Pedras, na cidade de Guarapuava, Estado do Paraná, aplicando diferentes métodos empregados no Brasil para obtenção da vazão ecológica. Os autores usaram os métodos de média mínima de sete dias com período de retorno de dez anos, vazões associadas às permanências de 95% e 90% e vazão aquática de base. No trecho avaliado, a relação entre a vazão diária e o volume outorgado indicou a ineficiência dos métodos avaliados na determinação da vazão ecológica, não garantindo o volume mínimo de água necessário à conservação do ecossistema fluvial da região.

Paulo (2007) utilizou o Método do Perímetro Molhado com base no programa computacional HEC-RAS para simulação da variação da vazão. O autor observou que esse método definiu um valor de vazão ecológica maior do que os métodos usualmente utilizados, como o Método de Tennant e o da Curva de Permanência. Além disso, associou a quantidade e diversidade de peixes presentes no trecho de vazão reduzida estudado com a vazão e o perímetro molhado das seções e concluiu que não se pode afirmar que a aplicação do método é uma alternativa adequada para a determinação da vazão ecológica.

## 2.4 Sistema de suporte à decisão em recursos hídricos

Com o crescimento desenfreado da população no último século, principalmente nos países em desenvolvimento e, ao mesmo tempo, o descaso com a manutenção e preservação dos recursos hídricos vêm causando uma grande pressão devido a sua utilização, tanto no aspecto quantitativo quanto qualitativo. Nesse contexto, diversas ferramentas foram desenvolvidas afim de proporcionar uma alternativa aos gestores públicos no sentido de gerenciar os recursos e auxiliar na tomada de decisões. Salla e Chuerubim (2014) citam ferramentas de auxílio ao planejamento e gestão dos recursos hídricos em escala de bacia hidrográfica e ressaltam que tais ferramentas sofreram significativos avanços na capacidade de tomada de decisões nos últimos tempos.

Os modelos de simulação procuram representar um sistema físico e prever seu comportamento sob determinadas condições, não necessitando, praticamente, de nenhuma exigência quanto à natureza do problema, a não ser a de que ele possa ser formulado matematicamente (VIEIRA & CURI, 2016). Os métodos de otimização e simulação são representados por equações matemáticas formadas por variáveis de decisão, mas possuem diferenças na forma em que o algoritmo é utilizado. Em modelos de otimização, o algoritmo pode ser resumido em uma função objetivo, onde os processos iterativos buscam minimizá-la ou maximizá-la, de acordo com as restrições impostas (JHUNIOR, 2017).

A sequência traz uma descrição da ferramenta computacional AQUATOOL, que atua como um Sistema de Suporte à Decisão e que foi utilizada neste estudo.

### 2.4.1 AQUATOOL

Segundo Pedro-Monzonís et al. (2016), a ferramenta computacional AQUATOOL atua como um sistema suporte à decisão em recurso hídricos. Foi elaborada para o planejamento e tomada de decisões associadas às bacias hidrográficas complexas que compreendem múltiplos reservatórios, aquíferos e centros de demanda. Em termos gerais, é uma interface para edição, simulação, revisão e análise de modelos de simulação para manejo de bacias hidrográficas, incluindo a simulação da qualidade da água. Os módulos da ferramenta

permitem que qualquer sistema de recursos hídricos seja representado em forma gráfica. Andreu, Capilla e Sanchís (1996) utilizaram o modelo como estudos de caso nas fases de desenvolvimento e validação nas bacias hidrográficas dos rios Segura e Tejo, na Espanha. A bacia hidrográfica do rio Seguro está localizada no sudeste da Espanha e possui um clima semi-árido, com grandes demandas para agricultura, abastecimento urbano e industrial. O estudo foi feito buscando a otimização dos recursos hídricos, visando melhorar o atendimento de todas as demandas locais.

Salla et al. (2014) utilizaram esta ferramenta na bacia hidrográfica do rio Uberabinha, localizada no município de Uberlândia-MG, incluindo os modelos de quantidade e qualidade da água. As simulações foram bastante satisfatórias, possibilitando indicar possíveis mudanças no planejamento e gestão da bacia hidrográfica analisada, no intuito de atender as demandas para abastecimento público e também para manter os padrões de qualidade da água impostos pela legislação ambiental.

Sulis e Sechi (2013) utilizaram a ferramenta para um estudo no sul da Itália, local que é acometido frequentemente por secas ao longo das últimas décadas. Os autores aplicaram algumas ferramentas de simulação hídrica em um sistema com vários reservatórios e usos diversos da água. Entre as ferramentas avaliadas, o AQUATOOL permitiu trabalhar de forma mais ampla as questões relacionadas aos reservatórios.

Ferreira (2014) utilizou a ferramenta no baixo e médio curso do rio Uberaba, localizado na cidade de Uberaba em Minas Gerais, para estimar a capacidade de autodepuração deste curso de água. Segundo a autora, a ferramenta possibilitará que a equipe da autarquia da cidade utilize a topologia do modelo para analisar os diferentes aspectos de gestão e planejamento na bacia hidrográfica do rio Uberaba.

JHUNIOR (2017) utilizou o AQUATOOL na otimização do aproveitamento hídrico superficial na bacia do rio Araguari, Triângulo Mineiro. O autor avaliou critérios sazonais para a estimativa da vazão  $Q_{7,10}$  frente ao critério utilizado atualmente pelo Estado de Minas Gerais (50% da  $Q_{7,10}$ ). Os resultados apontaram para um aumento da vazão disponível considerando a sazonalidade dos regimes fluviométricos. Verificou também que o aumento

de 50% para 70% da  $Q_{7,10}$  teve o maior impacto na disponibilidade para captação e na solução para os conflitos da água na bacia hidrográfica.

Paredes- Arquiola et al. (2010b) utilizaram a ferramenta na bacia hidrográfica do rio Júcar, na Espanha. Esta bacia apresenta uma elevada demanda de água e sérios problemas relacionados a poluição pontual e difusa. As simulações foram realizadas utilizando os módulos SIMGES (simulações quantitativas) e GESCAL (simulações qualitativas). Os autores relatam sobre a facilidade em utilizar a ferramenta, bem como a apresentação e análise dos resultados.

Costa (2015) abordou sobre as alternativas de otimização do aproveitamento hídrico superficial na Área de Proteção Ambiental (APA), no alto curso do rio Uberaba, por meio da ferramenta AQUATOOL. Os resultados indicaram a necessidade de implantação de um reservatório de acumulação para suprir o déficit no abastecimento público da cidade de Uberaba – MG.

O modelo OPTIGES do AQUATOOL possibilita um estudo mais aprofundado de otimização dos recursos hídricos. Ele acrescenta a possibilidade de o usuário impor pesos e prioridades se necessário, para garantir o atendimento de todas as demandas.

O módulo OPTIGES destina-se a distribuir os recursos hídricos entre os diferentes tipos de demandas, cumprindo os seguintes critérios: respeito dos fluxos ecológicos nos cursos naturais, podendo se basear em legislações ambientais; distribuição dos recursos hídricos disponíveis entre os diferentes tipos de demanda, de acordo com a ordem de prioridade, visando compartilhar os déficits em períodos de escassez; e armazenar o maior volume possível de água em reservatórios, uma vez que os dois primeiros critérios sejam atendidos (PELLICER-MARTÍNEZ & MARTÍNEZ-PAZ, 2016).

De acordo com o manual do usuário do AQUATOOL, são descritas a seguir algumas características da ferramenta computacional:

- Possui uma interface amigável para o desenvolvimento ou edição dos modelos;

- Possibilidade de executar um esquema simplificado do sistema, para que seja constituído pelos elementos contemplados no modelo;
- Inserção de dados físicos no sistema, como capacidade de reservatórios e canais, demandas e vazões de entrada, qualidade da água entre outros;
- Utilizado para qualquer esquema de recursos hídricos, com simulações realizadas mensalmente;
- Tem a possibilidade de obter os resultados de diferentes formas, como relatórios escritos, tabelas e gráficos;

O módulo OPTIGES do AQUATOOL possibilita, além das análises citadas anteriormente, um estudo mais aprofundado de otimização de recursos hídricos. O módulo acrescenta a possibilidade de o usuário impor pesos a cada um dos objetivos do sistema de simulação e assim definir prioridades, no caso de não ser possível garantir a sua totalidade.

# CAPÍTULO 3

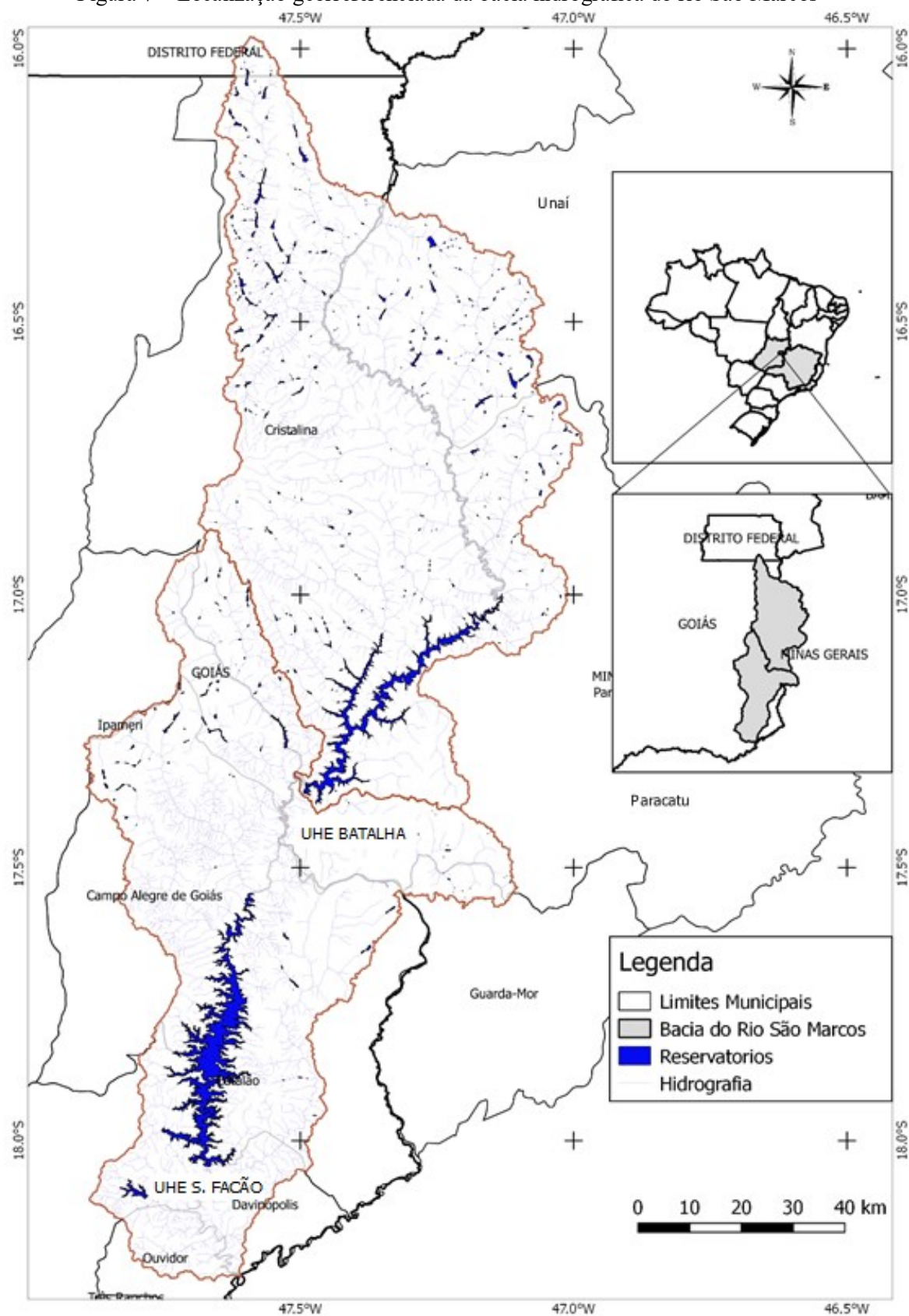
## MATERIAIS E MÉTODOS

A sequência traz as características da área de estudo, o levantamento dos dados fluviométricos, pluviométricos, batimétricos, vazões consuntivas e não consuntivas outorgadas e uso e ocupação do solo, além do método para regionalização de vazão e o cálculo da vazão específica. Para a análise de otimização em si foi indispensável o estudo aprofundado do módulo OPTIGES do AQUATOOL, conhecendo as ferramentas oferecidas, assim como os métodos e equacionamentos nele embutidos. Além disso, o levantamento dos volumes captados e a estimativa dos valores máximos outorgáveis foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

### 3.1 Área de Estudo

A bacia do rio São Marcos está localizada na região central do Brasil, inserida na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, abrangendo os estados de Goiás e Minas Gerais e o Distrito Federal, entre as coordenadas UTM 192.908 e 288.342 E, 7979326 e 8231498 N, fuso 23S e área de aproximadamente 1.208.575 ha, sendo 0,6% pertencente ao Distrito Federal, 71,9% ao estado de Goiás e 27,5% em Minas Gerais. A bacia hidrográfica possui uma população residente próximo de 366 mil habitantes. O rio São Marcos é um rio da união e um dos principais tributários da margem direita do rio Paranaíba e, desde sua nascente até o encontro com o rio Paranaíba percorre uma distância de cerca de 480 km (SILVA; HORA, 2015). É formada por dez municípios sendo Campo Alegre de Goiás, Catalão, Cristalina, Davinópolis, Ipameri, Ouvidor e Três Ranchos, localizados no estado de Goiás e os municípios Guarda-Mor, Paracatu e Unaí no Estado de Minas Gerais. A Figura 7 apresenta a localização georreferenciada da bacia hidrográfica do rio São Marcos.

Figura 7 – Localização georreferenciada da bacia hidrográfica do rio São Marcos



Fonte: Autor (2019).

Na bacia hidrográfica do rio São Marcos predomina o clima tropical úmido, com períodos secos e úmidos bem definidos durante o ano. Os verões são normalmente chuvosos e os invernos secos. O período chuvoso ocorre nos meses de novembro, dezembro e janeiro, enquanto a duração do período seco varia de 4 a 6 meses compreendendo, principalmente, os meses de junho, julho, agosto e setembro. A precipitação anual média na bacia é de aproximadamente 1.426 mm, variando entre 1330 e 1550 mm. A evapotranspiração anual média na bacia é de cerca de 900 mm (SILVA; HORA, 2015).

As temperaturas médias anuais na bacia variam entre 18 e 22 °C, sendo o trimestre mais quente correspondente aos meses de janeiro, fevereiro e março, com temperaturas máximas de até 37 °C, e o trimestre mais frio corresponde aos meses de maio, junho e julho, com temperaturas mínimas podendo chegar a 0 °C (PCE et al., 2005b)

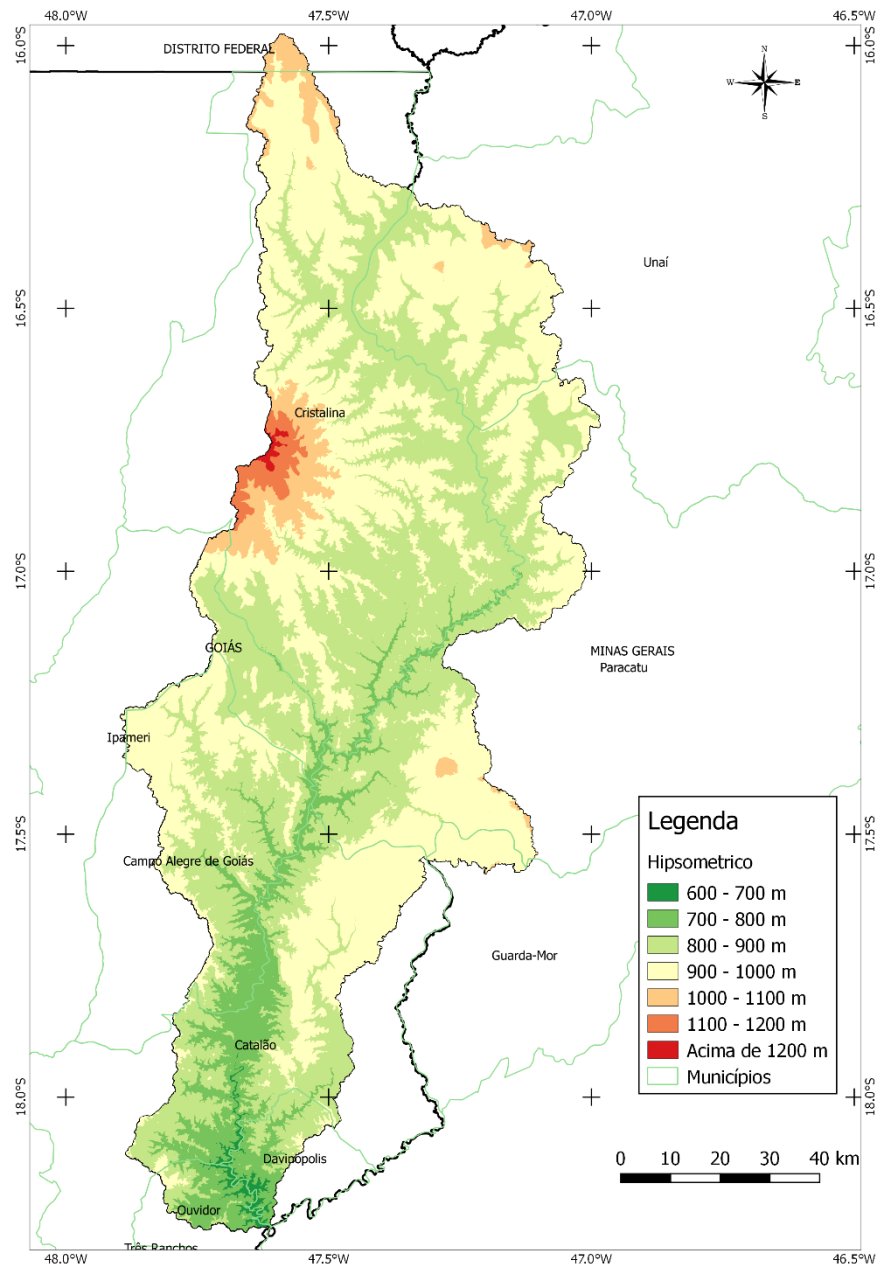
As águas da bacia do rio São Marcos, de forma geral, apresentam boa qualidade, enquadrando-se nas Classes 1 e 2 dos padrões estabelecidos para as águas doces, de acordo com a Resolução CONAMA N°357/05. A inexistência de grandes aglomerados urbanos na bacia certamente contribui para esta situação. Entretanto, a agricultura intensiva, praticada em vários pontos da bacia, sugere a necessidade de se realizar levantamentos e de se monitorar a presença de agrotóxicos em suas águas (BRASIL, 2011).

A taxa anual de crescimento populacional, entre 2000 e 2010, foi superior à média nacional de 1,16% em todas as Unidades de Gestão Hídricas - UGHs, sendo as UGHs São Marcos e Claro, Verde, Correntes e Apuré apresentaram as maiores taxas no período. A UGH São Marcos teve uma taxa anual de crescimento de 2,45%, segundo o IBGE (2010), tendo os índices de abastecimento de água 99,5%, de coleta de esgoto de 34,5% e tratamento deste de 27,6%, para uma população de menos de 200 mil habitantes.

A Figura 8 apresenta o mapa altimétrico na bacia hidrográfica do rio São Marcos, cujas altitudes variam entre 600 a 1200 m.



Figura 8 - Altimetria na bacia hidrográfica do rio São Marcos

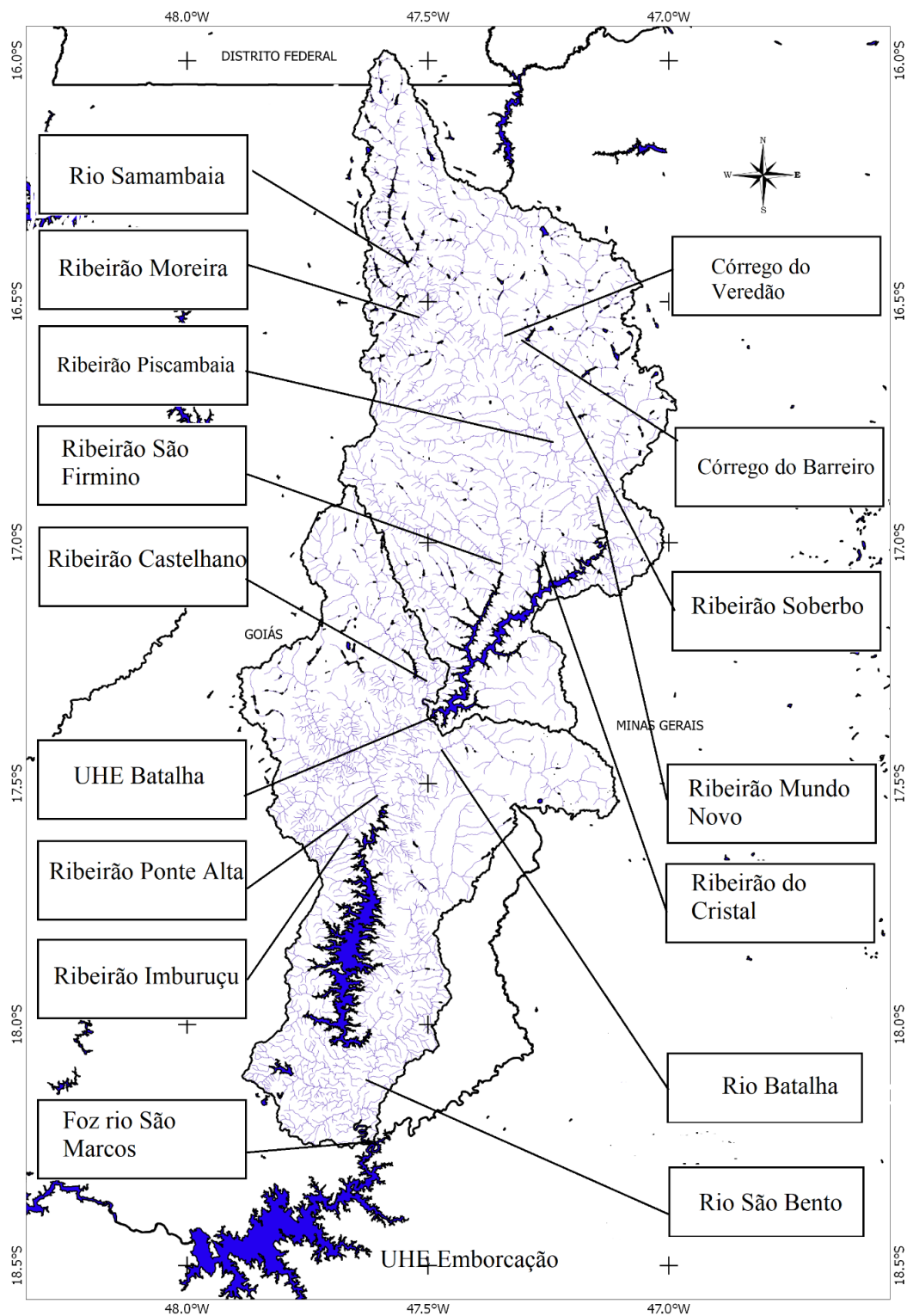


Fonte: Autor (2019).

Os principais afluentes do rio São Marcos são o rio São Bento e os ribeirões Soberbo, Mundo Novo e da Batalha, Imburuçu, Ponte Alta, Castelhana, São Firmino, do Cristal, Piscambaia e Samambaia (Figura 9). Desde as nascentes do ribeirão Samambaia (ponto extremo mais ao norte) até a foz do São Marcos (ponto extremo mais ao sul), a bacia hidrográfica do rio São Marcos possui um relevo bastante heterogêneo, nos trechos superior e médio superior o relevo é plano a ondulado, em contraste com o trecho médio inferior e parte do inferior,

caracterizado pelo relevo acidentado e montanhoso. Junto ao remanso do reservatório da UHE Emborcação, em seu trecho final, o relevo passa a ser fracamente acidentado.

Figura 9 - Principais afluentes do rio São Marcos



Fonte: Autor (2019)

Inserida no bioma cerrado, a bacia hidrográfica do rio São Marcos apresenta vegetação variando de campos limpos até cerradões, relativamente mais densos (SILVA; HORA, 2015). Na Figura 10 é possível observar a vegetação nativa ainda remanescente, identificada com Cerrado. Cabe destacar que os maiores índices de cobertura vegetal nas Unidades de Gestão Hídrica (UGHs) São Marcos e Corumbá devem-se especialmente à presença de amplos terrenos com maior declividade, estando também mais suscetíveis aos processos de erosão e assoreamento (ANA, 2014). Ainda na Figura 10 é possível inferir que, na bacia do São Marcos, a manutenção da vegetação nativa se dá, principalmente, nos locais onde o relevo dificulta ou impede a utilização econômica do território, assim como acontece na maioria das áreas ocupadas pelo homem no Brasil. O uso do solo para lavoura e pastagem soma mais de 56% do total da área da bacia hidrográfica (Tabela 7). A Figura 11 apresenta as porcentagens dos usos do solo na bacia hidrográfica do rio São Marcos.

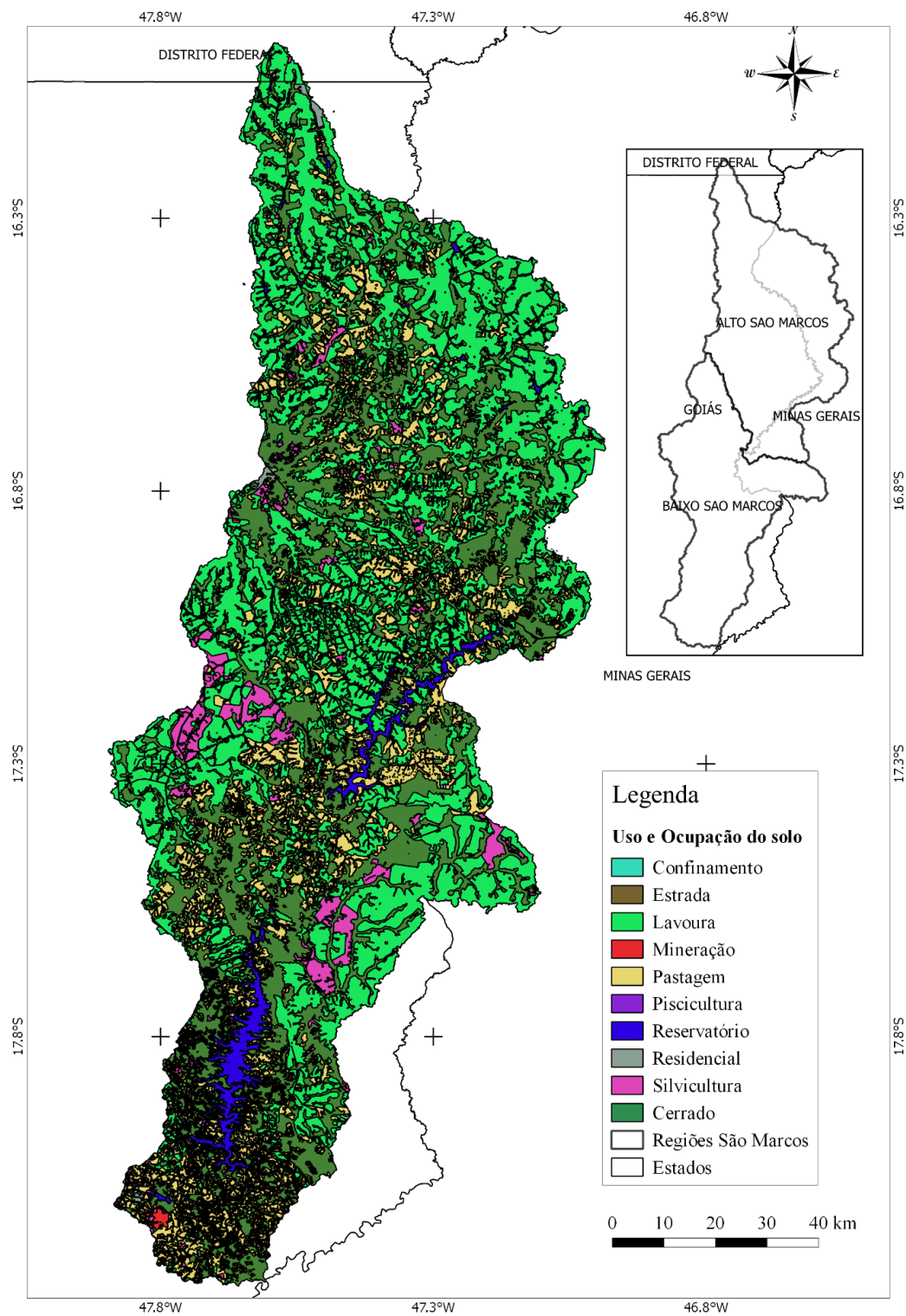
De acordo com o CBH – Paranaíba (2013), a análise do solo na UGH São Marcos revela o predomínio de cambissolos (45% da superfície), seguidos por latossolos (38%) e podzólicos (9%). Outros tipos de solos, incluindo ocorrências de petroplintossolo, terra roxa e litólico, somam apenas 8% da área. A forte presença de cambissolos na bacia hidrográfica caracteriza uma redução na aptidão agrícola dos solos, pois são pouco desenvolvidos, pouco profundos e, muitas vezes, cascalhentos. Em regiões de cerrado, não costumam ser muito férteis.

A maior parte dos solos, que corresponde a 32% da superfície, é apta para pastagem natural. As terras com aptidão regular para lavoura correspondem a 29% e estão distribuídas principalmente na porção central e norte da bacia hidrográfica. Existem ainda 15% de solos com aptidão restrita para lavoura, 13% para pastagem plantada e 7% de terras com boa aptidão para lavoura. Os solos inaptos para agricultura são pouco expressivos (3%) (CBH – Paranaíba, 2013).

Segundo Hora (2015), apesar da região não possuir solos muito férteis, a aplicação de novas estratégias e tecnologias implantadas (sementes, forma de plantio, manejo físico e químico dos solos, irrigação, etc.) possibilitaram significativos aumentos na produtividade nos cerrados, como o caso da bacia hidrográfica do rio São Marcos, onde o clima e

principalmente o relevo, mostraram-se extremamente favoráveis à prática de uma agricultura moderna, com alto grau de tecnificação.

Figura 10 - Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio São Marcos

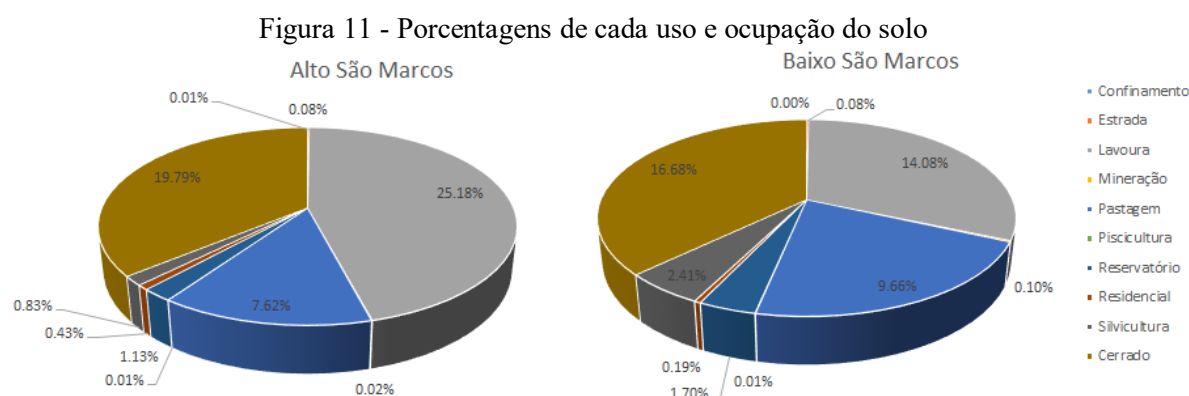


Fonte: Autor (2019).

Tabela 7 - Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio São Marcos

Local	Uso do Solo	Área (km <sup>2</sup> )	% do total
Alto São Marcos	Confinamento	0,66	0,01
	Estrada	9,64	0,08
	Lavoura	3048,61	25,18
	Mineração	2,39	0,02
	Pastagem	923,17	7,62
	Piscicultura	0,69	0,01
	Reservatório	136,37	1,13
	Residencial	52,44	0,43
	Silvicultura	100,21	0,83
	Cerrado	2396,21	19,79
Baixo São Marcos	Confinamento	0,03	0,00
	Estrada	9,64	0,08
	Lavoura	1705,26	14,08
	Mineração	11,54	0,10
	Pastagem	1169,79	9,66
	Piscicultura	1,19	0,01
	Reservatório	205,72	1,70
	Residencial	23,28	0,19
	Silvicultura	291,50	2,41
	Cerrado	2019,58	16,68

Fonte: Autor (2019).



Fonte: Autor (2019).

### 3.1.1 Delimitação da bacia hidrográfica

Para que seja possível executar o gerenciamento dos recursos hídricos é necessário, primeiramente, conhecer os limites da região de estudo. Objetivando o aperfeiçoamento desta etapa, o processo de delimitação automática de bacias hidrográficas tem sido implantado em SIG, que permite tal delimitação com maior rapidez e facilidade.

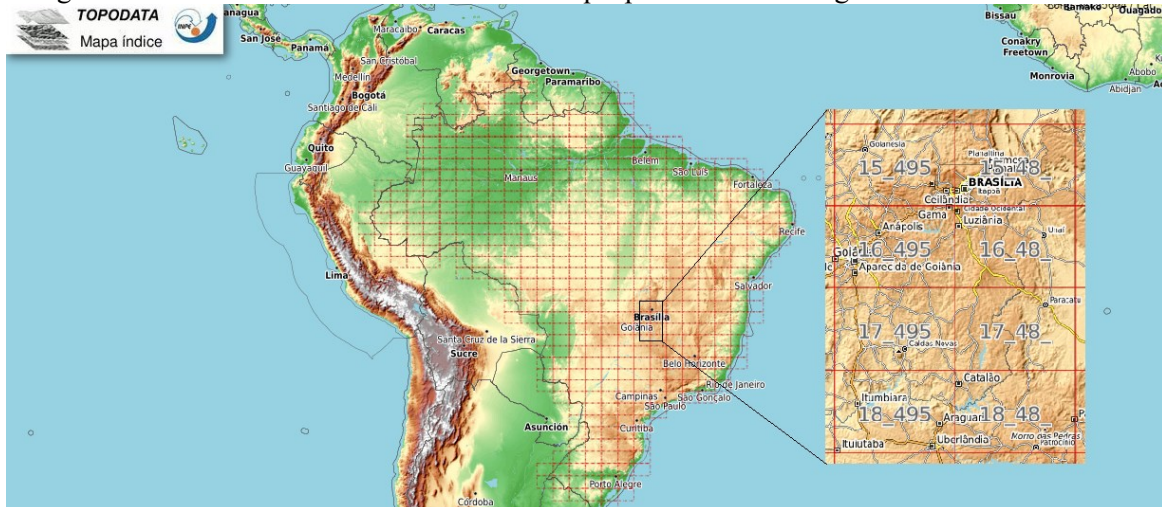
Para Alves Sobrinho et al. (2010), a delimitação adequada de bacias hidrográficas é fundamental por ser essa a unidade territorial que é utilizada para planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. A automatização da delimitação de bacias hidrográficas por meio de dados SRTM e ambiente SIG apresenta-se vantajosa em relação ao custo benefício, além de estabelecer a padronização do traçado e a minimização de conflitos quanto à fixação da unidade de gestão dos recursos hídricos.

Tucci (1993) menciona que o estudo da bacia hidrográfica permite analisar em detalhes a variação dos diferentes processos que nela ocorrem, sendo possível entender melhor os fenômenos e procurar representá-la matematicamente, com base no registro de variáveis hidrológicas. Isso porque a bacia hidrográfica possui características essenciais que permitem a integração multidisciplinar entre diferentes sistemas de gerenciamento, estudo e atividade ambiental, especialmente por ser um processo descentralizado de conservação e proteção do ambiente.

O processo de delimitação da bacia hidrográfica do rio São Marcos foi realizado utilizando a ferramenta computacional de uso livre QGIS. Para tanto, é necessário o Modelo de Elevação Digital (MDE) ou Modelo Digital do Terreno (MDT) da região, para que seja possível extrair dados como hidrografia, hidrometria e declividade da bacia hidrográfica. O MDE é disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os dados geomorfométricos disponibilizados pelo INPE estão estruturados em quadrículos, compatíveis com a articulação 1:250.000, conforme apresenta a Figura 12.



Figura 12 - Folhas do TOPODATA com destaque para a bacia hidrográfica do rio São Marcos



Fonte: Inpe (2017)

Para o caso da bacia hidrográfica do rio São Marcos, foram utilizadas as folhas 15S48\_ZN, 15S495ZN, 16S48\_ZN, 16S495ZN, 17S48\_ZN, 17S495ZN, 18S48\_ZN e 18S495ZN. Com as cartas inseridas no QGIS, foi feito um mosaico utilizando a opção “miscelânea”, na janela “*raster*”, que possibilita a união de todas as cartas topográficas em apenas uma, com a mesma referência. Após a criação do mosaico, utiliza-se uma camada vetorial como “máscara”, ou seja, ela servirá como delimitador para o corte do mosaico. A camada vetorial foi obtida junto ao site da ANA. Tanto o mosaico quanto a camada vetorial devem estar no mesmo sistema de coordenadas geográficas. Utilizando a opção “extrair” e “recorte”, obtém-se o mosaico delimitado. A Figura 13 apresenta a criação do mosaico e, posteriormente, o recorte feito para a região de estudo.

Figura 13 - Mosaico do MDE



Fonte: Autor (2019).

Com o mosaico executado, é feita a correção dos pixels (preenchimento de falhas), visto que o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) possui falhas. A opção de preenchimento de falhas é uma ferramenta que pertence ao SAGA, que é um *software* de SIG e pode ser combinado ao QGIS, e é chamada de *Filled* e tem a função de reduzir os erros de sombreamento das imagens.

A partir de ferramentas de processamento do QGIS, utiliza-se o algoritmo *r.watershed*, que calcula os parâmetros hidrológicos. Este algoritmo precisa de dados de elevação e são requeridos por meio do SRTM utilizado. A parte principal dessa etapa é definir o tamanho mínimo da bacia hidrográfica, que foi feito por tentativa e erro.

Na camada *half-basins* formada do QGIS, é possível visualizar diversas micro bacias da área selecionada. Com esta camada selecionada, por meio da opção do Grass *r.to.vect*, faz-se a conversão de *raster* para camada vetorial, sendo a entrada a própria camada. O tipo de polígono é área, com a seleção da opção *smooth corners of area features* para que a área seja detalhada. É importante conhecer a direção da drenagem na camada *Drainage Direction*.

Outra opção utilizada nesse procedimento, para definir o ponto exutório da bacia hidrográfica, foi o algoritmo *r.water.outlet*. O raster de entrada é *Drainage Direction* (resultado do algoritmo *r.watershed* utilizado anteriormente). Deve-se determinar o ponto do exutório da bacia hidrográfica, que pode ser obtida pela ferramenta a partir da captura de coordenadas, e em seguida, executa-se o processo. Forma-se então a bacia do rio São Marcos como vetor, que será utilizado para camada de recorte dos dados obtidos e trabalhados.

### 3.2 Dados climatológicos e fluviométricos

Os dados históricos fluviométricos das estações de monitoramento e das centrais hidrelétricas de Batalha e Serra do Facão (vazões turbinadas e vertentes) foram disponibilizados por FURNAS. É importante salientar que as vazões vertidas e turbinadas nos reservatórios de Batalha e Serra do Facão foram utilizadas na estimativa das séries sintéticas de vazão nas sub-bacias afluentes ao rio São Marcos, por meio do método de descarga específica.



Apesar do cadastro de diversas estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio São Marcos, várias delas não operam devido à construção dos reservatórios na região. Algumas estações foram monitoradas até o ano de 2007, quando iniciou a construção da UHE Serra do Facão. Foram implantadas novas estações de monitoramento, porém grande parte iniciou a operação apenas em 2015. Portanto, optou-se por uma série histórica pequena, entre outubro de 2014 até setembro de 2017, utilizando as vazões de afluência e defluência dos reservatórios. A Tabela 8 mostra um resumo de todas as estações presentes na área de estudo e a disponibilidade de dados de cada uma delas.

Tabela 8 - Estações de monitoramento na bacia hidrográfica do rio São Marcos

<b>Código</b>	<b>Nome da Estação</b>	<b>Operadora</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Disponibilidade de dados</b>
<b>60018000</b>	Fazenda Batista	ANA	-16,42	-47,62	1978 - 1980
<b>60018500</b>	UHE Batalha Montante 2	FURNAS	-16,51	-47,45	2016 - 2018
<b>60018800</b>	UHE Batalha Montante 1	FURNAS	-16,76	-47,23	2016 – 2018
<b>60019000</b>	Rio Samambaia	ADASA	-16,07	-47,60	2009 – 2014
<b>60020000</b>	Ponte São Marcos	ANA	-17,03	-47,16	1966 – 2007
<b>60020100</b>	Cristalina	IGAM	-17,04	-47,17	Apenas Qualidade
<b>60020200</b>	UHE Batalha Reservatório 2	FURNAS	-17,34	-47,26	Apenas Qualidade
<b>60020300</b>	UHE Batalha Reservatório 1	FURNAS	-17,34	-47,48	Apenas Qualidade
<b>60020400</b>	UHE Batalha Barramento	FURNAS	-17,34	-47,49	2016 – 2018
<b>60020500</b>	UHE Serra do Facão Montante	SEFAC	-17,34	-47,50	2015 – 2018
<b>60020700</b>	Ribeirão da Batalha	IGAM	-17,45	-47,35	Apenas Qualidade
<b>60021080</b>	CGH Batalha	Agrorossato	-17,44	-47,35	Sem dados
<b>60022000</b>	UHE Serra do Facão Batalha	SEFAC	-17,43	-47,46	2015 - 2018
<b>60023000</b>	PCH Lago Azul Montante	LAGO AZUL	-17,20	-47,58	2017
<b>60024000</b>	PCH Lago Azul Barramento	LAGO AZUL	-17,28	-47,53	2017
<b>60025000</b>	PCH Lago Azul Jusante	LAGO AZUL	-17,28	-47,51	Sem dados
<b>60029000</b>	AHE Paulistas C-2	FURNAS	-17,47	-47,54	1986 – 2009

<b>Código</b>	<b>Nome da Estação</b>	<b>Operadora</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Disponibilidade de dados</b>
<b>60029080</b>	Paulistas	CEMIG	-17,49	-47,54	Sem dados
<b>60030000</b>	Campo Alegre de Goiás	ANA	-17,50	-47,56	1972 – 2007
<b>60035080</b>	Anta Gorda	CEMIG	-17,90	-47,67	Sem dados
<b>60038000</b>	UHE Serra do Facão Barramento	SEFAC	-18,04	-47,68	2012 - 2015
<b>60038100</b>	UHE Serra do Facão Jusante	SEFAC	-18,06	-47,67	2015 – 2018
<b>60038200</b>	UHE Emborcação Fazenda São Domingos	CEMIG	-18,10	-47,69	2015 – 2018
<b>60039910</b>	AHE Serra do Facão SF – 01	FURNAS	-18,07	-47,67	Desativada em 1987
<b>60039920</b>	AHE Serra do Facão SF – 02	FURNAS	-18,07	-47,67	Desativada em 2001
<b>60039930</b>	AHE Serra do Facão SF – 03	FURNAS	-18,09	-47,68	Desativada em 2001
<b>60039940</b>	AHE Serra do Facão SF – 04	FURNAS	-18,10	-47,68	Desativada em 2001
<b>60039950</b>	AHE Serra do Facão SF – 05	FURNAS	-18,10	-47,67	Desativada em 2001
<b>60039960</b>	AHE Serra do Facão SF – 06	FURNAS	-18,11	-47,69	Desativada em 2001
<b>60040000</b>	Fazenda São Domingos	ANA	-18,11	-47,69	Desativada em 2010
<b>60043000</b>	UHE Paraíso Jusante	Neoinvest	-18,13	-47,70	Sem dados
<b>60050000</b>	Davinópolis	ANA	-18,12	-47,62	1974 – 2006
<b>60060000</b>	Porto Jacinto	CEMIG	-18,17	-47,65	Desativada em 1982
-	Reservatório de Batalha	FURNAS	-	-	2014 - 2017
-	Reservatório da Serra do Facão	FURNAS	-	-	2014 - 2017

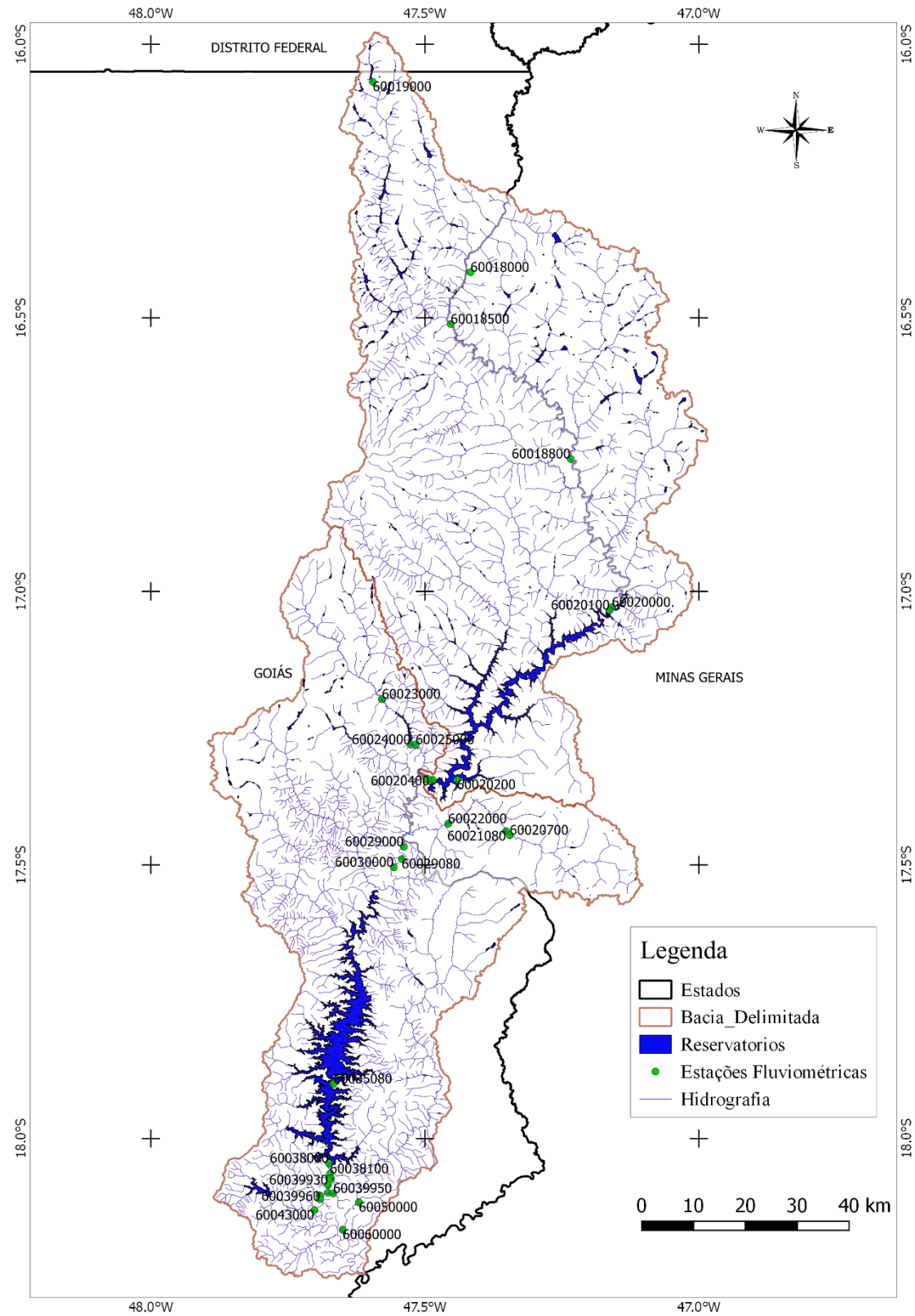
Fonte: Autor (2019).

Os principais órgãos responsáveis pelo fornecimento das séries históricas foram, principalmente, a ANA, CEMIG, FURNAS e SEFAC. Os dados referentes aos reservatórios foram obtidos por FURNAS e SEFAC. Não foram aproveitados os dados das estações fluviométricas apresentados na Tabela 8, com exceção dos dados monitorados pelos dois reservatórios presentes na bacia hidrográfica, que foram utilizados para a regionalização da

vazão através do método da descarga específica. A Figura 14 apresenta as estações georreferenciadas presentes na área de estudo.

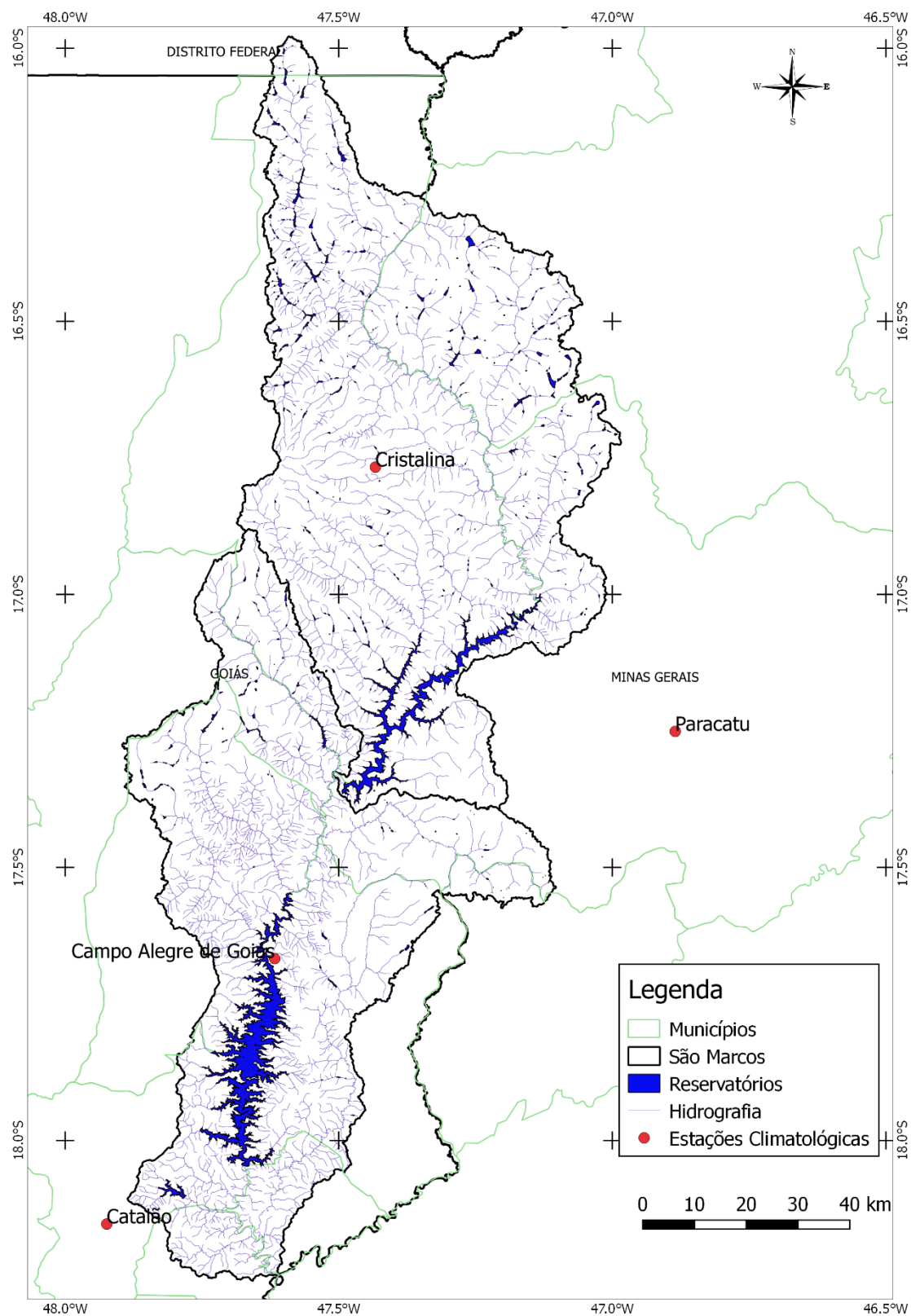
As informações referentes à evapotranspiração foram fornecidas por FURNAS. Os reservatórios de Batalha e Serra do Facão não fazem as medições diretas de evapotranspiração. Segundo FURNAS, o cálculo da evapotranspiração é feito utilizando o método de FAO Penman-Monteith, proposta pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations Land and Water Division* (FAO). Para o cálculo, é necessário utilizar os dados das estações climáticas presentes próximo a área dos reservatórios. No modelo são necessários dados de entrada como: temperatura do ar, temperatura máxima diária, temperatura mínima diária, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento. As estações climáticas utilizadas estão representadas na Figura 15.

Figura 14 - Estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio São Marcos



Fonte: Autor (2019).

Figura 15 - Estações Climatológicas na bacia hidrográfica do rio São Marcos



Fonte: Autor (2019).

### 3.3 Demandas consuntiva e não consuntiva outorgadas

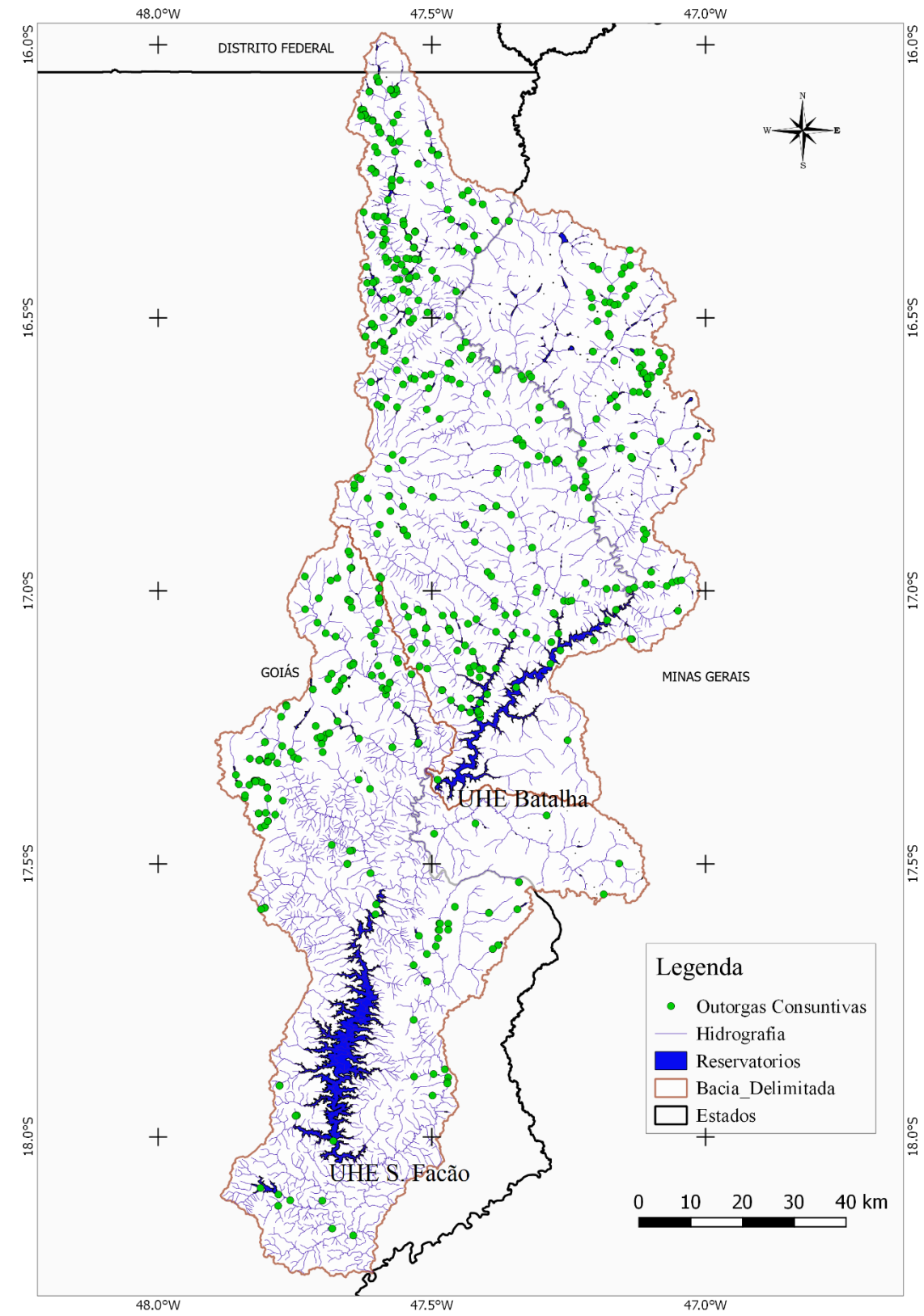
No processo de otimização do aproveitamento hídrico na bacia hidrográfica do rio São Marcos, o levantamento das outorgas permitirá uma análise de disponibilidade hídrica e auxiliará na busca por alternativas nos critérios e prioridades de outorgas.

A obtenção dos dados de outorga na porção mineira da bacia foi feita junto à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), sendo obtidas as outorgas até dezembro de 2017. Para as outorgas do estado de Goiás, os dados foram obtidos junto à Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidades e Assuntos Metropolitanos (SECIMA). O georreferenciamento das outorgas foi realizado na ferramenta QGIS, conforme apresentado na Figura 16.

De acordo com Furquim & Abdala (2016), na bacia hidrográfica do rio São Marcos está localizada a maior extensão de áreas irrigadas por sistema de pivô central da América Latina, concentrada principalmente no município de Cristalina. Segundo os autores, a porção da bacia hidrográfica a montante da usina hidrelétrica de Batalha com área irrigada de 82.906 ha por pivôs centrais. Tal fato pode ser constatado ao verificar a grande quantidade de outorgas presentes na região (Figura 16).

De acordo com a Figura 8, o relevo na bacia hidrográfica do alto São Marcos é plano a ondulado, em contraste com o trecho do baixo São Marcos (à jusante da UHE Batalha), caracterizado pelo relevo acidentado e montanhoso. As áreas planas, localizadas nas partes mais altas dos corpos hídricos que formam a bacia, são expressivas e economicamente muito importantes. Nelas ocorre a formação de chapadões (que apresentam declividade de até 3%) e vales rasos com fundos planos e vertentes suaves (FURQUIM; ABDALA, 2016).

Figura 16 - Outorgas para uso superficial



Fonte: Autor (2019).

### 3.4 Módulo OPTIGES

A otimização dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Marcos, onde foi realizado o balanço hídrico a partir de séries históricas de vazões afluentes e defluentes nos reservatórios de Batalha e Serra do Facão e considerando as demandas consuntivas e não consuntivas outorgadas, foi feita com o auxílio do módulo OPTIGES, inserido na ferramenta computacional AQUATOOL.

Salla et al. (2014) afirmaram que a ferramenta computacional AQUATOOL tem grande utilidade como um sistema de suporte à decisão, no planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas complexas.

Assim, o módulo OPTIGES busca, em cada mês, atender objetivos pré-estabelecidos, que resultam de restrições quantitativas, como valores mínimos de escoamento em cursos de água ou canais artificiais, de demandas de água a satisfazer e volumes a serem armazenados a níveis máximos e mínimos em reservatórios e aquíferos.

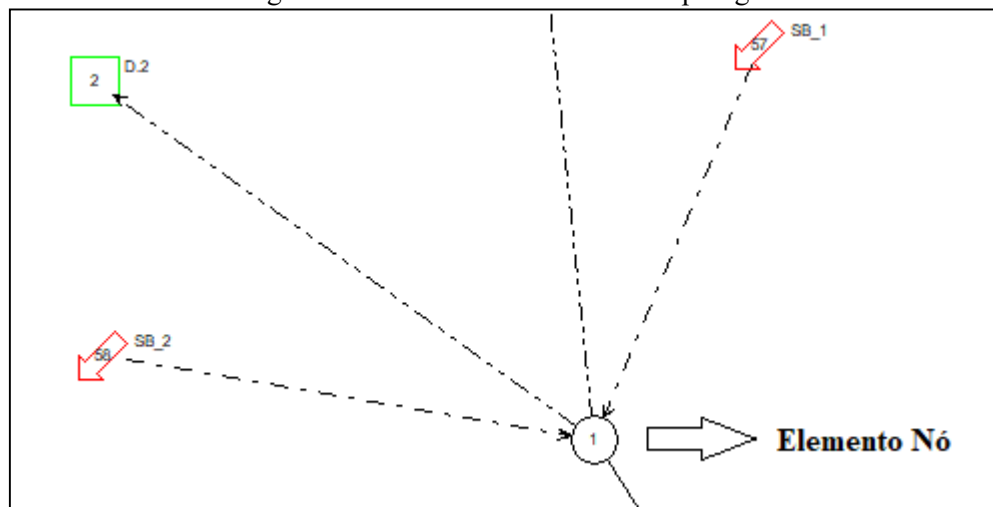
O módulo OPTIGES tem como função principal a otimização e gestão de um sistema de recursos hídricos de acordo com hipóteses e restrições que são impostas pelo usuário. Todas as variáveis hidrológicas utilizadas no modelo são em escala mensal. É necessário conhecer cada elemento que, posteriormente, formará a topologia do sistema hídrico. O esquema simplificado da topologia é semelhante a uma rede de fluxo, em que se reflete a estrutura da bacia. A seguir são descritos os elementos utilizados na construção da topologia.

- Nós

Os nós são elementos pontuais. Devem ser utilizados sempre que se tenha convergência ou bifurcações de cursos de água, que tenham retiradas de água ou próximo de reservatório e aquíferos. Não se tem a entrada de dados nos nós, sendo possível apenas caracterizá-los por um número de identificação e nomenclatura. Ao final da topologia, é necessário inserir um nó final. A Figura 17 mostra o elemento nó, inserido no início da topologia.



Figura 17 - Elemento "Nó" de uma topologia



Fonte: Autor (2019).

### - Conduções

São elementos que correspondem aos rios, canais, etc. da bacia, por onde a água escoar de um nó para outro. A direção do fluxo é definida pelo usuário. Portanto, as conduções são caracterizadas por um nó inicial e um nó final, sua capacidade máxima, sua vazão mínima (vazão ecológica ou de diluição) e a prioridade para esta vazão mínima. Tanto para a capacidade máxima como para a mínima podem ser distintas para cada mês do ano. A Figura 18 mostra as possíveis configurações dos elementos “conduções”.

Figura 18 - Layout para configuração do elemento "condução"

Channel description (type 1)

Name

**OPTIGES**

Flows (Hm<sup>3</sup>/month)

Month	Minimum	Month	Maximum
October	0	October	10000
November	0	November	10000
December	0	December	10000
January	0	January	10000
February	0	February	10000
March	0	March	10000
April	0	April	10000
May	0	May	10000
June	0	June	10000
July	0	July	10000
August	0	August	10000
September	0	September	10000

Priority number for minimum flow

Monthly failure level (%)

Minimum flow levels

Between 0% and  %

Between 100% and  %

Between 100% and  %

Between 100% and 100%

Reach cost

☒ No Cost

☐ Cost unit or by pass

☐ User defined cost

Month	Cost
October	0
November	0
December	0
January	0
February	0
March	0
April	0
May	0
June	0

Accept

Fonte: AQUATOOL (2018)

No campo *Flows* (vazões), são preenchidos com os valores da capacidade máxima e mínima permitida. Para as vazões mínimas, deve-se ficar atento em atender as vazões de referência ou vazão ecológica. Os fluxos máximos não podem ser ultrapassados, sendo então, um limite intransponível, porém os fluxos mínimos podem ser superados, caso não tenha água para satisfazer as demandas locais.

Em *Priority number for minimum flow* (número de prioridade para vazão mínima) é fixada qual a prioridade de cumprimento, como por exemplo, atender determinada demanda ou priorizar a vazão ecológica. Neste caso, a vazão mínima sempre terá prioridade sobre qualquer uso.

Em *Monthly failure level* (nível de falha mensal) é um parâmetro de garantia de atendimento a vazão mínima. Portanto, pode ser aceito falhas, que em algum momento da simulação a vazão mínima pode não ser atendida. A Equação (1) é utilizada para o cálculo do nível de falha mensal.

$$NG_m = \left[ 1 - \left( \frac{n^\circ \text{ de falhas}}{n^\circ \text{ total de meses}} \right) \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Na qual:  $NG_m$  é o nível de falha mensal (%).

Como a vazão mínima é uma restrição ambiental, não foram aceitas falhas para este estudo. Quando se define uma vazão mínima, é possível fracionar este fluxo em quatro níveis. Para isso é utilizado a opção *Minimum flow levels* (níveis de vazões mínimas). Em possíveis casos de conflitos devido à falta de recursos hídricos, o modelo tentará atender o primeiro nível de todos os fluxos de mínimos, para em sequência, o segundo, e assim sucessivamente. Como não foi admitido, neste estudo, o não atendimento da vazão mínima, foi considerado que o primeiro nível atinja 100% da vazão mínima.

Ao escolher a condução, tem-se a opção de três formas de diferentes características. Neste estudo, foi selecionado a “condução simples ou condução de tipo 1”, que são os casos em que não é levado em consideração as perdas por infiltração ou recargas de aquíferos.

### - Entradas

São as entradas de água pontuais no sistema hídrico, provenientes de tributários, lançamento de efluente, etc. As entradas mensais somente são permitidas nos nós. A Figura 19 traz um exemplo de entrada dos dados mensais de vazão de um tributário, em  $\text{hm}^3/\text{mês}$ .

Figura 19 - *Layout* para configuração do elemento "entrada"

Hydrological inflows description

Name: SB-1

**SIMGES**

Type of data:  
☒ Monthly historical   ☐ Monthly average   ☐ Data file

Year	Total	01-October	02-November	03-December	04-January	05-February	06-March	07-April
2014-2015	389.75	12.576	13.321	49.803	25.308	33.03	66.256	6.000

Edit values...

Accept

Fonte: AQUATOOL (2018)

### - Demandas

As demandas consuntivas são as retiradas de água da bacia (abastecimento urbano, industrial, irrigação, etc.), em que parte é consumida e não volta para o sistema, constituindo uma perda. Para integrar uma demanda ao sistema, é necessário a ligação da mesma ao nó por outro elemento, chamado de “toma”, que será detalhado adiante.

A janela *Demand Levels* (níveis de demanda) permite a divisão da captação em 4 níveis. Isso significa que o balanceamento hídrico será feito em 4 etapas de análise, onde as porcentagens inseridas devem ser cumpridas em cada uma delas. Deve-se usar esta opção onde a disponibilidade hídrica não for suficiente para suprir a demanda em 100%. A Figura 20 apresenta o *layout* para a configuração das demandas.

Figura 20 - *Layout* para configuração do elemento "demanda"

**Demand's description**

Name: D.3

**OPTIGES**

Total Demand (Hm³/month)

Month	Hm³
October	1.06
November	1.06
December	1.06
January	1.06
February	1.06
March	1.06
April	1.06
May	1.06
June	1.06
July	1.06

Demand Levels

1st Level - 0% and	50 %
2nd Level - 50%	70 %
3rd Level - 70%	90 %
4th Level - 90%	100 %

Infiltration

Aquifer recharged: (None)

Recharge elemental action: (None)

Pumping

(None)

Maximum pumping flow (Hm³/month):

Monthly reliability

Monthly failure (% M.D.): 1

Annual Reliability

Monthly failure (% M.D.): 15

Annual failure (% A.D.): 30

UTAH DWR criterion

Annual failure (% A.D.): 50

10 years failure (% A.D.): 100

2 years failure (% A.D.): 75

IPH,2008 criterion for urban demands

Maximum monthly failure %: 10

Maximum 10 years failure %: 8

Accept

Fonte: AQUATOOL (2018)

Em caso de conflitos hídricos, o modelo tentará satisfazer o primeiro nível de todas as demandas com preferência na escala de prioridade, que é definida no elemento “toma”. Em seguida, o modelo partirá para o primeiro nível para as demandas com a prioridade seguinte e, assim por diante.

Finalizado todas as prioridades das demandas, o modelo parte para o 2º nível das demandas prioritárias, respeitando as prioridades de cada demanda, até passar por todas elas. O modelo segue da mesma forma até percorrer todos os 4 níveis, sendo que o último nível não é permitido a sua edição, sendo fixo o atendimento total da demanda. Dessa maneira, é

possível atender grande parte dos diferentes tipos de demanda e prioridades nos períodos de maior escassez, mesmo que não consiga atender o volume total necessário em uma primeira análise.

A janela *Infiltration* (infiltração) é referente à infiltração de água que não foi consumida pela demanda, o que não ocorre neste estudo por não ser considerado a troca com fluxo subterrâneo. Já o *Pumping* (bombeamento) é relacionado à possibilidade de bombeamento subterrâneo para complementar possíveis déficits na captação superficial.

Em *Monthly reliability* (garantia mensal) é como um critério para a identificação de falhas no fornecimento de água para as demandas consuntivas. A falha só acontece quando um determinado mês apresenta um déficit menor do que determinada porcentagem da demanda. Portanto, o atendimento da eficiência da otimização, referente à garantia ao atendimento das demandas mensais, é medida pela Equação (2).

$$G_m = \left[ 1 - \left( \frac{n^\circ \text{ de falhas}}{n^\circ \text{ total de meses}} \right) \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Na janela *Annual reliability* (garantia anual) é determinado o critério para a identificação de falhas no fornecimento anual de água para as demandas, em bases anual e mensal. Considera-se que uma falha anual ocorre quando dentro de um ano: a) o déficit em um mês é maior que determinada porcentagem da demanda mensal, sendo que tal porcentagem é estabelecida em “*Monthly failure*”; b) o déficit total anual é maior que a porcentagem inserida em “*Annual failure*”, sendo referente neste caso a demanda total anual (Figura 18). Assim, a garantia de eficiência da otimização, no que diz respeito ao atendimento as demandas em períodos anuais, pode ser medida pela Equação (3).

$$G_a = \left[ 1 - \left( \frac{n^\circ \text{ de falhas}}{n^\circ \text{ de anos}} \right) \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Portanto, quanto maior a porcentagem nos parâmetros de garantia, melhor se caracteriza a otimização. Neste estudo, as porcentagens utilizadas nos critérios citados anteriormente serão iguais a 1%. Tal restrição, que é de certa forma exigente, será adotada pois pretende obter resultados precisos com relação ao grau de escassez ao longo da bacia.

### - Toma

A “toma” é um elemento que fornece água para uma demanda. Para incluir uma toma no esquema, é necessário que se tenha já definida uma demanda, que será o destino do mesmo e um nó ou reservatório, que será a fonte de consumo. O conceito de toma, em princípio, corresponde a diferentes fontes de água, mas também pode ser utilizado para fins de gerenciamento, para distinguir prioridades ainda que a água venha de um mesmo ponto, ou ainda para suprimento de diferentes zonas dentro de uma área considerada. A Figura 21 ilustra o *layout* do elemento toma no OPTIGES.

Figura 21 - *Layout* para configuração do elemento "toma"

Intake description

Name

**SIMGES**

Monthly peak flow

Month	Hm³
October	40
November	40
December	40
January	40
February	40
March	40
April	40
May	40
June	40
July	40
August	40
September	40

Priority number: 0

Annual assigned volume: 500

Return coefficient (between 0-1): 0

Consumption coefficient: 1

Return element: (None)

Accept

Fonte: AQUATOOL (2018)

Na opção “*Monthly peak flow*” (vazão máxima mensal) são inseridos os valores de vazão que podem ser retirados da rede de fluxo. Se esse valor for atingido, não se transfere água mais no mês em questão. Assim, o valor a ser empregado deverá ser superior a demanda mensal a qual a toma está ligada, podendo variar ou não. Para facilitar, foi inserido um valor fixo, tal qual não é superado por nenhuma das demandas existentes na área de estudo, em todos os meses.

No campo “*Priority number*” (número de prioridade), é usado para estabelecer prioridades entre as distintas tomas do sistema. O módulo OPTIGES primeiramente fornecerá água para as tomadas com menor número de prioridade. Os valores inseridos não possuem um limite máximo, porém é restringido em um mínimo de um. Em casos de insuficiência de recursos, as demandas com prioridades maiores podem ser parcialmente atendidas ou até mesmo não serem atendidas.

Em “*Annual assigned volume*” (volume anual atribuído), refere-se ao valor máximo que pode ser captado em um ano, ou seja, a soma dos volumes mensais especificados na vazão máxima mensal. Da mesma forma que a vazão máxima mensal, foi atribuído um volume superior a qualquer demanda anual.

Além disso, a fim de realizar o balanço hídrico da bacia, é necessário definir o volume de água que retorna ao sistema hídrico para cada demanda atendida. Assim, é essencial determinar dois coeficientes: um coeficiente de retorno  $\alpha$  e um coeficiente de consumo  $\beta$ . O retorno da água para o sistema é definido pela Equação (4).

$$R = \alpha \cdot S_{sup} \quad (4)$$

Onde:  $S_{sup}$  é o volume mensal captado pela demanda, em  $\text{hm}^3$ . A água consumida  $X$  (que é perdida pelo sistema) é dada pela Equação (5).

$$X = \beta \cdot S_{sup} \quad (5)$$

O restante é considerado como infiltração  $I$  e é dado pela Equação (6).

$$I = (1 - \alpha - \beta) \cdot S_{sup} \quad (6)$$

Os volumes infiltrados são transformados em recarga para os aquíferos. Como dito anteriormente, não foram considerados neste estudo escoamentos subterrâneos. Assim, para desconsiderar efeitos de infiltração basta que a soma dos coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  seja 1. Os valores de coeficientes de retorno foram adotados conforme ANA (2013), sendo, em média, 0,8 para

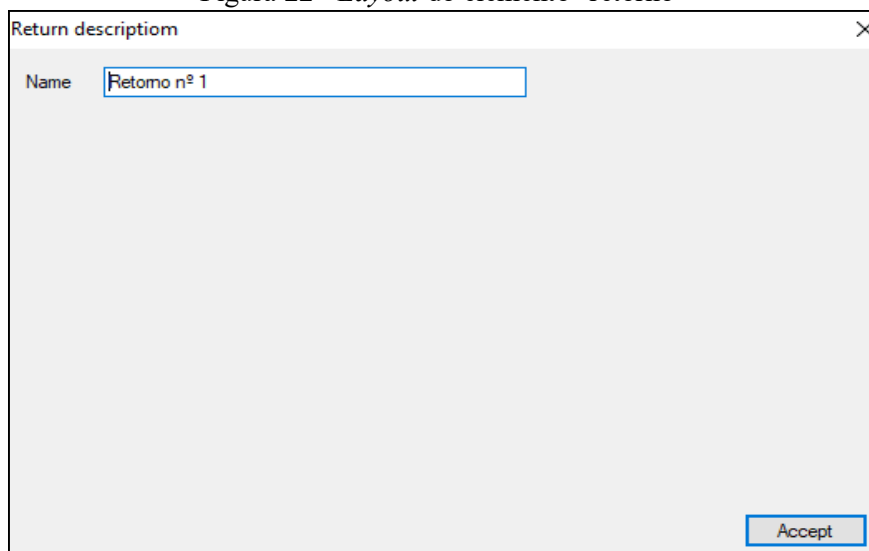
abastecimento urbano, 0,8 para abastecimento rural, 0,8 para abastecimento industrial, 0,2 para irrigação e 0,2 para criação de animais.

A opção “Elemento de retorno” determina o ponto em que o volume de água retorna a rede de fluxo. A definição desses pontos é feita pela inserção do elemento “Retorno”.

#### - Retorno

Serve para indicar onde se reintegra ao rio o retorno superficial calculado no elemento “toma”, ou seja, corresponde as demandas que não são totalmente consumidas e retornam ao sistema hídrico. Um retorno pode ser utilizado para uma ou mais “tomas”. Para incluí-lo no sistema, é necessário que seja previamente definido o elemento nó ou reservatório, ao qual será conectado. A definição desses elementos é puramente funcional e não requer o preenchimento de dados, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 - *Layout* do elemento "retorno"



Fonte: AQUATOOL (2018)

#### - Reservatórios

Os reservatórios são nós com capacidade de armazenamento, sendo definido pela diferença entre o volume máximo e o volume mínimo de acumulação. Pode variar de maneira diferente para cada mês, caso desejado. A Figura 23 apresenta a janela *Reservoir* na ferramenta AQUATOOL.



Figura 23 - *Layout* para configuração do elemento "reservatório"

Reservoir description

Name: Batalha

**OPTIGES**

Physical data | Volumes | Surf./Vol. | Evaporation rate

Infiltrations

Aquifer: (None)

Elemental action:

A coefficient: 0

B coefficient: 0

C coefficient: 1

Priority number: 1

Initial volume (Hm³): 847.72

Accept

Fonte: AQUATOOL (2018)

A janela “reservatório” é dividida em quatro abas. A primeira delas é *Physical data* (dados físicos) onde será informado qual a prioridade, o volume inicial e se existe ou não a interação com aquífero.

O volume inicial declarado deve ser, no mínimo, igual ao declarado para o último mês do ano hidrológico na aba “Volumes”. O número de prioridade permite definir o nível de preferência que um reservatório tem em relação aos demais na acumulação de água. Os reservatórios com níveis de prioridade mais baixos têm preferência sobre aquele com um número maior. Nas simulações aqui realizadas, inicialmente não foi diferenciada a prioridade entre os reservatórios. Será dada prioridade para algum reservatório caso ocorra situações em que o volume atinja níveis que prejudiquem a operação.

Existe a possibilidade de introduzir perdas por infiltração nos reservatórios, utilizando o campo “*Infiltrations*” (infiltrações). Tais perdas são definidas pela Equação 7.

$$P = a + bV^c \quad (7)$$

Na qual: P e V são as perdas e volumes instantâneos e a, b e c são parâmetros fornecidos pelo usuário e requeridos pelo modelo. Para efeitos práticos, o volume instantâneo é calculado como a média dos volumes inicial e final de cada mês. Optou-se por ignorar esta opção devido a magnitude do estudo e o pequeno impacto que estas infiltrações teriam no balanço hídrico do sistema.

Na aba “Volumes” são inseridos a capacidade máxima e o volume mínimo do reservatório. Deve-se respeitar a seguinte relação: Volume máximo > Volume mínimo > 0.

A Figura 24 exibe a aba “Volumes”.

Figura 24 - Layout para configuração de volumes do elemento "reservatório"

The screenshot shows a software window titled "Reservoir description". Inside, there's a text field for "Name" containing "Batalha". Below it is a tabbed interface with three tabs: "Physical data", "VOLUMES" (which is selected), and "Surf./Vol.". The "VOLUMES" tab contains a table with three columns: "Month", "Maximum", and "Minimum". The table lists months from October to September. The "Maximum" column has a constant value of 1781.58 for all months. The "Minimum" column has a constant value of 430.05 for all months. At the bottom right of the window is an "Accept" button.

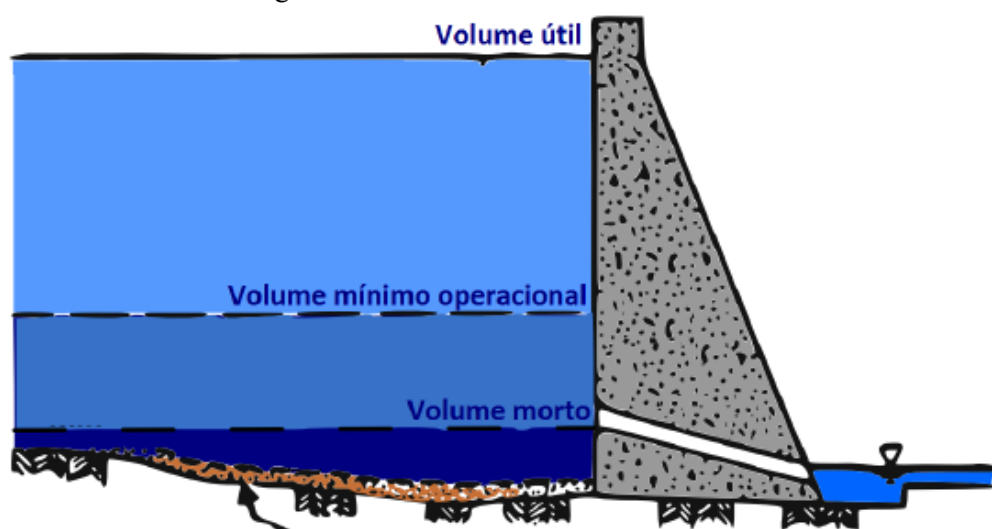
Month	Maximum	Minimum
October	1781.58	430.05
November	1781.58	430.05
December	1781.58	430.05
January	1781.58	430.05
February	1781.58	430.05
March	1781.58	430.05
April	1781.58	430.05
May	1781.58	430.05
June	1781.58	430.05
July	1781.58	430.05
August	1781.58	430.05
September	1781.58	430.05

Fonte: AQUATOOL (2018)

Na operação de um reservatório, pode se dizer que há dois volumes mínimos: o volume morto e o volume mínimo operacional. O volume morto é a parcela do volume total do reservatório inativa ou indisponível para captação. Corresponde ao volume compreendido

abaixo do nível de água (N.A.) mínimo operacional, conforme ilustra a Figura 25. O volume mínimo operacional é aquele necessário para a operação adequada do reservatório, localizado entre o limite superior do volume morto e o limite inferior do volume útil do reservatório. O volume mínimo adotado foi o correspondente ao volume morto, uma vez que valores superiores a ele ainda permitem a captação de água para fins consuntivos e a geração de energia, mesmo que esta não seja feita da forma mais eficiente no que se refere à altura de queda de água para o funcionamento das turbinas.

Figura 25 - Volumes de um reservatório



Fonte: AQUATOOL (2016)

Na aba “Surf./Vol.” são inseridos os dados batimétricos de área superficial e volume reservado. Os dados inseridos foram obtidos através de ofícios enviados aos responsáveis pela operação dos reservatórios. A Figura 26 apresenta tais valores.

Figura 26 - *Layout* para configuração de superfície e volume no elemento “reservatório”

Reservoir description

Name: Batalha

**OPTIGES**

Physical data Volumes Surf./Vol. Evaporation rate

Surf. (Ha)	Vol. (Hm³)
13662.09	847.72
13659.24	833.19
13666.29	869.19
13673.34	905.18
13662.23	848.41
13681.34	946.03
13732.46	1222.13
13755.97	1382.54
13755.82	1381.52
13745.52	1309.43

Accept

Fonte: AQUATOOL (2018)

Em “*Evaporation rate*” (taxa de evaporação) são inseridos os valores de taxa de evaporação mensal. Em geral, esses dados são os valores médios mensais, conforme mostrado na Figura 27. Da mesma forma que os dados de volume e área, estes também foram obtidos junto ao departamento de engenharia nas centrais hidrelétricas.

Figura 27 - *Layout* para configuração da evaporação do elemento "reservatório"

Reservoir description

Name: Batalha

**OPTIGES**

Physical data Volumes Surf./Vol. Evaporation rate

Month	mm/month
October	0
November	0
December	0
January	0
February	0
March	0
April	0
May	0
June	0
July	0
August	0
September	0

Accept

Fonte: AQUATOOL (2018)

### 3.5 Regionalização da 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 destes dados. Dentre os mecanismos mais utilizados, destaca-se o conceito de descarga específica.

Entende-se por descarga específica a vazão por unidade de área da bacia hidrográfica. Esta é uma forma simples de expressar a capacidade de uma bacia em produzir escoamento superficial e serve como elemento comparativo entre bacias.

As vazões difusas e pontuais dos afluentes em todo o trecho do rio São Marcos 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, cujos dados foram obtidos pelo Sistema de Acoplamento de Reservatórios (SAR) - ANA.

Os dados medidos nos reservatórios de Batalha e Serra do Facão e disponibilizados no site da ANA foram: cota, afluência, defluência, vazão vertida, vazão turbinada, vazão natural, volume útil e vazão incremental. Entende-se como afluência, a vazão que chega a um determinado ponto, em particular um aproveitamento hidrelétrico, e é determinante na avaliação da energia disponível; defluência é a soma da vazão turbinada e vertida; a vazão turbinada é aquela que passa pelas turbinas e gera energia; a vazão vertida é a que passa pelos vertedouros da usina e não gera energia; a vazão natural é obtida com a retirada do efeito antrópico, tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial) e, a vazão incremental corresponde a toda vazão lateral captada entre um posto de medição e todos os postos de medição imediatamente a montante deste.

As Equações 8 e 9 representam, respectivamente, o cálculo das vazões pontuais (das sub-bacias) e difusas no trecho a montante da UHE de Batalha, enquanto as equações 10 e 11 representam, respectivamente, o cálculo das vazões pontuais (das sub-bacias) e difusas no trecho entre as UHEs de Batalha e Serra do Facão. Foram utilizados os dados de outubro de 2014 até setembro de 2017, que corresponde ao período em que as duas usinas hidrelétricas estão em operação.

$$Q_{sub-bacia1i} = (Q_{Incr-Batalha} / A_{total\ 1}) \cdot A_{sub-bacia1i} \quad (8)$$

$$Q_{difusa1i} = [(Q_{Incr-Batalha} / A_{total\ 1}) \cdot A_{sub-bacia1i}] / L_{trecho1i} \quad (9)$$

$$Q_{sub-bacia2i} = ((Q_{Incr-Facão} - Q_{Incr-Batalha}) / A_{total\ 2}) \cdot A_{sub-bacia2i} \quad (10)$$

$$Q_{difusa1i} = [(Q_{Incr-Facão} - Q_{Incr-Batalha} / A_{total\ 2}) \cdot A_{sub-bacia1i}] / L_{trecho1i} \quad (11)$$

Nas quais:  $i$  corresponde a uma determinada sub-bacia ou trecho;  $1$  é a área de contribuição ( $km^2$ ) ou o trecho (km) do rio São Marcos a montante da UHE Batalha;  $2$  é a área de contribuição ( $km^2$ ) ou o trecho (km) do rio São Marcos entre as UHEs de Facão e Batalha ( $km^2$ );  $Q_{sub-bacia}$  é a vazão em cada sub-bacia ( $hm^3/mês$ );  $Q_{difusa}$  é a vazão em cada sub-bacia difusa ( $km^2$ );  $Q_{Incr-Batalha}$  é a vazão incremental na UHE Batalha ( $hm^3/mês$ );  $Q_{Incr-Facão}$  é a vazão incremental na UHE Serra do Facão ( $hm^3/mês$ );  $A_{total}$  é a área total de contribuição ( $km^2$ );  $A_{sub-bacia}$  é a área total de contribuição de cada sub-bacia ( $km^2$ );  $L_{trecho}$  é o comprimento do trecho de rio (km).

Os dados de vazão são medidos diariamente por FURNAS. Foi necessário calcular a média mensal para toda a série histórica, visto que a ferramenta AQUATOOL trabalha em escala mensal.

### 3.6 Determinação da vazão $Q_{7,10}$

Para o cálculo da vazão  $Q_{7,10}$  foi utilizado o método de Gumbel. A distribuição de Gumbel é uma distribuição de probabilidade. Tal metodologia é a que tem maior destaque na literatura (ROWINSKI; STRUP-CZEWSKI; SINGH, 2002) e apresenta dois parâmetros, um de escala e outro de forma, os quais vêm sendo estimados pelo método dos momentos, especificamente, os momentos de 1ª e 2ª ordens, que representam, respectivamente, média ( $x$ ) e desvio padrão ( $s$ ) (BEIJO, 2002).

Para o cálculo da  $Q_{7,10}$  é recomendada a obtenção de séries históricas com pelo menos trinta anos de registros de vazões diárias. Nos meses de estiagem é importante que não haja falhas nos dados, visto que isto pode prejudicar os resultados. A  $Q_{7,10}$  tem caráter bastante restritivo pois reflete uma situação de severa escassez mas, ainda assim, alguns estados fixam como máxima vazão outorgável apenas uma porcentagem da  $Q_{7,10}$ , assumindo uma postura mais conservadora (MENDES 2007).

É importante salientar que no presente estudo, os dados fluviométricos disponíveis são de apenas três anos (2014 – 2017), período em que as duas centrais hidrelétricas já estavam em funcionamento e início dos conflitos pelo uso da água. Portanto, o cálculo feito foi, na verdade, de uma vazão mínima de sete dias consecutivos em um período de três anos, o que não caracteriza a  $Q_{7,10}$ , mas que ao longo do estudo, será considerado como a própria  $Q_{7,10}$ . Neste enfoque, a série histórica de dados diários de vazão nas centrais hidrelétricas, especificamente entre 2014 e 2017, foi replicada sequencialmente a fim de que possibilitasse a utilização da metodologia de cálculo da vazão de referência.

Para cada ano da série histórica foi realizada a análise de 365 médias diárias de vazão. Foi selecionado em cada ano o período de sete dias consecutivos que resultou na menor média de sete dias. Para finalizar o cálculo da  $Q_{7,10}$  é necessário fazer uma análise estatística, com os valores anuais da menor média de sete dias consecutivos que permita encontrar o valor da vazão para o período de retorno de dez anos. Para encontrar este valor de vazão foi utilizada a distribuição de probabilidade de Gumbel para valores mínimos, cuja função densidade é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp \left\{ \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right) - \exp \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right\} \quad (8)$$

Na qual:  $\sigma$  e  $\mu$  são parâmetros da distribuição.

### 3.7 Determinação da vazão $Q_{95}$

Para a determinação da vazão  $Q_{95}$  foi utilizado o método da curva de permanência, que relaciona a vazão com sua probabilidade de ocorrência ao longo do tempo. Foi realizado o cálculo da  $Q_{95}$  anual por meio dos dados históricos de vazões (entre 2014 e 2017), os quais

foram ordenados de ordem crescente. O procedimento para o cálculo foi feito em planilha de cálculo Excel e seguiu as seguintes etapas: para a série de vazões  $Q(t)$ , determinou-se o maior e menor valor da série; determinaram-se intervalos de classe entre o maior e menor valor; determinaram-se quantas vazões estão contidas em cada intervalo; obteve-se a distribuição de frequência; acumularam-se os valores do intervalo maior para o menor. A vazão de 95% de permanência significa que 95% do tempo as vazões são maiores ou iguais ao valor de  $Q_{95}$ .

### 3.8 Regionalização da vazão $Q_{7,10}$ e $Q_{95}$

De acordo com Tucci (1993), a regionalização da vazão é um conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando a estimativa de variáveis hidrológicas (como por exemplo as vazões mínimas) em locais sem dados ou com dados insuficientes.

A vazão  $Q_{7,10}$  e  $Q_{95}$  foram determinadas próximo aos reservatórios de Batalha e Serra do Facão, que são os locais com medições de vazão com baixo número de falhas durante o período analisado, porém foi necessário estimar essa vazão nas diversas sub-bacias de interesse por meio da regionalização.

Dentre as metodologias utilizadas para regionalização da vazão mínima, merece destaque as equações de regressões regionais, as quais utilizam dados climáticos e fisiológicos de bacias hidrograficamente homogêneas (TUCCI, 2003; EUCLYDES et al., 2001). A utilização da regressão regional para regionalização da vazão mínima leva a erros que, de acordo com Stedinger et al. (1992 apud Chaves et al., 2002), são justificados pela incapacidade dessas equações de coletar informações ou características superficiais e sub-superficiais das bacias hidrográficas.

Sabendo que os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) auxiliam satisfatoriamente na caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas, Chaves et al. (2002) propuseram métodos para regionalização de vazão mínima, em regiões com limitação de dados históricos de vazão, nos quais são utilizadas técnicas de interpolação e extrapolação em ambiente SIG.



Nesta metodologia a vazão mínima é interpolada e extrapolada com base na razão da área de drenagem, no inverso das distâncias entre o ponto de monitoramento da vazão e o ponto onde se quer estimar a vazão e, para finalizar, a combinação da razão de área de drenagem e o inverso das distâncias.

Na metodologia proposta por Chaves et al. (2002), para uma situação onde existe apenas um posto de monitoramento a jusante da região de interesse, mas ainda dentro da mesma bacia hidrográfica com pequenas dimensões, aplica-se o método da razão de área de drenagem, originalmente proposto por Stedinger et al. (1992).

Este método da razão da área de drenagem também pode ser chamado de método da vazão específica. De acordo com Silva (2009), este método é uma alternativa em que se utiliza o cálculo das vazões tendo como base as áreas de drenagem de postos fluviométricos localizados a montante e/ou jusante do local onde se deseja estimar a vazão, sendo mais apropriado para a estimativa da vazão média de longo prazo  $Q_{mlp}$ . Esta metodologia viabiliza a sua aplicação em pequenas bacias hidrográficas com número reduzido de postos hidrométricos. Também, de acordo com Silva et al. (2009), esta metodologia não fornece resultados satisfatórios nos casos em que a diferença entra a área total de contribuição ao posto fluviométrico monitorado e a área de drenagem local onde se pretende estimar a vazão mínima for grande.

Nesse sentido, as vazões mínimas nas diversas sub-bacias hidrográficas existentes na bacia hidrográfica do rio São Marcos foram estimadas através da regionalização via vazão específica, de acordo com a Equação 13, de modo que se considerou alguns aspectos favoráveis a utilização desta metodologia, como a falta de estações de monitoramento hidrológico.

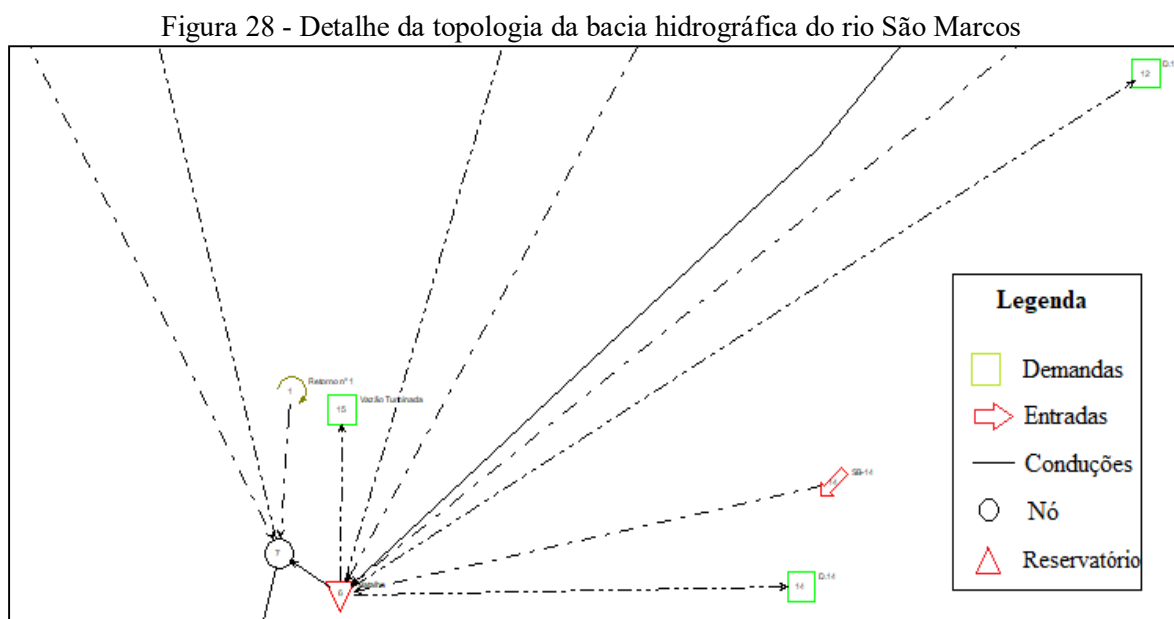
$$Q_{7,10i} = \left( \frac{A_i}{A_{total}} \right) \times Q_{7,10} \text{ estação monitorada} \quad (9)$$

Na qual:  $Q_{7,10i}$  é a vazão estimada na sub-bacia  $i$  ( $m^3/s$ );  $Q_{7,10}$  *estação monitorada* é a vazão obtida nas estações de monitoramento de Batalha e Serra do Facão ( $m^3/s$ );  $A_{total}$  é a área total da bacia de contribuição da estação fluviométrica ( $km^2$ );  $A_i$  é a área de contribuição da sub-bacia  $i$  ( $km^2$ ). A mesma metodologia foi utilizada para o cálculo da vazão  $Q_{95}$ .

### 3.9 Topologia do sistema hídrico

A topologia do sistema hídricos trata-se, basicamente, de um esquema situacional da bacia hidrográfica em estudo, elaborada diretamente na ferramenta AQUATOOL, onde todos os elementos do sistema são dispostos a critério do usuário e sem a necessidade de manutenção de uma escala.

A topologia de uma bacia hidrográfica é de fácil construção, desde que se tenha conhecimento prévio das características físicas da área de estudo como, por exemplo, o comprimento dos diversos trechos do rio, quantidade e localização de seus afluentes. A Figura 28 traz um detalhe da topologia considerada. A topologia completa do sistema hídrico da bacia do rio São Marcos é apresentada no ANEXO A.



Fonte: AQUATOOL (2018)

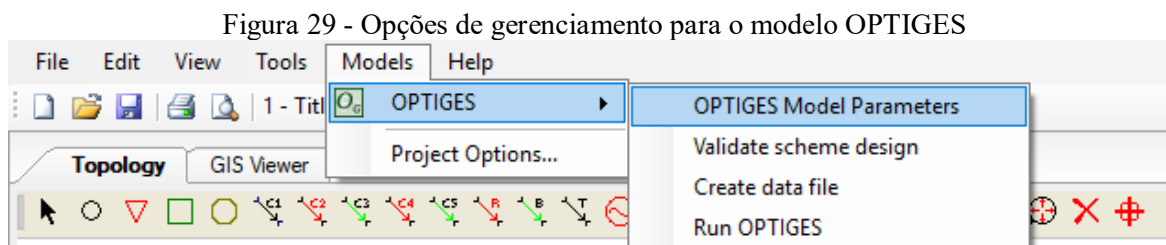
### 3.10 Balanço hídrico

Para o acertado planejamento e gestão de recursos hídricos em escala de bacia hidrográfica é preciso conhecer as potencialidades do curso de água com relação as variações espaciais e temporais de vazão (GAMIZ-FORTIS et al., 2011). O balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio São Marcos foi obtido com o auxílio do módulo OPTIGES, vinculado a ferramenta computacional AQUATOOL, após alimentados os dados de entrada fluviométricos

(utilizando séries histórica e sintética), as demandas consuntivas e não-consuntivas outorgadas, os dados batimétricos dos reservatórios de acumulação, os volumes máximo, mínimo e objetivo nos reservatórios e os dados de evaporação nos reservatórios. Estes dados foram inseridos diretamente na topologia do sistema hídrico.

A primeira etapa para realizar o balanço hídrico consistiu na divisão da bacia hidrográfica do rio São Marcos em várias sub-bacias. Em cada uma delas calculou-se a área, as demandas consuntivas e estimou-se a vazão pelo método de descarga específica. Têm-se valores diários de vazão e dados batimétricos do reservatório, e a partir deles, se estabelece a média representativa para o mês. São alocados os diferentes elementos para a construção da topologia e preenchidos com os respectivos dados.

Uma vez preenchida a topologia, inicia-se as simulações com o modelo de cálculo OPTIGES. Para isso, seleciona-se o menu Modelos, e posteriormente seleciona o ícone de execução, conforme Figura 29. O mesmo menu é utilizado para executar a simulação, na opção “Run OPTIGES”. O balanço hídrico trouxe a situação hídrica no período de 2014 a 2017 e esses dados foram utilizados como base para as análises de otimização.



Fonte: AQUATOOL (2018)

A partir da primeira simulação com o modelo, é possível analisar os resultados por meio de gráficos e tabelas.

### 3.11 Otimização do aproveitamento hídrico

Neste item são apresentadas as metodologias utilizadas para avaliar a otimização da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio São Marcos. Foram realizadas três análises independentes. Na primeira análise visou avaliar as variações na quantidade de água

disponível ao alterar o percentual da vazão de referência nos Estados de Minas Gerais e Goiás, sendo analisados 30% da  $Q_{7,10}$ , 50% da  $Q_{7,10}$ , 80% da  $Q_{7,10}$  e 70% da  $Q_{95}$ , isto baseado em uma base anual. Na segunda análise, mantendo as porcentagens 50% da  $Q_{7,10}$  e 70% da  $Q_{95}$ , vigentes atualmente nos estados presentes na bacia hidrográfica do rio São Marcos, variou-se a disponibilidade hídrica utilizando a base sazonal (de abril a setembro, que são os meses de estiagem e de outubro a março a que são os seis meses mais chuvosos). Já na terceira análise foram aplicadas diferentes prioridades para as demandas da bacia hidrográfica (outorgas). As três análises são discutidas a seguir.

### *3.11.1 Variações nos critérios de outorga (primeira e segunda análise)*

Na primeira análise foram feitas mudanças no critério de outorga para as vazões de referência, conforme descrito em seguida.

- Uso de 70% da  $Q_{95}$  anual. Esse é o critério utilizado pelo estado de Goiás conforme Resolução N° 09/2005 e, por ser menos restritivo que o critério adotado pelo estado de Minas Gerais, será adotado para toda a bacia hidrográfica e avaliada a disponibilidade hídrica;
- Uso de 50% da  $Q_{7,10}$  anual. Atual critério utilizado pelo Estado de Minas Gerais de acordo com a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM N° 1548/2012. Portanto, o critério será ampliado também para a região goiana da bacia e avaliada a disponibilidade hídrica para esse formato;
- Uso de 30% da  $Q_{7,10}$  anual. Esse critério será analisado devido ao percentual de 30% ainda ser utilizado para a concessão de outorga em algumas bacias hidrográficas no Estado de Minas Gerais;
- Uso de 80% da  $Q_{7,10}$  anual. Atual critério utilizado pelo Distrito Federal de acordo com o Decreto N° 22.359/2001. Além da bacia hidrográfica do rio São Marcos possuir uma pequena parte no território do Distrito Federal, esse critério foi avaliado a fim de superestimar a vazão outorgável e avaliar a disponibilidade hídrica com um critério menos restritivo.

A segunda análise foi manter o critério de outorga vigente para os estados de Minas Gerais e Goiás, todavia calculado em base sazonal (de abril a setembro e de outubro a março).

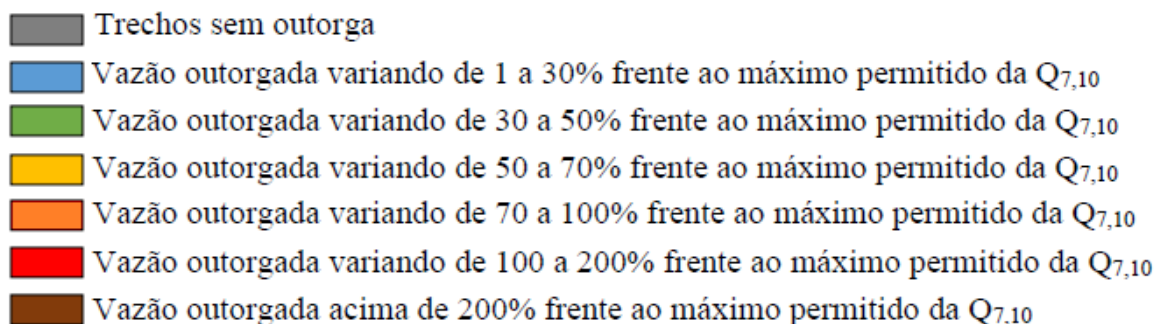
Durante o processo de otimização na primeira e segunda análise foi especificado como principal prioridade o atendimento à vazão de referência em cada trecho do rio São Marcos (vazão ecológica). Todas as demais demandas tiveram prioridade 2 no processo, ou seja, os diversos usos dos recursos hídricos (irrigação, geração de energia, mineração, etc.) tiveram a mesma “importância” e, logo no primeiro nível de demanda foi exigido que 100% de seus volumes fossem atendidos. Tal configuração permite obter um mesmo volume de retirada para as diferentes análises. Portanto, foi permitido o cálculo do balanceamento hídrico e a análise das alterações na disponibilidade hídrica durante o ano hidrológico a partir de variações na vazão máxima outorgável (descritas anteriormente).

Para identificar, em cada trecho do rio, o percentual utilizado de outorgas a partir dos critérios listados anteriormente, foi considerado a vazão mínima de referência e as outorgas já emitidas a montante e no próprio trecho em estudo. Assim sendo, o percentual já outorgado em cada trecho é expresso pela Equação 14.

$$Q_{outorgada\ i} (\%) = \left( \frac{\sum Q_{mt\ i} \cdot 100}{\frac{x}{100} \cdot Q_{7,10}} \right) \quad (10)$$

Na qual:  $Q_{outorgada\ i} (\%)$  é o percentual utilizado da parcela  $Q_{7,10}$  permissível para outorga no segmento  $i$  ( $m^3/s$ );  $x$  é a porcentagem da  $Q_{7,10}$  permissível para outorga (%);  $\sum Q_{mt\ i}$  é o somatório das vazões já outorgadas a montante do segmento  $i$ , inclusive as vazões outorgadas no próprio segmento  $i$  ( $m^3/s$ ).

Os resultados foram avaliados nas sub-bacias, onde foram elaborados mapas em que os trechos foram coloridos de acordo com a proporção de utilização da parcela permissível para outorga (de acordo com cada critério estabelecido) das vazões de referência. Baseado em Oliveira et al. (2013), para fins de caracterização dos segmentos da hidrografia, foi utilizada a seguinte rampa de cores:



### 3.11.2 Avaliação quanto às prioridades nas outorgas (terceira análise)

Esta terceira análise não possui nenhuma relação com as anteriores. Foram avaliadas as áreas críticas da bacia, focando-se em regiões com maior número de outorgas e nos reservatórios de acumulação. A avaliação objetivou auxiliar na elaboração de políticas públicas de gestão hídrica, principalmente no que tange às prioridades nas outorgas da água e, em situações extremas, cortes nos volumes demandados por atividades secundárias em prol de usos indispensáveis ao ser humano e aos animais.

Para esta análise foram mantidos os critérios de vazão ecológica (vazão de referência) em vigor na bacia hidrográfica, ou seja, 50% da  $Q_{7,10}$  na porção mineira da bacia hidrográfica e 70% da  $Q_{95}$  na porção goiana.

De acordo com a PNRH, na Lei 9.433 de janeiro de 1997, em situações de escassez, o uso preferencial dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação animal. A Política Estadual de recursos Hídricos de Minas Gerais, de acordo com a Lei nº 13.199 de 29 de janeiro de 1999, estabelece a prioridade para o abastecimento público e a manutenção dos ecossistemas. O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, na qual está inserida a bacia hidrográfica do rio São Marcos, de acordo com a Resolução nº 562 da ANA, estabeleceu que o setor de irrigação tem prioridade para outorga de uso dos recursos hídricos à montante da Usina Hidrelétrica de Batalha.

Diante disso, os níveis de prioridade adotados para esta segunda análise foram os seguintes:

1º - Vazão ecológica ou de referência em cada trecho do rio São Marcos; 2º - Abastecimento

público; 3º - Irrigação; 4º - Geração de energia; 5º - Consumo Industrial; 6º - Outros consumos (lazer, mineração, paisagismo).

Apesar de não existir grandes centros urbanos, o abastecimento humano é prioridade em relação aos outros usos. Tal fato garante, em qualquer simulação, o atendimento ao abastecimento público. O maior conflito é para o atendimento da irrigação, visto que a bacia hidrográfica propicia boas condições para a agricultura irrigada e a geração de energia elétrica.

Para estabelecer a prioridade da vazão de referência, é necessário utilizar o elemento “condução”. A prioridade das demandas consuntivas é definida no elemento “toma”, conforme visto na seção 2.4.2. Em um primeiro momento, para se ter uma ideia inicial sobre as regiões da bacia hidrográfica do rio São Marcos, foi considerado que o primeiro nível (de acordo com o item 2.4.2, em conduções) das demandas seja atendido na sua totalidade. Com isso, é possível determinar as áreas que possuem déficit hídrico e distribuir as porcentagens para cada nível de demanda.

Foram testadas diferentes porcentagens em cada um dos 4 níveis de exigência para cada uma das demandas consideradas. Após as primeiras simulações, caso resulte em distribuições desiguais e demandas que não são atendidas, serão testadas outras porcentagens de níveis, definidas por uma análise de sensibilidade pelo usuário.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

### 4.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio São Marcos foi dividida em vinte e três sub-bacias, conforme apresentado na Figura 30. A Tabela 9 traz a identificação, a área e uma descrição simples de cada sub-bacia.

Tabela 9 - Identificação, área e descrição simples de cada sub-bacia.

Divisão	Nome	Área (km²)	Local
Sub-bacia 01	Rio Samambaia	870,24	Abrange a área localizada no alto São Marcos. Faz parte dos municípios de Cristalina e uma pequena parte do Distrito Federal.
Sub-bacia 02	Ribeirão Capipumba	684,53	Está localizada na região mais ao norte da bacia. Ocupa parte dos municípios de Cristalina e Unaí.
Sub-bacia 03	Alto São Marcos	945,24	Compreende a área de drenagem do rio São Marcos. Ocupa parte dos municípios de Cristalina e Unaí.
Sub-bacia 04	Ribeirão Soberbo	576,98	Compreende a área de drenagem do ribeirão Soberbo. Está localizada apenas no estado de Minas Gerais, no município de Unaí.
Sub-bacia 05	Córrego do Rocha	90,91	Está localizado na divisa de três municípios, sendo eles Paracatu, Unaí e Cristalina.
Sub-bacia 06	Ribeirão Arrojado	418,58	Localizado também no alto São Marcos, faz parte apenas do município de Cristalina.
Sub-bacia 07	Ribeirão Mundo Novo	351,39	Localizado a montante do Reservatório de Batalha, é um dos afluentes do rio São Marcos.
Sub-bacia 08	Médio São Marcos	204,93	Localizado na porção média do alto São Marcos, está a montante do reservatório de Batalha. Faz parte dos municípios de Paracatu e Cristalina.

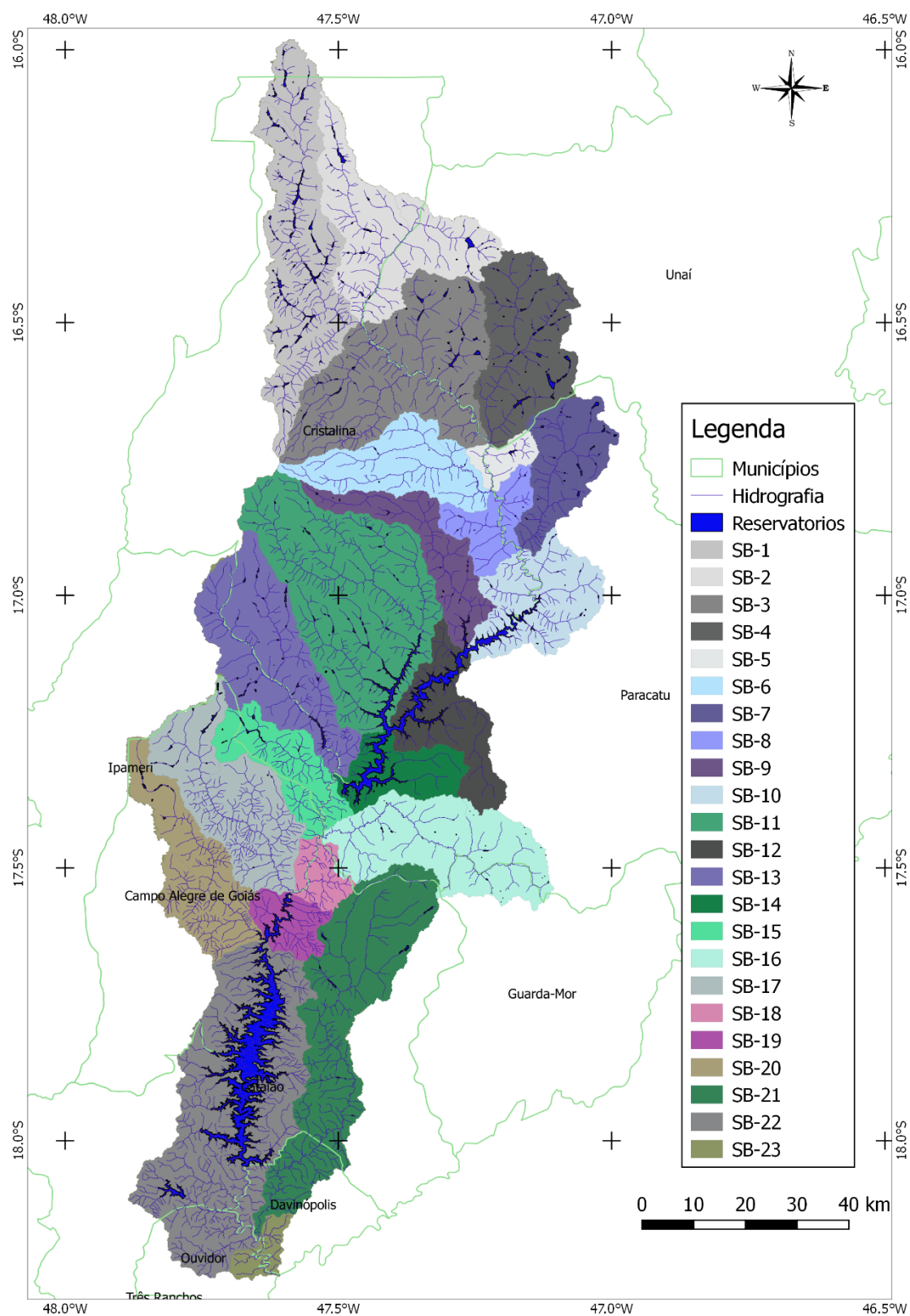


<b>Divisão</b>	<b>Nome</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Local</b>
Sub-bacia 09	Ribeirão Cristal	332,30	Compreende uma pequena parte do reservatório de Batalha. Está inteiramente localizado no município de Cristalina.
Sub-bacia 10	Alto Batalha	438,37	Compreende a porção final do Reservatório de Batalha. Faz parte dos municípios de Cristalina e Paracatu
Sub-bacia 11	Ribeirão São Firmino	1166,52	É um dos grandes afluentes de Batalha. Localizado na porção média da bacia do rio São Marcos no município de Cristalina.
Sub-bacia 12	Médio Batalha	355,03	Compreende parte da drenagem do reservatório de Batalha. Faz parte dos municípios de Cristalina e Paracatu
Sub-bacia 13	Ribeirão Castelhana	696,43	Compreende a área de drenagem do ribeirão Castelhana. Está localizada a montante do reservatório de Batalha. Faz parte dos municípios de Ipameri, Campo Alegre de Goiás e Cristalina.
Sub-bacia 14	Baixo Batalha	255,84	Compreende a área de drenagem da parte inicial do reservatório de Batalha. Faz parte dos municípios de Paracatu e Cristalina.
Sub-bacia 15	Ribeirão das Éguas	316,81	Compreende a área de drenagem do ribeirão das Éguas. Faz parte dos municípios de Ipameri, Campo Alegre de Goiás e Paracatu.
Sub-bacia 16	Rio da Batalha	662,17	Compreende a área de drenagem do rio da Batalha, localizado entre os reservatórios de Batalha e Serra do Facão. É um dos afluentes do rio São Marcos. Faz parte dos municípios de Guarda-Mor, Paracatu e Catalão
Sub-bacia 17	Rio Ponte Alta	610,98	É um dos importantes afluentes do rio São Marcos. Está localizado entre os reservatórios de Batalha e Serra do Facão. Faz parte do município de Campo Alegre de Goiás
Sub-bacia 18	Ribeirão Paulista	118,97	Localizado a montante do reservatório da Serra do Facão, próximo ao barramento.
Sub-bacia 19	Alto Serra do Facão	151,06	Compreende a área de drenagem de parte do reservatório da Serra do Facão. Faz parte dos municípios de Catalão e Campo Alegre de Goiás

<b>Divisão</b>	<b>Nome</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Local</b>
Sub-bacia 20	Ribeirão Imburucu	466,86	Compreende a área de drenagem do ribeirão Imburucu. É um dos afluentes do reservatório da Serra do Facão, localizado no baixo São Marcos. Faz parte dos municípios de Campo Alegre de Goiás e Ipameri
Sub-bacia 21	Rio São Bento	948,61	É um dos grandes afluentes do Rio São Marcos. Sua foz está localizada a jusante do reservatório da Serra do Facão, próximo da foz do rio São Marcos. Faz parte dos municípios de Davinópolis, Catalão e Paracatu
Sub-bacia 22	Baixo São Marcos	1369,94	Compreende grande parte da área de drenagem do reservatório da Serra do Facão. Faz parte dos municípios de Campo Alegre de Goiás, Catalão, Davinópolis e Ouvidor
Sub-bacia 23	Foz do Rio São Marcos	52,22	Compreende a área de drenagem da foz do rio São Marcos. Ocupa parte dos municípios de Davinópolis e Ouvidor

Fonte: Autor (2019).

Figura 30 - Divisão das sub-bacias na bacia hidrográfica do rio São Marcos



Fonte: Autor (2019).

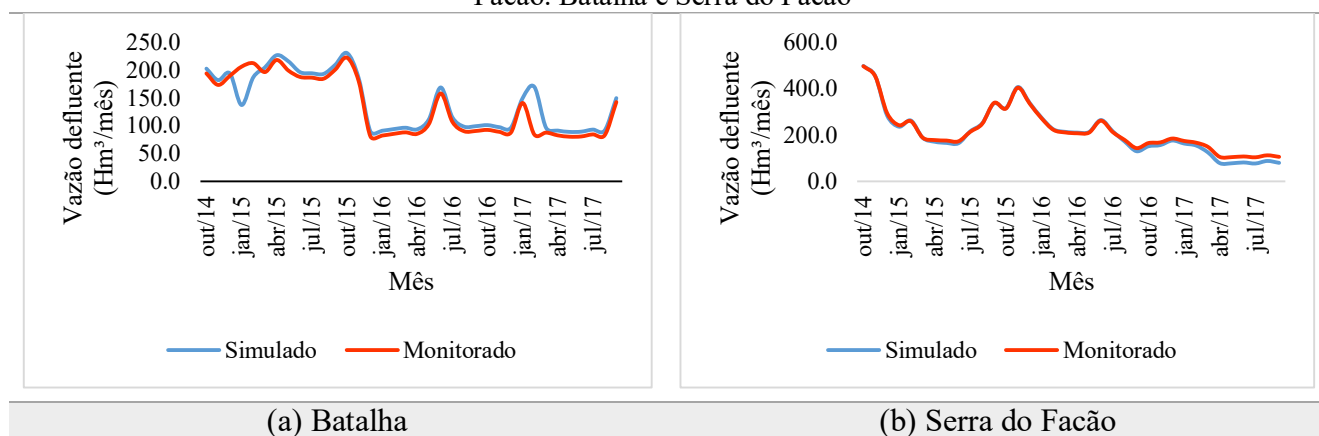
## 4.2 Topologia

A topologia do sistema hídrico da bacia hidrográfica do rio São Marcos é traçada diretamente na interface da ferramenta computacional AQUATOOL. Para o auxílio da locação de nós e demais elementos, foi utilizado uma imagem da bacia hidrográfica como fundo. Os dados de entrada pontuais referentes às demandas mensais outorgadas e às vazões afluentes foram lançados na topologia, bem como os dados que caracterizam o volume e a área dos reservatórios. O **Anexo A** apresenta a topologia do sistema hídrico na bacia hidrográfica do rio São Marcos.

## 4.3 Balanço Hídrico

O balanço hídrico é fundamental para as análises dos cenários de otimização. Fornece a variação mensal de vazão nos trechos ao longo do rio São Marcos, nos afluentes (sub-bacias), vazões afluente e defluente nos reservatórios de acumulação e variação mensal do volume de acumulação. A Figura 31 ilustra a comparação entre o valor de vazão defluente monitorado pelo SAR com o simulado na ferramenta AQUATOOL. Verificou-se que, acordo com o coeficiente de determinação CD do Excel, as séries apresentam correlação 0,93 para Batalha e 0,99 para Serra do Facão, o que permite afirmar que o balanço hídrico foi satisfatório.

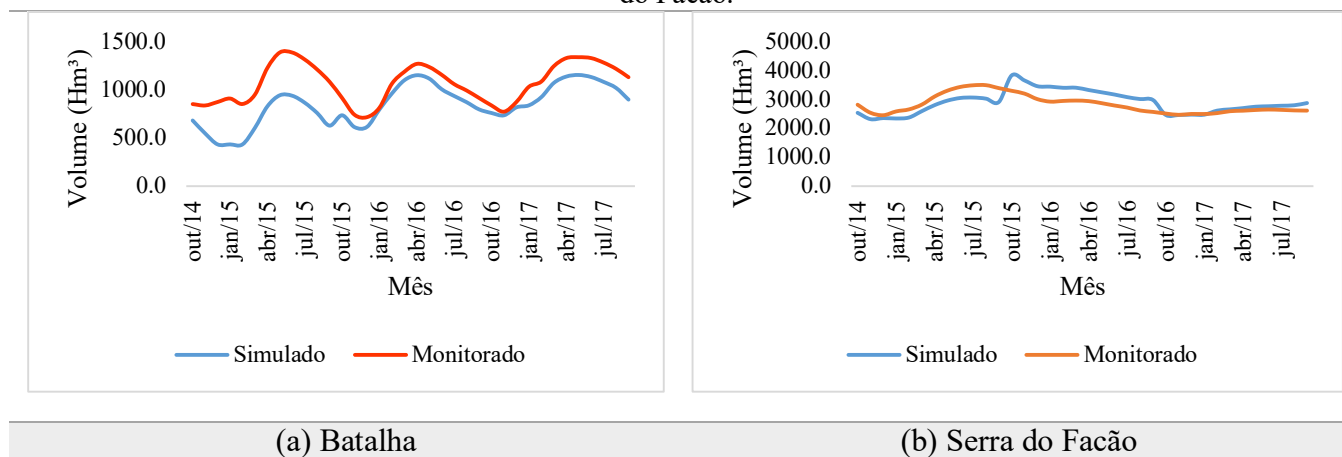
Figura 31 – Vazão defluente simulada e monitorada nos reservatórios de: (a) Batalha; (b) Serra do Facão. Batalha e Serra do Facão



Fonte: Autor (2019).

A Figura 32 traz a variação do volume reservado em Batalha e Serra do Facão a partir do balanço hídrico em AQUATOOL em comparação com os dados fornecidos pela central hidrelétrica. Ressalta-se que a variação de volume simulada segue a mesma tendência do volume observado, porém a correlação entre as séries se mostrou menor, contudo ainda satisfatório, sendo 0,77 para o reservatório de Batalha e 0,62 para Serra do Facão. Tal discrepância tem relação com algumas considerações simplificadoras assumidas na ferramenta AQUATOOL, tais como: a batimetria dos reservatórios considera apenas dez pares de valores de área superficial e volume reservado; não foi considerada a interação com o aquífero; foram mantidos valores mensais fixos de evaporação superficial.

Figura 32 - Variação de volume simulado e monitorado nos reservatórios de: (a) Batalha; (b) Serra do Facão.

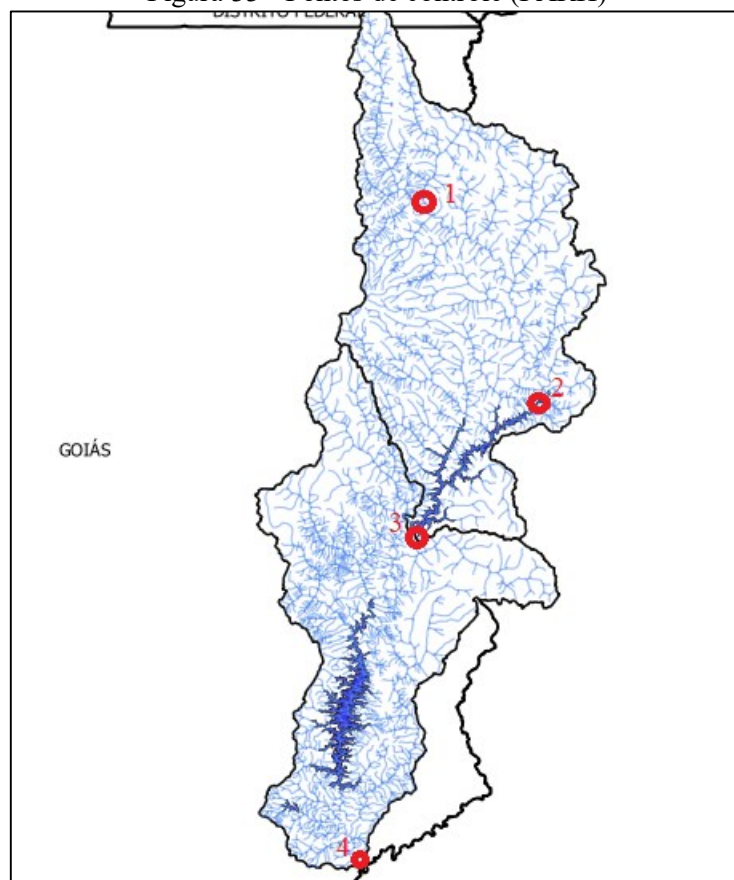


Fonte: Autor (2019).

#### 4.4 Determinação da $Q_{7,10}$

Afim de comparação dos valores obtidos neste estudo, foram confrontados os resultados com os apresentados no Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão Hídrica São Marcos (PARH São Marcos), em quatro pontos de controle situados na região (Figura 33) e apresentados na Tabela 10.

Figura 33 - Pontos de controle (PARH)



Fonte: Autor (2019).

Tabela 10 - Dados dos pontos de controle

Pontos de Controle	Descrição do Ponto de Controle	PARH São Marcos		Método de Gumbel e Descarga específica	
		Área (km <sup>2</sup> )	Q <sub>7,10</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Área (km <sup>2</sup> )	Q <sub>7,10</sub> (m <sup>3</sup> /s)
1	Confluência Rio Samambaia – São Marcos	1.675,83	3,4	1.564,75	4,22
2	Estação – 60020000	2.848,95	9,19	2.887,49	11,56
3	UHE Batalha	2.183,06	16,96	2.258,71	18,99
4	Foz do rio São Marcos	5.242,56	33,56	5.423,53	26,45

Fonte: Adaptado do PARH

Nos três primeiros pontos de controle os valores calculados no estudo são próximos dos obtidos pelo PARH São Marcos com diferença de 10% na UHE Batalha, sendo a maior diferença na foz do rio São Marcos com valores próximos a 21%. A diferença entre os valores encontrados pode ser explicada pelo método da descarga específica, que foi usado para o cálculo da vazão  $Q_{7,10}$  em todas as sub-bacias. A região do baixo São Marcos (jusante de Batalha), possui relevo e uso e ocupação diferente da região do alto São Marcos, além do tamanho da bacia hidrográfica, que não pode ser considerada pequena. Tais fatores podem

explicar o aumento da diferença entre as vazões ao longo da bacia hidrográfica, chegando em seu máximo na foz. Outro fator que contribui foi a utilização de apenas três anos de série histórica, quando o ideal para o cálculo da  $Q_{7,10}$  são, no mínimo, de dez anos.

#### 4.5 Determinação da $Q_{95}$

Os valores encontrados para os pontos de controle (Figura 33) foram comparados com os obtidos pelo PARH São Marcos e apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados dos pontos de controle

Pontos de Controle	Descrição do Ponto de Controle	PARH São Marcos		Método da Curva de Permanência	
		Área (km <sup>2</sup> )	$Q_{95}$ (m <sup>3</sup> /s)	Área (km <sup>2</sup> )	$Q_{95}$ (m <sup>3</sup> /s)
1	Confluência Rio Samambaia – São Marcos	1.675,83	5,77	1.564,75	4,22
2	Estação – 60020000	2.848,95	15,57	2.887,49	18,28
3	UHE Batalha	2.183,06	26,15	2.258,71	22,89
4	Foz do rio São Marcos	5.242,56	48,93	5.423,53	30,17

Fonte: Adaptado do PARH

Assim como para a vazão  $Q_{7,10}$ , a maior diferença também foi encontrada na foz do rio São Marcos com valores próximos de 39%. Nas áreas com maior conflitos e objetivo principal de análise do estudo (alto São Marcos), as vazões de referência se mostraram satisfatórias, com valores próximos aos encontrados pelo Comitê da bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, com diferença de 13% na UHE Batalha.

A Tabela 12 apresenta os valores das vazões  $Q_{7,10}$  e  $Q_{95}$  nos exutórios de todas as sub-bacias presentes na área de estudo.

Tabela 12 - Vazões de referência no exutório das sub-bacias

Sub-bacias	Área (km <sup>2</sup> )	$Q_{7,10}$ anual (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{95}$ anual (m <sup>3</sup> /s)
Rio Samambaia	870,24	3,06	3,59
Ribeirão Capipumba	684,53	1,09	1,51
Alto São Marcos	945,24	0,41	0,98
Ribeirão Soberbo	576,98	7,99	8,33
Córrego do Rocha	90,91	0,07	0,27
Ribeirão Arrojado	418,58	1,11	1,36
Ribeirão Mundo Novo	351,39	1,04	1,25
Médio São Marcos	204,93	0,3	0,12

<b>Sub-bacias</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Q<sub>7,10</sub> anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q<sub>95</sub> anual (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>Ribeirão Cristal</b>	332,30	0,47	0,68
<b>Alto Batalha</b>	438,37	0,61	0,87
<b>Ribeirão São Firmino</b>	1166,52	2,62	3,32
<b>Médio Batalha</b>	355,03	0,24	0,46
<b>Ribeirão Castelhana</b>	696,43	2,08	0,94
<b>Baixo Batalha</b>	255,84	0,2	0,15
<b>Ribeirão das Éguas</b>	316,81	0,23	0,43
<b>Rio da Batalha</b>	662,17	0,25	0,89
<b>Rio Ponte Alta</b>	610,98	1,66	0,83
<b>Ribeirão Paulista</b>	118,97	0,15	0,16
<b>Alto Serra do Facão</b>	151,06	0,12	0,2
<b>Ribeirão Imburucu</b>	466,86	0,81	0,63
<b>Rio São Bento</b>	948,61	1,22	1,28
<b>Baixo São Marcos</b>	1369,94	0,42	1,85
<b>Foz do Rio São Marcos</b>	52,22	0,3	0,07

Fonte: Autor (2019).

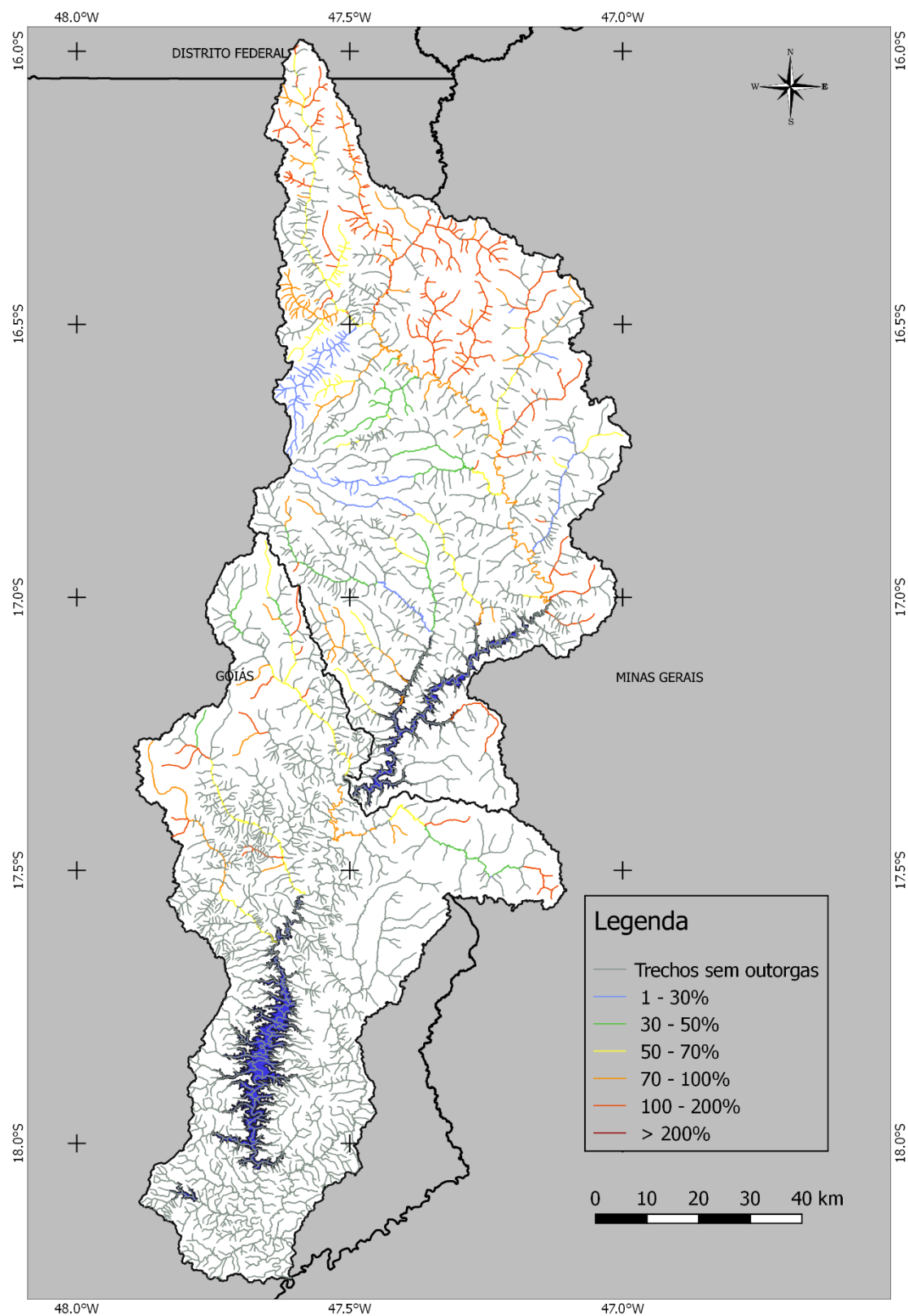
## 4.6 Otimização do aproveitamento hídrico

### 4.6.1 Impacto da substituição da vazão de referência anual pelas sazonais na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio São Marcos

O impacto da substituição da vazão Q<sub>7,10</sub> e Q<sub>95</sub> anuais pelas sazonais foi avaliado por meio de mapas de disponibilidade hídrica ao longo de toda hidrografia da bacia hidrográfica do rio São Marcos. Os resultados foram analisados considerando duas estações pluviométricas (estiagem e chuvosa). A situação atual da bacia hidrográfica do rio São Marcos apresenta uma série de regiões com vazões outorgadas acima do permitido, conforme apresentado na Figura 34, levando teoricamente a conflitos e falta de água em períodos críticos. Tal fato incentivou a análise de critérios mais permissivos.



Figura 34 - Percentual hídrico utilizado baseado nos critérios vigentes com base anual



Fonte: Autor (2019).

Para determinar as áreas com déficits, foram levantados os dados das vazões de referência de vários trechos da bacia hidrográfica do rio São Marcos, bem como suas demandas existentes e posteriormente feita a razão da demanda pela vazão outorgável. A situação atual da bacia hidrográfica apresenta mais de 12% de toda área superando o limite outorgável (50% da  $Q_{7,10}$  para Minas Gerais e 70% da  $Q_{95}$  para Goiás). Não foram encontradas áreas que superem os 200% do limite. No geral, aproximadamente 87% da bacia hidrográfica está abaixo dos limites estabelecidos, onde 41% estão na porção baixa do rio São Marcos, ou seja, a jusante do reservatório de Batalha. Apesar de grande parte da bacia estar com as demandas inferiores ao limite outorgável, em sua maioria, localiza-se no baixo São Marcos, o que pode ser observado na Figura 34.

Uma alternativa para a melhoria na disponibilidade hídrica é a utilização da vazão ecológica considerando um período sazonal. Em uma primeira análise, os dados das estações fluviométricas foram agrupados apenas para o período de seca. Vale ressaltar um aspecto referente aos resultados da comparação entre as  $Q_{7,10}$  seca e as  $Q_{7,10}$  anuais. Considerando que os menores valores de vazão em um determinado ano são encontrados no período de estiagem, seria esperado que as  $Q_{7,10}$  para o período sazonal seco resultassem nos mesmos valores estimados considerando um período anual. Entretanto, os resultados apresentados neste estudo mostram uma situação contrária, com grandes diferenças. Estes resultados podem ser justificados pela metodologia utilizada na estimativa destas vazões. No caso deste trabalho, para o cálculo das vazões de referência para os meses secos, exclui-se os meses referentes ao período chuvoso (outubro a março), considerando apenas os demais (estiagem), ou seja, de abril a setembro. Entretanto, a estimativa da  $Q_{7,10}$  exige um período de análise anual, levando a substituição dos meses excluídos (outubro a março) pelos meses referentes a estiagem (abril a setembro) do próximo ano com dados disponíveis. Assim, a estimativa é feita considerando 12 meses “secos”. Isto pode ser a causa das diferenças encontradas.

Outros estudos revelaram o aumento do potencial de aproveitamento hídrico após a mudança de critério de cálculo de anual para sazonal, principalmente no período chuvoso (EUCLYDES, FERREIRA & FARIAS FILHO, 2006; SILVA, MARQUES & LEMOS, 2011; BOF, 2010; JHUNIOR, 2017), onde o acréscimo variou entre 10% a 379%, e em casos específicos a 2.488% (COSTA, 2015). Além deste grande potencial nos meses de cheias,

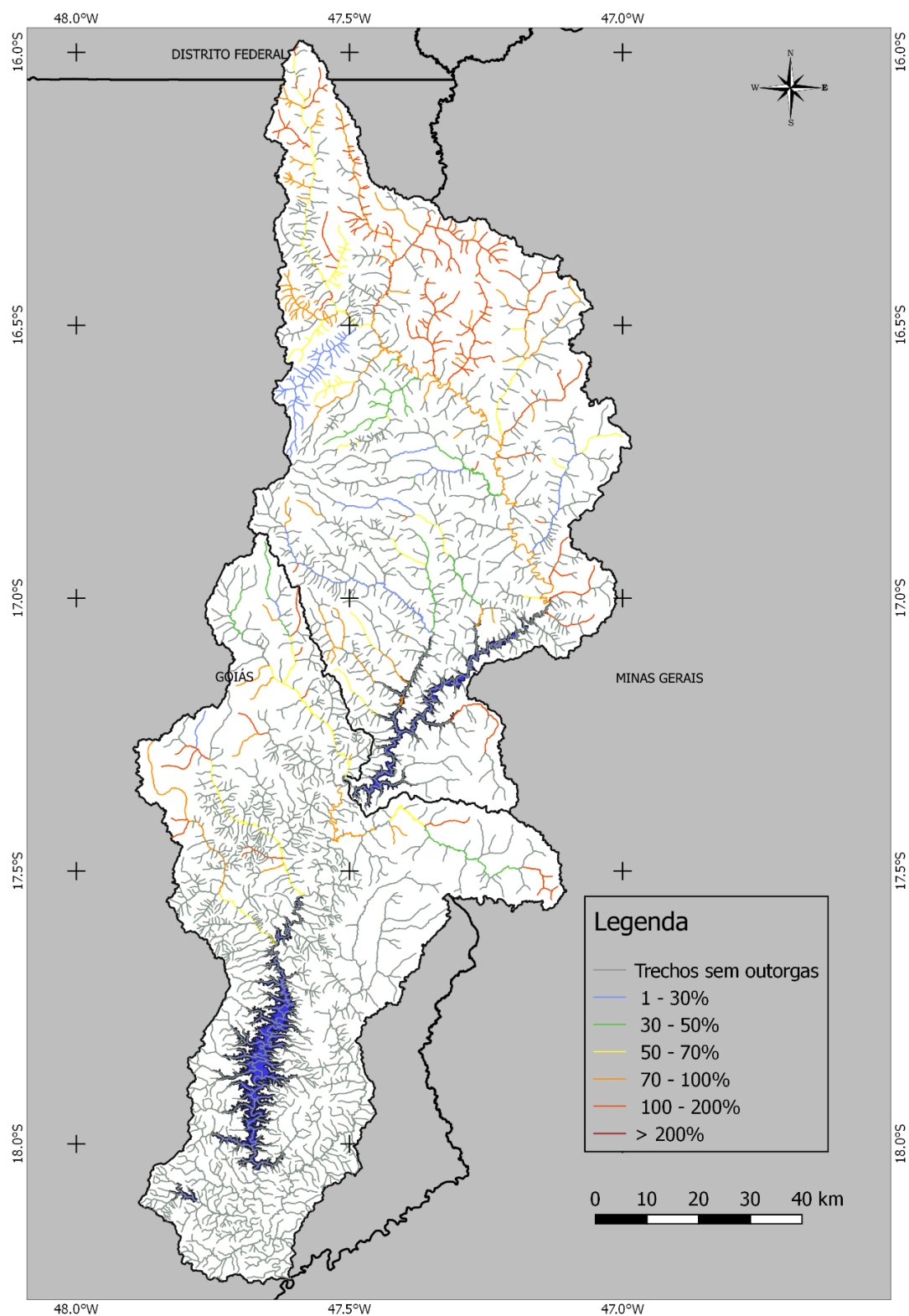
outros autores também encontraram situações onde a troca de critério não é justificável (FLUMIGNAN et al. 2016; CORDEIRO & MARQUES, 2012; PRUSKI et al. 2014), em que nos meses de estiagem, a base sazonal resultou em vazões com valores até 37% menores, o que gera o questionamento sobre os riscos aos ecossistemas aquáticos.

Os mapas de disponibilidade para as situações de “chuva” e “seca” são apresentados nas Figuras 35 e 36 respectivamente. As substituições analisadas, período anual pelos sazonais, na estimativa da  $Q_{7,10}$  buscaram propiciar um aumento na disponibilidade visando atender atividades humanas, em grande parte referentes, de certa forma, aos aspectos econômicos (consumo industrial e irrigação). Assim, os resultados positivos foram aqueles que permitiram uma utilização maior da água na bacia do rio São Marcos para satisfazer estas demandas (irrigação, consumo industrial, abastecimento público). Aspectos ambientais estão inclusos apenas na estimativa da vazão mínima residual, não havendo nenhum estudo aprofundado. Assim, as substituições que favorecem a utilização para atividades humanas não são, necessariamente, favoráveis a preservação ambiental.

A disponibilidade hídrica foi classificada de acordo com a escala de cores proposta no item 3.11.1. Ao se considerar o período seco (entre os meses de abril a setembro), as áreas com disponibilidade hídrica entre 0 e 30% ocupam a maior parte da bacia hidrográfica. Estas regiões estão principalmente a jusante do reservatório de Batalha. As regiões mais críticas estão situadas, no geral, a montante de Batalha e possuem mais de 20% da área total da bacia hidrográfica, onde 18% estão entre 100 e 200% do limite máximo outorgável e os outros 2% acima dos 200% do limite. Se comparado a situação atual apresentada anteriormente, percebe-se um aumento de aproximadamente 8% das áreas críticas, por volta de 1.000 km<sup>2</sup>.

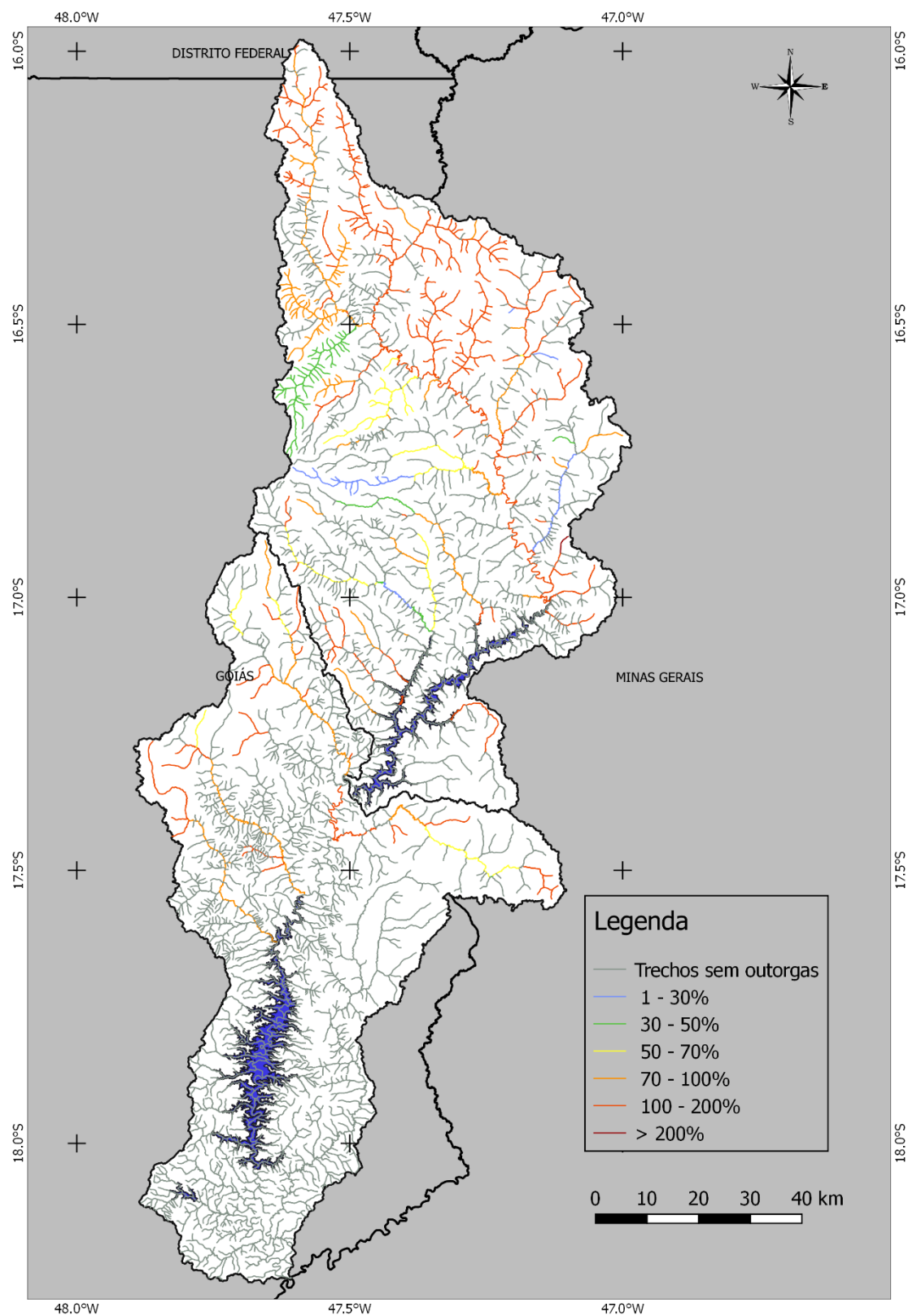
Ao se considerar o período chuvoso, 10% de toda área da bacia ainda permanece acima do máximo outorgável, apenas 2% a menos do que a situação atual da bacia hidrográfica. Tal fato pode ser justificado pela falta de grandes períodos chuvosos durante os anos de 2014 e 2017 e pelo pequeno intervalo de dados, o que leva a uma série de vazões mais homogênea, ou seja, com pouca variação entre os períodos.

Figura 35 - Percentual hídrico baseado nos critérios vigentes com base sazonal para o período chuvoso



Fonte: Autor (2019).

Figura 36 - Percentual hídrico baseado nos critérios vigentes com base sazonal para o período seco



Fonte: Autor (2019).

#### 4.6.2 Impacto da mudança do percentual máximo outorgável na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio São Marcos

De acordo com as Figura 34, a situação atual apresenta uma série de regiões com vazões outorgadas acima do permitido, levando teoricamente a conflitos e falta de água em períodos críticos. Tal fato incentivou a análise de critérios mais permissivos. Assim, agora são mostrados os impactos na mudança do percentual máximo da vazão de referência permitido para captação. São apresentadas as alterações na disponibilidade hídrica ao longo da bacia em função dos percentuais de 30%, 50%, 80% da  $Q_{7,10}$  e 70% da  $Q_{95}$ , todas com base anual. Os mapas das vazões captadas frente ao máximo permitido são mostrados nas Figuras 38 a 41. A escala de cores utilizada na classificação refere-se a proposta no item 3.11.1. A Tabela 13 mostra as porcentagens da área da bacia do rio São Marcos onde o volume captado é menor que o limite permitido, e aquelas onde este limite é ultrapassado, considerando cada um dos critérios analisados.

Tabela 13 - Porcentagens dos limites outorgáveis

<b>Máximo Outorgável</b>	<b>30% da <math>Q_{7,10}</math></b>	<b>50% da <math>Q_{7,10}</math></b>	<b>80% da <math>Q_{7,10}</math></b>	<b>70% da <math>Q_{95}</math></b>
<b>De 0 a 100% do máximo permitido</b>	72,9%	80,4%	97,7%	94,5%
<b>Superior a 100% do máximo permitido</b>	27,1%	19,6%	2,3%	5,5%

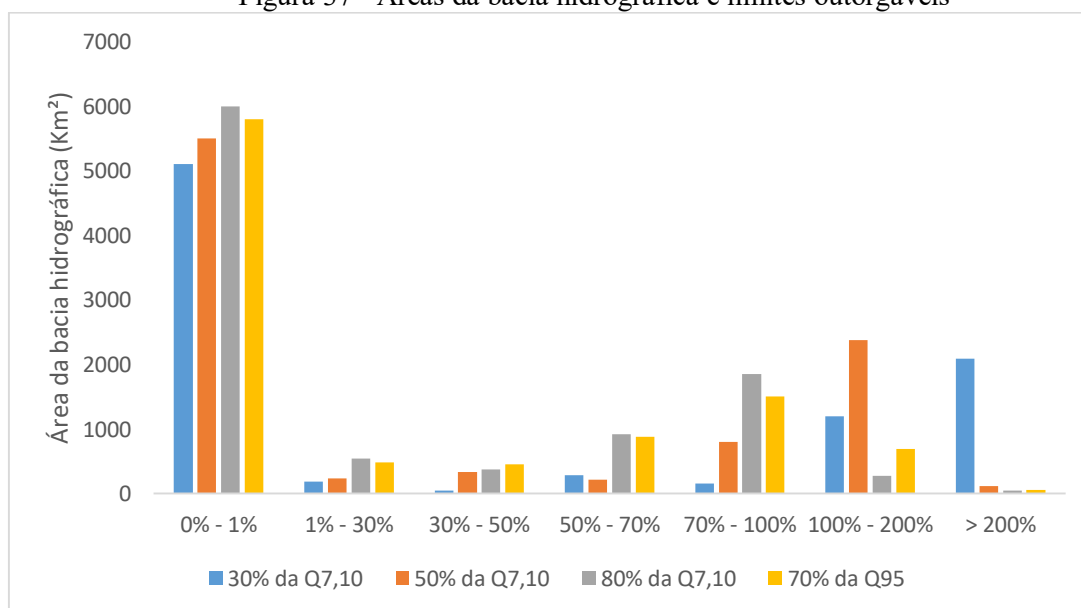
Fonte: Autor (2019).

O fato de se diminuir a porcentagem outorgável da  $Q_{7,10}$  leva à previsão de um aumento dos pontos críticos e diminuição da disponibilidade hídrica de uma forma geral na bacia. O oposto ocorre quando se aumenta a porcentagem outorgável da  $Q_{7,10}$  ou faz-se a mudança para o critério da  $Q_{95}$ .

Para a primeira mudança, de 30% da  $Q_{7,10}$ , o percentual da bacia hidrográfica, em área de drenagem, que respeita a legislação vigente é de 72,9%, ou seja, grande parte da hidrografia está em acordo com a vazão de referência (Figura 38). Entretanto, o mais importante é o impacto desta mudança naqueles cursos de água que excedem o máximo outorgável. Esta parcela equivale a 27,1 % da hidrografia da bacia.

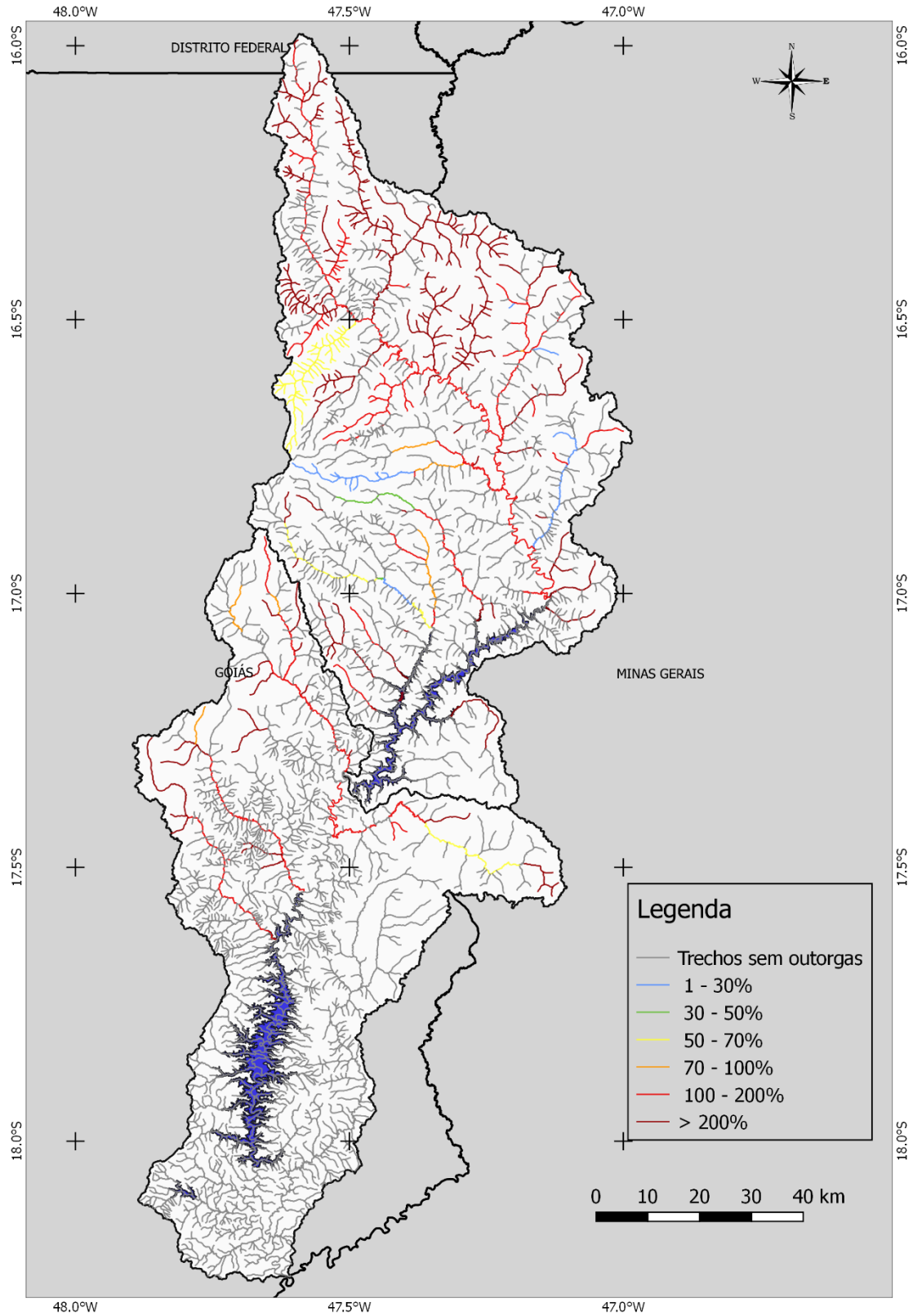
Observa-se que ao se aplicar o critério baseado em 30% da  $Q_{7,10}$  anual, grande parte dos afluentes da porção alta do rio São Marcos ficaram acima do limite outorgável. De acordo com a Figura 34, mais de 2.000 km<sup>2</sup> de área de contribuição de afluentes superam os 200%, o que corresponde a 17,2% de toda a área da bacia hidrográfica. Entre o intervalo de 100 a 200% acima do limite, tem-se ainda 1.200 km<sup>2</sup> de área, correspondendo a 9,9% da área total, ou seja, ao todo, são mais de 27% da área da bacia que estaria acima do limite de outorgas. Observando a Figura 38, é possível ver que poucos trechos superam o limite outorgável, o que é justificável pelo relevo acidentado e tipo de solo que existe na região do baixo São Marcos. Os resultados da análise deste critério indicam que grande parte da hidrografia do alto curso do rio São Marcos apresentaria uma piora no quadro já existente de conflitos pelo uso da água. Dessa forma, confirma-se a necessidade de adotar critérios menos restritivos, na busca de uma solução dos conflitos.

Figura 37 - Áreas da bacia hidrográfica e limites outorgáveis



Fonte: Autor (2019).

Figura 38 - Utilização da vazão de referência de 30% Q7,10



Fonte: Autor (2019).



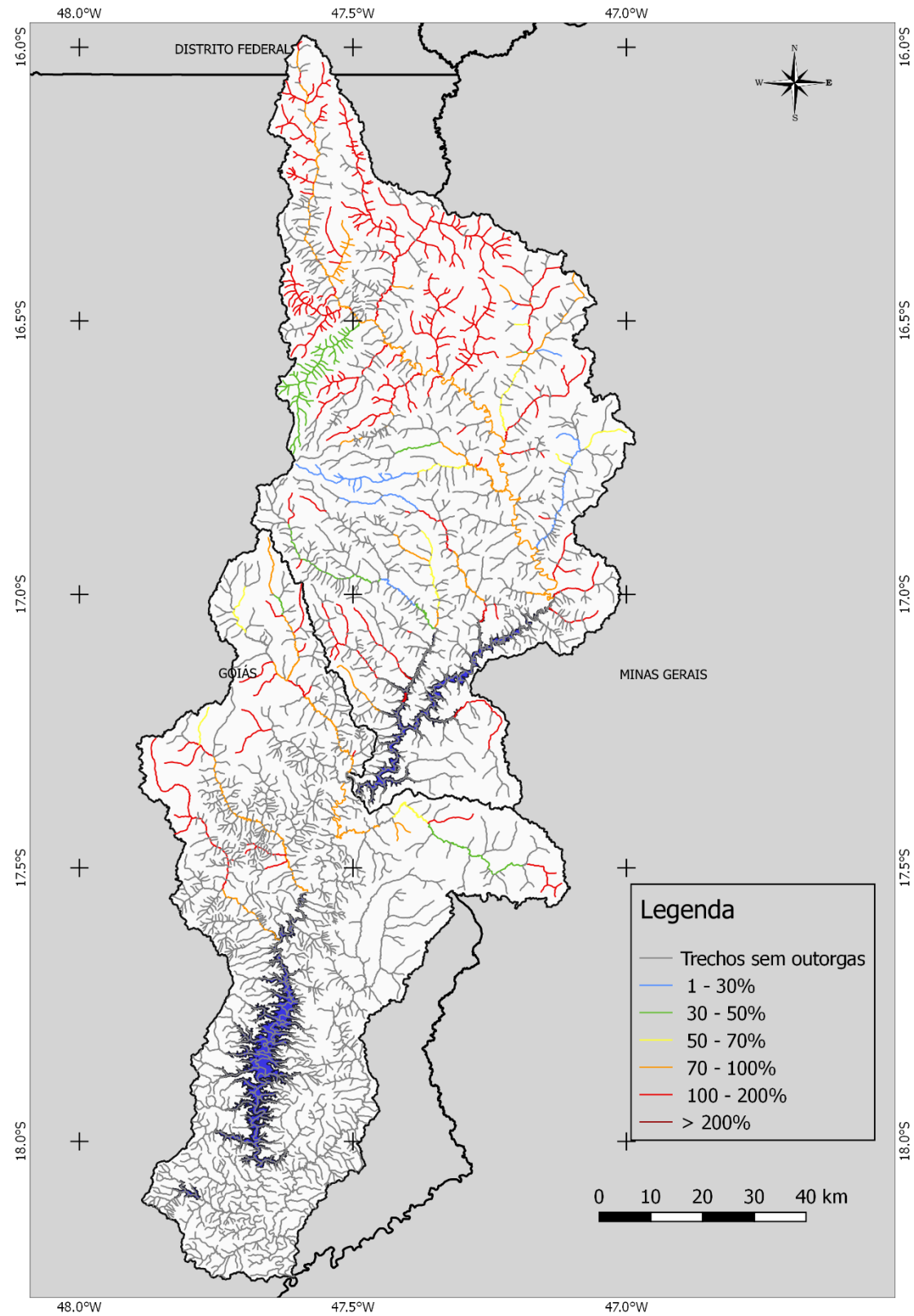
Outra análise feita foi a adoção da vazão de referência de 50% da  $Q_{7,10}$ , que é o critério atual do estado de Minas Gerais e onde está localizado parte da bacia hidrográfica. De acordo com a Figura 39, observa-se uma melhora no cenário, se comparado ao anterior. Mesmo assim, ainda existe grande parte do alto curso do rio São Marcos em situação de conflito.

Neste caso, menos de 1% da área da bacia ultrapassou os 200% do limite outorgável, porém, ainda se tem 19,5% de regiões que estão entre 100 e 200% acima dos valores definidos pela outorga. No trecho do baixo São Marcos, as poucas áreas que anteriormente estavam acima dos valores limites, agora estão entre 70 e 100%. No geral, mesmo este critério sendo menos restritivo, ainda se apresentam grandes áreas em estado de conflito, como as sub-bacias do Rio Samabaia, Ribeirão Capipumba, Alto São Marcos, Ribeirão Soberbo, entre outras, situadas a montante do reservatório de Batalha (ver Figura 39). A análise deste critério confirma que ainda é necessário que seja definido critério menos restritivos, como uma forma de tentar amenizar os conflitos já existentes na região.

O critério baseado no uso de 80% da  $Q_{7,10}$  anual foi proposto com o intuito de superestimar o volume outorgado e, consequentemente, minimizar os conflitos pelo uso da água. Ao analisar a disponibilidade hídrica do referido critério, observa-se, através da Figura 40, que alguns trechos do alto curso do rio São Marcos e rio Samambaia ainda se encontram fora de conformidade com o critério proposto. Porém, se comparado aos outros critérios, é o que trouxe um melhor resultado.

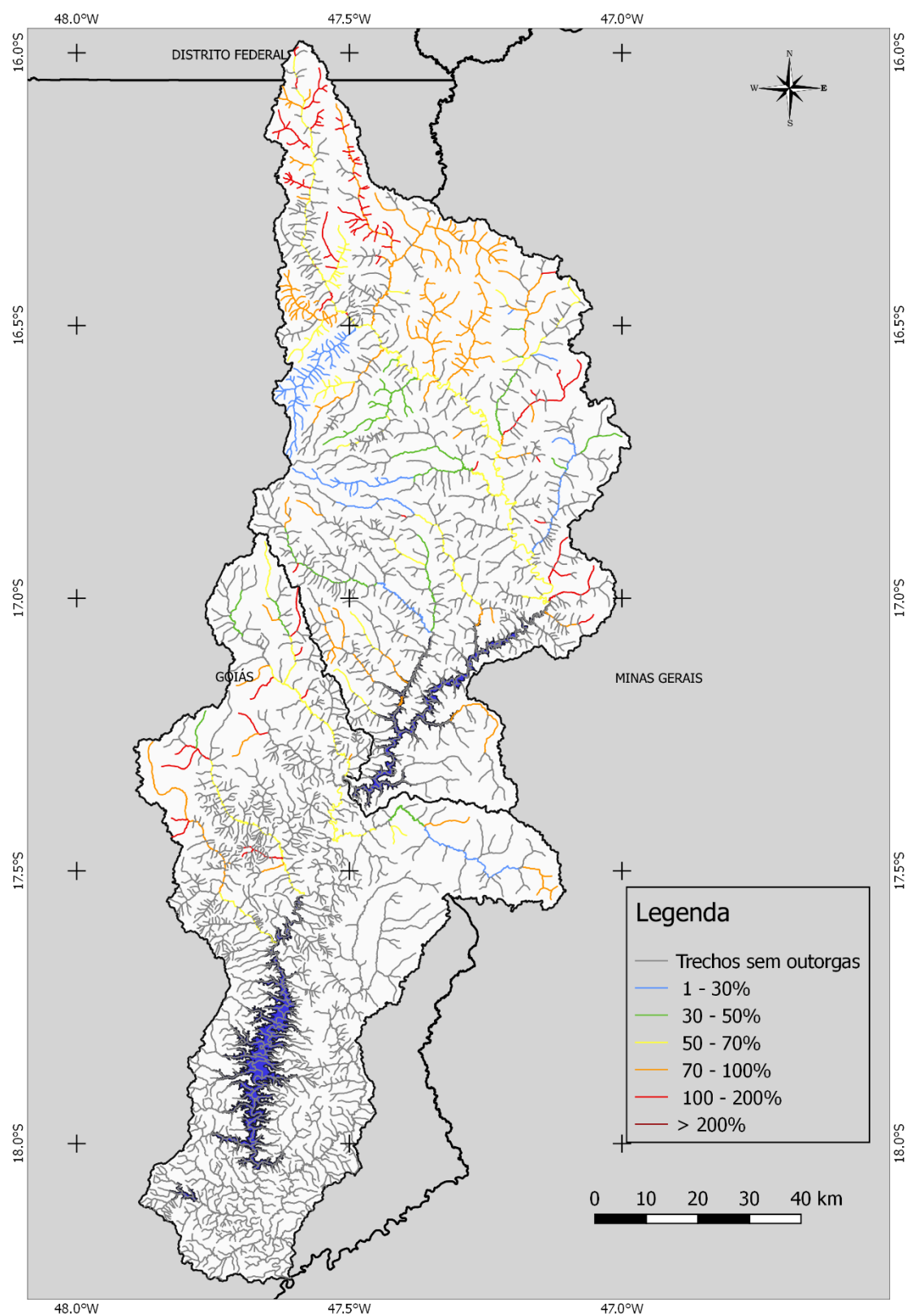
Os trechos que ultrapassam os limites de outorga se restringem a 2,25% da área total, sendo que os outros 97,75% da bacia hidrográfica ficariam abaixo do limite. As situações mais críticas ocorrem em alguns afluentes do rio Samambaia e principalmente no ribeirão Ponte Alta, com 118% do máximo outorgável (ver Figura 40). Avaliando os critérios baseados em 30, 50 e 80% da  $Q_{7,10}$  anual, esses trechos apresentaram vazão outorgada sempre acima de 100% da vazão de referência, o que corrobora a situação crítica dos mesmos, ressaltando que os órgãos gestores devem apresentar alternativas para regularização desta região da bacia hidrográfica.

Figura 39 - Utilização da vazão de referência de 50% Q7,10



Fonte: Autor (2019).

Figura 40 - Utilização da vazão de referência de 80% Q7,10

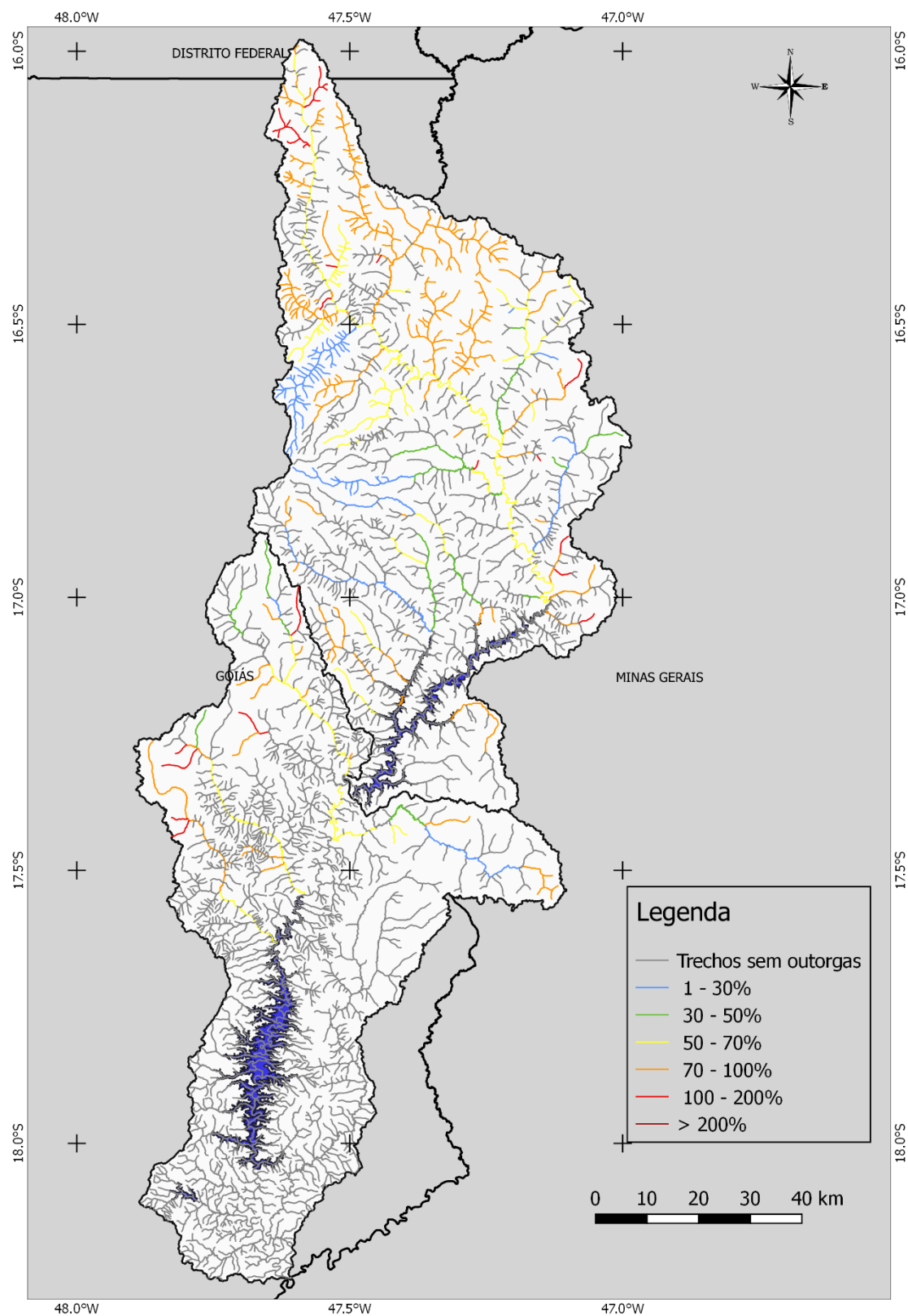


Fonte: Autor (2019).

A última análise feita foi a adoção da vazão de referência de 70% da  $Q_{95}$ , que é o critério atual do estado de Goiás e onde está localizado a maior parte da bacia hidrográfica. De acordo com a Figura 41, observa-se uma melhora no cenário, semelhante ao critério usado anteriormente. Mesmo assim, ainda existe alguns locais que merecem atenção, por ainda estarem acima do limite máximo outorgável.

Neste caso, menos de 1% da área da bacia ultrapassou os 200% do limite outorgável, porém, ainda se tem 5,68% de regiões que estão entre 100 e 200% acima dos valores definidos pela outorga. No trecho do baixo São Marcos, as poucas áreas que anteriormente estavam acima dos valores limites, agora estão entre 70 e 100%. No geral, mesmo este critério sendo menos restritivo, ainda se apresentam algumas áreas em estado de conflito.

Figura 41 - Utilização da vazão de referência de 70% Q95



Fonte: Autor (2019).

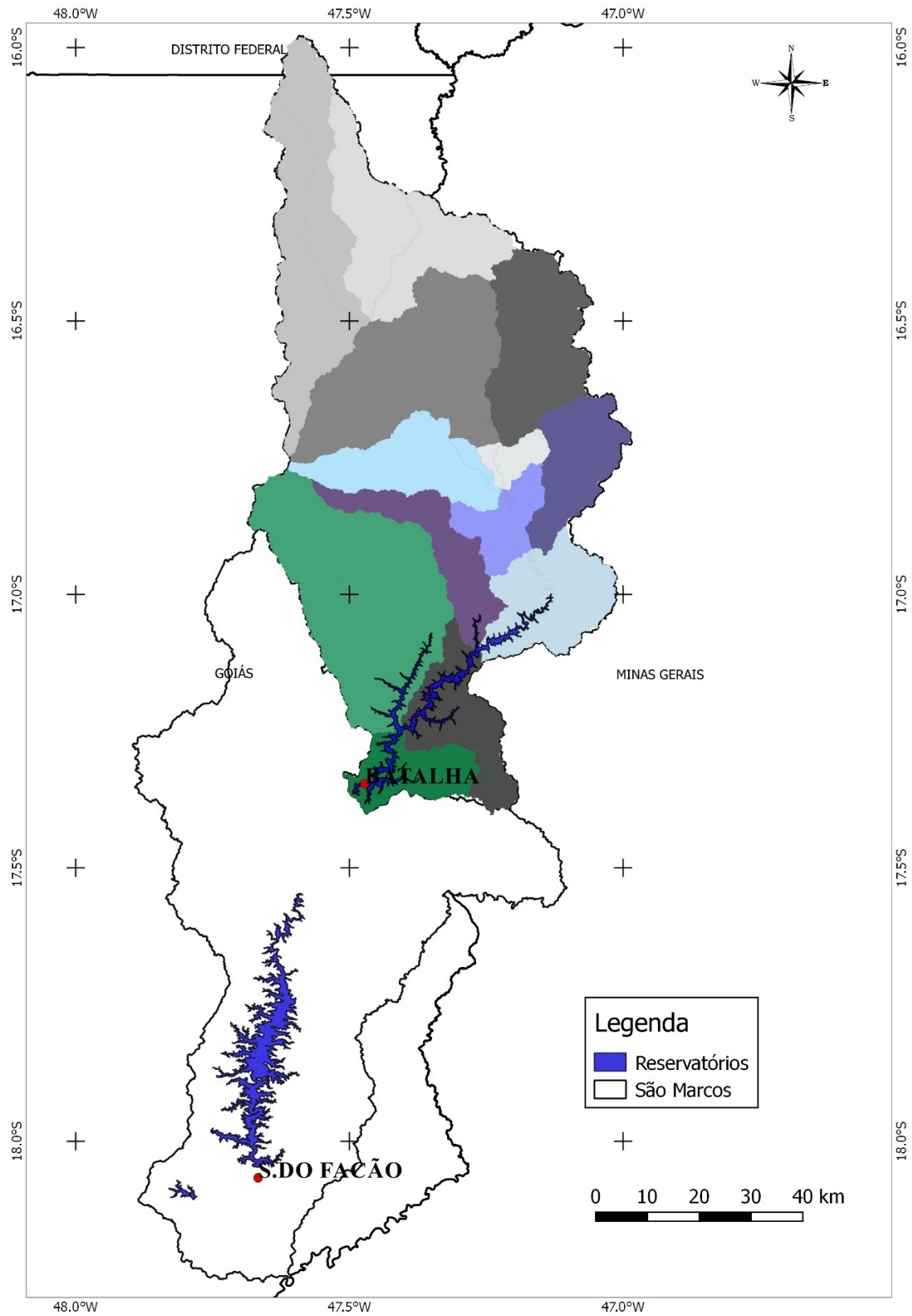
#### **4.7 Avaliação quanto as prioridades nas outorgas**

Os resultados da primeira análise referentes aos critérios de outorga (Figuras 38 a 41), mostraram que as regiões de cabeceira são aquelas onde, predominantemente, o volume outorgado é maior que o permitido. Assim, esta etapa teve como foco os trechos críticos destas regiões.

Entretanto, a criticidade analisada não se refere ao percentual captado acima da vazão de referência, mas sim as outorgas que demandam volumes que não garantem a vazão mínima residual nos rios. Vale lembrar que, nesta análise, a vazão ecológica é mantida em todos os trechos ao longo da bacia hidrográfica do Rio São Marcos e é considerada como a prioridade número 1, ou seja, antes de atender qualquer tipo de demanda, a vazão ecológica deve ser respeitada. A Figura 42 ilustra estas regiões mais críticas da bacia hidrográfica do rio São Marcos, inseridas nas sub-bacias dos rios Samambaia, Campipumba, São Marcos, Soberbo, do Rocha, Arrojado, Mundo Novo, Cristal, Batalha e São Firmino.

A Tabela 14 traz as principais informações de criticidade obtidas nesta análise. Nela são apresentadas as sub-bacias críticas, o percentual de meses em déficit frente ao período analisado, com os volumes permitidos para outorga, vazão mínima a ser respeitada e os valores mensais em déficit.

Figura 42 - Trechos mais críticos na bacia hidrográfica do rio São Marcos



Fonte: Autor (2019).

Tabela 14 - Sub-bacias com áreas críticas

Sub-bacia	% de meses em déficit	Atividades em conflito	Volume outorgado da atividade conflitante (hm³/mês)	Vazão de Referência (hm³/mês)	Máx. déficit durante o período analisado (hm³)	Máx. corte na vazão outorgada (%)	Déficit médio durante o período analisado (hm³)	Corte médio na vazão outorgada (%)
<b>Rio Samambaia</b>	33,3	Irrigação	7,94	4,02	2,1	27,0	2,00	25,2
<b>Ribeirão Capipumba</b>	33,3	Irrigação	2,83	1,45	2,8	99,0	2,11	74,6
<b>Alto São Marcos</b>	33,3	Irrigação	1,06	0,58	0,5	2,0	0,48	45,2
<b>Ribeirão Soberbo</b>	41,7	Irrigação	20,69	10,38	11,4	55,0	8,38	40,5
<b>Córrego do Rocha</b>	33,3	Irrigação	0,18	0,1	0,1	21,0	0,10	15,5
<b>Ribeirão Arrojado</b>	33,3	Irrigação	2,87	1,46	1,5	56,0	1,40	48,8
<b>Ribeirão Mundo Novo</b>	33,3	Irrigação	2,70	1,37	2,7	89,0	1,69	62,3
<b>Ribeirão Cristal</b>	33,3	Irrigação	1,23	0,63	1,2	95,0	1,01	82,1
<b>Alto Batalha</b>	33,3	Irrigação	1,58	0,81	1,6	99,0	1,47	93,0
<b>Ribeirão São Firmino</b>	0,0	Irrigação	6,78	3,45	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Médio Batalha</b>	0,0	Irrigação	0,63	0,34	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Autor (2019).



De uma forma geral, os resultados mostraram eventos máximos alarmantes, mas quando considerada sua ocorrência média, os déficits encontrados são significativamente menores (Tabela 14).

O relatório com o resumo da análise destas demandas pela ferramenta OPTIGES são apresentadas nas Figura 40 a 50, onde as figuras mostram:

- Valor médio mensal demandado, em  $\text{hm}^3$ ;
- Valor médio mensal captado superficialmente pela demanda, considerando déficit, em  $\text{hm}^3$ ;
- Valor médio mensal captado subterraneamente pela demanda, considerando déficit, em  $\text{hm}^3$ ;
- Déficit médio mensal do volume demandado, em  $\text{hm}^3/\text{mês}$ , causado por vazões baixas ou limitações impostas, tais como vazão mínima residual e prioridades entre demandas;
- Infiltração do volume captado, em  $\text{hm}^3$ , sendo no caso não considerado nas análises desta pesquisa;
- Valor médio mensal captado superficialmente pelo elemento “toma” ao qual a demanda está ligada, considerando o déficit, em  $\text{hm}^3$ ;
- Percentual de meses do período analisado (3 anos) onde o volume demandado foi atendido, conforme a garantia mensal;
- Percentual de volume total demandado atendido;
- Déficit máximo atingido nos meses do período analisado, em  $\text{hm}^3/\text{mês}$ ;
- Déficit máximo atingido em dois meses consecutivos durante o período analisado, em  $\text{hm}^3/\text{mês}$ ;
- Percentual de anos do período analisado que apresentaram meses em que ocorreram déficits, conforme a garantia anual:
- Falhas apresentadas durante o período analisado segundo o critério UTAH DWR;
- Falhas apresentadas durante o período analisado segundo o critério IPH2008;
- Número de meses com déficit;
- Número de meses com déficit em cada nível de exigência estipulado. Os níveis de exigência são especificados pela expressão “MAG”.

Para região da sub-bacia do rio Samambaia (Figura 43), 33,3% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 66,7%, chegando a um valor

máximo de 2,1 hm<sup>3</sup>/mês). A Figura 43 mostra os déficits mensais ao longo dos anos analisados.

Figura 43 - Relatório da sub-bacia do rio Samambaia referente à demanda de irrigação

1-D.1													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T. ANUAL
	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	7.94	95.28
SUM.SUPERF	5.78	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	6.35	5.79	5.79	87.15
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	2.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.58	2.14	8.01
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	5.78	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	7.93	6.35	5.79	5.79	87.15
GAR.MENS.: 66.7% ( 4 FALLOS)    GAR.VOLUM.: 91.5%    MAX.DEFIC.MENS.: 2.1    MAX.DEF.2 MES.CONTS: 4.3 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)    FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 4    POR MAGNITUDES (1-MAX 4-MIN): 1 DE MAG.1, 2 DE MAG.2, 1 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

Foram estimados cortes máximos na faixa de 27% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 indicado em “Por Magnitudes” da Figura 43), cerca de 2,14 hm<sup>3</sup>/mês. O valor médio mensal de déficit foi calculado em 2,0 hm<sup>3</sup> (média dos déficits médios de cada mês – indicação “déficit”, Figura 43, mostrado também na Tabela 14), sendo estimados cortes mensais para os períodos críticos de 25% do valor total da demanda, sendo uma estimativa média para os períodos críticos.

Para a região da sub-bacia ribeirão Capipumba, 33,3% dos meses apresentaram déficit (garantia mensal encontrada foi de 66,7%), e teve seu valor máximo de 2,8 hm<sup>3</sup>/mês. Foram estimados cortes de até 99% nas demandas mensais, porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, e ainda sim em alguns períodos ocorreram déficit frente ao volume outorgado. Ou seja, o fato da demanda da Figura 44 apresentar déficits ao longo do período analisado impediu que a demanda com outros usos (dessedentação animal, paisagismo, geração de energia elétrica) fosse atendida, para o mesmo período em questão. O valor médio mensal de déficit foi de 2,11 hm<sup>3</sup>/mês (média dos déficits médios de cada mês – indicação “déficit”) sendo estimados cortes mensais para os períodos críticos de 74,6% do valor total da demanda. A Figura 44 apresenta o resumo dos resultados encontrados.

Figura 44 - Relatório da sub-bacia do ribeirão Capipumba referente à demanda de irrigação

2-D.2													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T. ANUAL
	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	33.96
SUM.SUPERF	0.00	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	1.98	0.03	0.86	25.51
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	2.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	2.80	1.97	8.45
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	0.00	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	1.98	0.03	0.86	25.51
GAR.MENS.: 66.7% ( 4 FALLOS)    GAR.VOLUM.: 75.1%    MAX.DEFIC.MENS.: 2.8    MAX.DEF.2 MES.CONS: 4.8 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)    FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AVO, 0 POR 2 AVOS, 0 POR 10 AVOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 4    POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 1 DE MAG.1, 2 DE MAG.2, 1 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

A Figura 45 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia da porção do alto São Marcos. Para esta região, 33,3% dos meses apresentaram déficit, uma vez que a garantia mensal foi de 66,7%. O máximo déficit mensal encontrado foi de 0,5 hm<sup>3</sup>/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 2% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação “Por Magnitudes), indicado na Figura 45, cerca de 0,02 hm<sup>3</sup>/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,48 hm<sup>3</sup>/mês leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 45,2% do valor total da demanda (porcentagem da demanda indicado em “demanda” na Figura 45 – que equivale ao valor médio mensal de déficit.

Figura 45 - Relatório da sub-bacia do alto São Marcos referente à demanda de irrigação

3-D.3													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T. ANUAL
	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	12.72
SUM.SUPERF	0.53	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	0.74	0.53	0.53	10.81
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.53	0.53	1.91
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	0.53	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	0.74	0.53	0.53	10.81
GAR.MENS.: 66.7% ( 4 FALLOS)    GAR.VOLUM.: 85.0%    MAX.DEFIC.MENS.: 0.5    MAX.DEF.2 MES.CONS: 1.1 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)    FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AVO, 0 POR 2 AVOS, 0 POR 10 AVOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 4    POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 3 DE MAG.2, 1 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

A Figura 46 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do ribeirão Soberbo, indicado na Figura 42. Para esta região, 41,7% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 58,3% - “Gar. Mens.”, Figura 46), chegando a um valor máximo de 11,4 hm<sup>3</sup>/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 55% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido caracterizado pelo valor 0 em “Por Magnitudes” da Figura 46), cerca de 11,38 hm<sup>3</sup>/mês. O valor médio mensal de déficit de 8,38 hm<sup>3</sup> (média dos déficits médios de cada mês – “déficit”, Figura 46, mostrado também na Tabela 14) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de

40,5% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – “Demanda”, Figura 46 – que equivale ao valor médio mensal de déficit, também mostrado na Tabela 14).

Figura 46 - Relatório da sub-bacia do ribeirão Soberbo referente à demanda de irrigação

4-D.4													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	248.40
SUM.SUPERF	9.31	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	19.74	12.76	9.31	10.42	206.37
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	11.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	7.93	11.38	10.27	41.91
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	9.31	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	20.69	19.74	12.76	9.31	10.42	206.37
GAR.MENS.: 58.3% ( 5 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 83.1%      MAX.DEFIC.MENS.: 11.4      MAX.DEF.2 MES.CON: 21.6 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 5      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 4 DE MAG.2, 0 DE MAG.3, 1 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

A Figura 47 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Córrego do Rocha. Para esta região, 33,3% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 66,7% - Figura 47), chegando a um valor máximo de 0,1 hm<sup>3</sup>/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 21% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação “Por Magnitudes” da Figura 47), cerca de 0,04 hm<sup>3</sup>/mês. O valor médio mensal de déficit de 0,01 hm<sup>3</sup> (média dos déficits médios de cada mês – “Deficit”, Figura 47) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 15,5% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação “Demanda”, Figura 47 – que equivale ao valor médio mensal de déficit).

Figura 47 - Relatório da sub-bacia córrego do Rocha referente à demanda irrigação

5-D.5													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	2.16
SUM.SUPERF	0.09	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.09	0.09	0.09	1.88
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.40
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	0.09	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.09	0.09	0.09	1.88
GAR.MENS.: 66.7% ( 4 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 87.0%      MAX.DEFIC.MENS.: 0.1      MAX.DEF.2 MES.CON: 0.2 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 4      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 4 DE MAG.2, 0 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

A Figura 48 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Ribeirão Arrojado. Para esta região, 33,3% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 66,7% - Figura 48), chegando a um valor máximo de 1,5 hm<sup>3</sup>/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 56% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação “Por Magnitudes” da Figura 48), cerca de 1,60 hm<sup>3</sup>/mês. O valor médio mensal de déficit de 1,4 hm<sup>3</sup>

(média dos déficits médios de cada mês – “Deficit”, Figura 48) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 48,8% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação “Demanda”, Figura 48 – que equivale ao valor médio mensal de déficit).

Figura 48 - Relatório da sub-bacia do ribeirão Arrojado referente à demanda de irrigação

6-D.6													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T. ANUAL
SUM.SUPERF	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	34.44
SUM.SUBTER	1.32	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	1.91	1.32	1.32	28.83
DEFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FILT. ACUI	1.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	1.55	1.55	5.61
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.32	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	2.87	1.91	1.32	1.32	28.83
GAR.MENS.: 66.7% ( 4 FALLOS)    GAR.VOLUM.: 83.7%    MAX.DEFIC.MENS.: 1.5    MAX.DEF.2 MES.CONVS: 3.1 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)    FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 4    POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1, 4 DE MAG.2, 0 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

A Figura 49 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Ribeirão Mundo Novo. Para esta região, 33,3% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 66,7% - Figura 49), chegando a um valor máximo de 2,7 hm<sup>3</sup>/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 89% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação “Por Magnitudes” da Figura 49), cerca de 2,40 hm<sup>3</sup>/mês. O valor médio mensal de déficit de 1,69 hm<sup>3</sup> (média dos déficits médios de cada mês – “Deficit”, Figura 49) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 62,3% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação “Demanda”, Figura 49 – que equivale ao valor médio mensal de déficit).

Figura 49 - Relatório da sub-bacia ribeirão Mundo Novo referente à demanda de irrigação

7-D.7													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T. ANUAL
SUM.SUPERF	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	32.40
SUM.SUBTER	0.00	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	1.35	1.35	1.35	25.65
DEFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FILT. ACUI	2.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	1.35	1.35	6.75
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.00	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70	1.35	1.35	1.35	25.65
GAR.MENS.: 66.7% ( 4 FALLOS)    GAR.VOLUM.: 79.2%    MAX.DEFIC.MENS.: 2.7    MAX.DEF.2 MES.CONVS: 2.7 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)    FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 4    POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 1 DE MAG.1, 3 DE MAG.2, 0 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

A Figura 50 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Ribeirão Cristal. Para esta região, 33,3% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 66,7% - Figura 50), chegando a um valor máximo de 1,2 hm<sup>3</sup>/mês. Foram estimados cortes máximos na faixa de 95% da demanda atual (porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, caracterizado pelo valor 0 na indicação “Por

Magnitudes” da Figura 50), cerca de 1,17 hm<sup>3</sup>/mês. O valor médio mensal de déficit de 1,01 hm<sup>3</sup> (média dos déficits médios de cada mês – “Deficit”, Figura 50) leva a uma estimativa média de corte para os períodos críticos de 82,1% do valor total da demanda (porcentagem da demanda – indicação “Demanda”, Figura 50 – que equivale ao valor médio mensal de déficit).

Figura 50 - Relatório da sub-bacia ribeirão Cristal referente à demanda de irrigação

9-D.9													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	14.76
SUM.SUPERF	0.00	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	0.86	0.01	0.01	10.72
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	1.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.37	1.22	1.22	4.04
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	0.00	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	0.86	0.01	0.01	10.72
GAR.MENS.: 66.7% ( 4 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 72.6%      MAX.DEFIC.MENS.: 1.2      MAX.DEF.2 MES.CON: 2.4 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 4      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 1 DE MAG.1, 2 DE MAG.2, 1 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

A Figura 51 apresenta o relatório das análises para a sub-bacia do Alto Batalha. Para esta região, 33,3% dos meses apresentaram déficit (uma vez que a garantia mensal encontrada foi de 66,7% - Figura 51), chegando a um valor máximo de 1,6 hm<sup>3</sup>/mês. Foram estimados cortes de até 99% nas demandas mensais, porcentagem estimada para o primeiro nível de exigência para que não ocorresse nenhum mês com déficit frente ao exigido, e ainda sim em alguns períodos ocorreram déficit frente ao volume outorgado. Ou seja, o fato da demanda da Figura 51 apresentar déficits ao longo do período analisado impediu que a demanda com outros usos (dessedentação animal, paisagismo) fosse atendida, para o mesmo período em questão. Foram estimados cortes mensais para os períodos críticos de 93,0% do valor total da demanda.

Figura 51 - Relatório da sub-bacia do Alto Batalha referente à demanda de irrigação

10-D.10													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	1.58	18.96
SUM.SUPERF	0.00	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	0.44	0.02	0.02	13.20
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	1.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.15	1.57	1.57	5.88
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	0.00	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	0.44	0.02	0.02	13.20
GAR.MENS.: 66.7% ( 4 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 69.6%      MAX.DEFIC.MENS.: 1.6      MAX.DEF.2 MES.CON: 3.1 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AÑO, 0 POR 2 AÑOS, 0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 4 POR 1 MES, 0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 4      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 1 DE MAG.1, 3 DE MAG.2, 0 DE MAG.3, 0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

Para as sub-bacias Ribeirão São Firmino e Médio São Marcos, é interessante notar que, apesar de não terem ocorrido falhas no atendimento às demandas, as mesmas foram atendidas no limite da disponibilidade hídrica, pressupondo que novas outorgas ou mesmo o aumento dos volumes já

outorgados pode ocasionar falhas no atendimento das demandas. As Figuras 52 e 53 apresentam respectivamente os relatórios das sub-bacias São Firmino e Médio São Marcos.

Figura 52 - Relatório da sub-bacia ribeirão São Firmino referente à demanda de irrigação

11-D.11													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
SUM.SUPERF	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	81.36
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	6.78	81.36
GAR.MENS.: 100.0% ( 0 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 100.0%      MAX.DEFIC.MENS.: 0.0      MAX.DEF.2 MES.CONTS: 0.0 GAR.ANUAL: 100.0% ( 0 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DW: 0 POR 1 AÑO,      0 POR 2 AÑOS,      0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 0 POR 1 MES,      0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 0      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1,													

Fonte: Autor (2019).

Figura 53 - Relatório da sub-bacia Médio São Marcos referente à demanda de irrigação

12-D.12													
DEMANDA	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
SUM.SUPERF	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	7.56
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	7.56
GAR.MENS.: 100.0% ( 0 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 100.0%      MAX.DEFIC.MENS.: 0.0      MAX.DEF.2 MES.CONTS: 0.0 GAR.ANUAL: 100.0% ( 0 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DW: 0 POR 1 AÑO,      0 POR 2 AÑOS,      0 POR 10 AÑOS FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 0 POR 1 MES,      0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 0      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1,      0 DE MAG.2,      0 DE MAG.3,      0 DE MAG.4													

Fonte: Autor (2019).

#### 4.7.1 Reservatórios

A etapa referente à análise dos dois reservatórios presentes no rio São Marcos teve como base os resultados de disponibilidade hídrica para o critério de outorga atual em trechos imediatamente a montante e no próprio reservatório. As simulações foram focadas apenas no reservatório de Batalha, onde estão as maiores demandas de irrigação e geração de energia elétrica. As exigências mínimas consideradas na análise foram: respeitar a vazão mínima residual nos cursos a jusante do reservatório; atender as demandas atualmente existentes a montante e no próprio reservatório, conforme ordem de prioridade indicada no item 3.11.2; respeitar a cota mínima operacional da hidroelétrica, assim como os volumes mínimos turbinados para geração de energia. Além disso foi atribuída a vazão máxima turbinada no reservatório para verificar as possíveis falhas de atendimento.

A Tabela 15 traz, de forma resumida, as características e exigências operacionais dos reservatórios na bacia hidrográfica do rio São Marcos utilizadas no processo de otimização do aproveitamento hídrico.

Tabela 15 - Exigências operacionais dos reservatórios da bacia hidrográfica do rio São Marcos

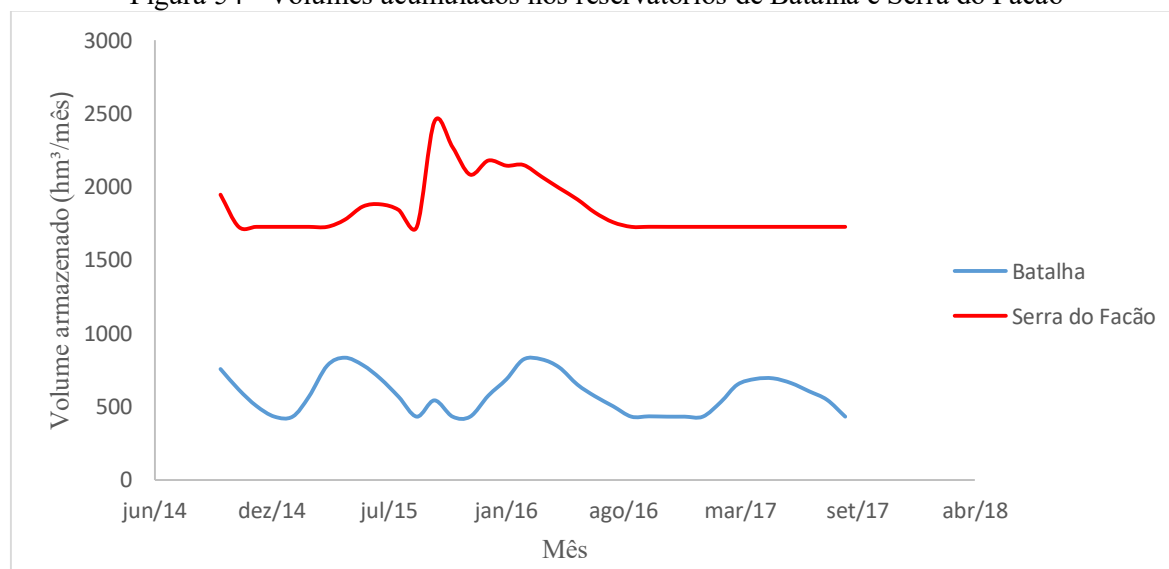
Reservatório	Mínimo Operacional		Máximo Operacional		Volume Útil (hm <sup>3</sup> )	Restrições de descarga (m <sup>3</sup> /s)	
	Cota (m)	Vol (hm <sup>3</sup> )	Cota (m)	Vol (hm <sup>3</sup> )		Mínima	Máxima
Batalha	785,0	430,05	800,0	1781,51	1351,53	30,1 <sup>1</sup> e 23 <sup>2</sup>	152,4
Serra do Facão	732,5	1725,09	756,0	5199,29	3474,2	-	-

<sup>1</sup> Período de piracema; <sup>2</sup> Fora do período de piracema

Fonte: Adaptado do Boletim de Monitoramento dos Reservatórios do rio Paranaíba.

A Figura 54 mostra os volumes acumulados em cada reservatório ao longo do período analisado, sendo os valores estimados a partir do balanço hídrico realizado na ferramenta computacional AQUATOOL.

Figura 54 - Volumes acumulados nos reservatórios de Batalha e Serra do Facão



Fonte: Autor (2019).

Durante as simulações, as vazões vertidas nos reservatórios de Batalha e Serra do Facão foram 100% atendidas e, em nenhum mês houve falha no atendimento quanto à geração de energia conforme apresentado nas Figuras 55 e 56. Seguindo as prioridades especificadas no



item 3.11.2, ao se priorizar a irrigação frente a geração de energia, o reservatório de Batalha, durante 27% dos meses esteve com seu volume de reserva no mínimo (430,05 hm<sup>3</sup>). Isso se deve às grandes demandas exigidas para irrigação à montante do reservatório, fazendo com que grande parte da vazão afluyente seja destinada para abastecimento dessas demandas e para manutenção da vazão mínima de referência, que como dito anteriormente, teve a maior prioridade.

Figura 55 - Relatório referente à demanda do reservatório de Batalha

15-Vazão Turbinada													
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
DEMANDA	92.54	88.88	87.81	82.86	84.15	87.70	82.75	80.27	80.70	84.47	82.86	141.18	1076.06
SUM.SUPERF	92.54	88.88	87.81	82.86	84.15	87.70	82.75	80.27	80.70	84.47	82.86	141.18	1076.17
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	92.54	88.88	87.81	82.86	84.15	87.70	82.75	80.27	80.70	84.47	82.86	141.18	1076.17
GAR.MENS.: 100.0% ( 0 FALLOS)    GAR.VOLUM.: 100.0%    MAX.DEFIC.MENS.: 0.0    MAX.DEF.2 MES.CONS: 0.0													
GAR.ANUAL: 100.0% ( 0 FALLOS)    FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AYO,    0 POR 2 AYOS,    0 POR 10 AYOS													
FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 0 POR 1 MES,    0 POR 10 AÑOS													
MESES CON DEFICIT: 0    POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1,													

Fonte: Autor (2019).

Figura 56 - Relatório referente à demanda do reservatório de Serra do Facão

25-Vazão Turbinada													
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
DEMANDA	148.02	153.38	173.03	160.11	151.59	122.04	75.45	74.63	78.34	73.80	84.80	79.16	1374.33
SUM.SUPERF	148.02	153.38	173.03	160.11	151.59	122.04	75.45	74.63	78.34	73.80	84.80	79.16	1374.35
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS													
	148.02	153.38	173.03	160.11	151.59	122.04	75.45	74.63	78.34	73.80	84.80	79.16	1374.35
GAR.MENS.: 100.0% ( 0 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 100.0%      MAX.DEFIC.MENS.: 0.0      MAX.DEF.2 MES.CONS: 0.0													
GAR.ANUAL: 100.0% ( 0 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 0 POR 1 AYO,      0 POR 2 AYOS,      0 POR 10 AYOS													
FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 0 POR 1 MES,      0 POR 10 AÑOS													
MESES CON DEFICIT: 0      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 0 DE MAG.1,													

Fonte: Autor (2019).

De acordo com a Resolução N° 489, de 19 de agosto de 2008, que estabelece as características gerais do reservatório de Batalha, a vazão máxima que pode ser turbinada na central hidrelétrica é de 152,4 m<sup>3</sup>/s, ou o equivalente a 394 hm<sup>3</sup>/mês. Em uma outra simulação foi usado como dados de entrada as vazões turbinadas máximas em substituição das vazões reais turbinadas. Manteve-se as maiores prioridades sendo a vazão de referência e demanda por irrigação, seguido de geração de energia elétrica. Para essa situação, foram verificados que houveram déficits em 91,7% dos meses, com o déficit máximo chegando a 370 hm<sup>3</sup>. A Figura 57 apresenta em resumo o resultado da simulação.

Figura 57 - Relatório referente à demanda do reservatório de Batalha para vazão máxima turbinada

15-Vazão Turbinada													
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
DEMANDA	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	4728.00
SUM.SUPERF	393.84	121.80	207.53	137.69	294.21	206.12	122.09	84.52	47.76	29.64	23.80	25.97	1694.97
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	0.00	272.04	186.31	256.15	99.63	187.72	271.75	309.32	346.08	364.20	370.04	367.87	3031.11
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	393.84	121.80	207.53	137.69	294.21	206.12	122.09	84.52	47.76	29.64	23.80	25.97	1694.97
GAR.MENS.: 8.3% ( 11 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 35.8%      MAX.DEFIC.MENS.: 370.0      MAX.DEF.2 MES.CONTS: 737.9 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 1 POR 1 AVO,      0 POR 2 AXOS,      0 POR 10 AXOS*** FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 11 POR 1 MES,      0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 11      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 11 DE MAG.1,													

Fonte: Autor (2019).

Outra possibilidade foi a mudança na ordem das prioridades, alterando entre demandas para irrigação e geração de energia elétrica. Para essa situação as prioridades foram definidas da seguinte forma: 1º Vazão de referência; 2º Geração de energia elétrica; 3º Irrigação; 4º Demais demandas. Os resultados mostram que, alterando as prioridades, o foco da otimização é todo no atendimento da vazão turbinada, fazendo com que não se atenda nenhuma das demandas anteriores, afim de minimizar o déficit no reservatório. Mesmo com o não atendimento das demandas de irrigação, foram verificados déficits em 91,7% dos meses, da mesma forma que a situação anterior, porém, o déficit ao longo do período diminuiu aproximadamente 25%, conforme apresentado na Figura 58.

Figura 58 - Relatório referente à demanda do reservatório de Batalha para vazão máxima turbinada

15-Vazão Turbinada													
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	T.ANUAL
DEMANDA	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	393.84	4728.00
SUM.SUPERF	393.84	210.25	256.02	186.18	342.70	254.61	170.58	133.01	96.25	75.72	65.03	69.04	2253.23
SUM.SUBTER	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DEFICIT	0.00	183.59	137.82	207.66	51.14	139.23	223.26	260.83	297.59	318.12	328.81	324.80	2472.85
FILT. ACUI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SUMINIST.SUPERFICIAL POR TOMAS	393.84	210.25	256.02	186.18	342.70	254.61	170.58	133.01	96.25	75.72	65.03	69.04	2253.23
GAR.MENS.: 8.3% ( 11 FALLOS)      GAR.VOLUM.: 47.7%      MAX.DEFIC.MENS.: 328.8      MAX.DEF.2 MES.CONTS: 653.6 GAR.ANUAL: 0.0% ( 1 FALLOS)      FALLOS CRIT.TIPO UTAH DWR: 1 POR 1 AVO,      0 POR 2 AXOS,      0 POR 10 AXOS*** FALLOS CRIT. IPH2008 URBANAS: 11 POR 1 MES,      0 POR 10 AÑOS MESES CON DEFICIT: 11      POR MAGNITUDES (1=MAX 4=MIN): 11 DE MAG.1,													

Fonte: Autor (2019).

Como grande parte das demandas estão localizadas a montante do reservatório de Batalha, o reservatório de Serra do Facão não apresentou déficit em nenhum momento das simulações, trabalhando sempre com volumes superiores ao mínimo. É possível verificar que, mesmo com as variações de prioridades, não foi possível atender todas as demandas na sua totalidade.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES

Concluiu-se que o estudo de disponibilidade hídrica é fundamental para o planejamento e gestão das bacias hidrográficas. A partir do conhecimento das outorgas já concedidas, tem-se o conhecimento da quantidade hídrica disponível para a concessão de futuras outorgas, de acordo com a vazão de referência estabelecida pela legislação de cada Estado.

O potencial de aproveitamento hídrico pode ser limitado em função da discrepância de valores obtidos de  $Q_{7,10}$ . Apesar dos valores encontrados no estudo serem próximos de valores de outras pesquisas pelo próprio comitê da bacia hidrográfica, existem diferentes metodologias de cálculo, o que pode levar a valores discrepantes dos encontrados na realidade, representando riscos para os ecossistemas de determinada região. A situação ideal seria a utilização de séries históricas de vazão como base para as análises probabilísticas na determinação de  $Q_{7,10}$ . Entretanto, a falta de estações de monitoramento e sua má distribuição espacial, assim como lacunas e falhas nas séries históricas, leva à utilização de métodos de regionalização, com consequente estimativa aproximada e divergente de vazão. Na própria região de estudo, foram escassas as estações de monitoramento, e consequentemente a dificuldade em determinar valores de vazão de referência. Assim, o impacto do método adotado na estimativa da vazão de referência se apresenta como um tópico importante na análise da disponibilidade hídrica e sua otimização, justificando o desenvolvimento de estudos visando a melhor aplicabilidade de cada uma das metodologias disponíveis.

No que se refere à análise de critérios visando a otimização do aproveitamento hídrico, os resultados mostraram que a mudança de critério é viável, representando um potencial significativo na disponibilidade de água em toda a bacia. Observou-se que aplicação de vazões menos restritivas possibilitou uma diminuição significativa em áreas com demandas acima da máxima permitida, mas ainda, com alguns pontos críticos, que precisam de atenção especial.

De uma forma geral, a situação atual na bacia do rio São Marcos é preocupante no que diz respeito aos volumes captados até o mês de setembro de 2017, principalmente no que se diz respeito a área do alto São Marcos (montante do reservatório de Batalha), em que o número de outorgas, principalmente para irrigação é muito elevado. Entretanto, na região a jusante do reservatório de Batalha ou também chamado de baixo São Marcos, a situação se mostra confortável, com poucos afluentes com outorgas acima do permitido, apresentando uma boa disponibilidade hídrica

A ferramenta computacional AQUATOOL atendeu as necessidades deste trabalho quanto ao balanço hídrico, onde sua topologia permitiu reproduzir a configuração bem próxima da hidrografia na bacia hidrográfica do rio São Marcos, além do que permite introduzir novos elementos na hidrografia para a otimização do aproveitamento hídrico. Outro aspecto favorável à ferramenta é o fácil manuseio, sendo que a mesma possui manuais técnicos e de usuário de fácil entendimento,

## REFERÊNCIAS

ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P.T.S.; RODRIGUEIS, D.B.B.; AYRES, F.M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. *Revista Engenharia Agrícola*, v.30, p.46-57, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000100005>

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Resolução nº 562, de 25 de outubro de 2010. Estabelece o Marco Regulatório do Uso da Água na bacia do São Marcos, pactuado entre os órgãos gestores de recursos hídricos (OGRHs) dos Estados de Goiás, Minas Gerais e a ANA*. Brasília, 2010a. Disponível em: [https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-562-2010\\_112137.html](https://www.normasbrasil.com.br/norma/resolucao-562-2010_112137.html)>. Acesso em: 10 de março de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Resolução nº 564, de 25 de outubro de 2010*. Brasília, 2010b. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2010/564-2010.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro de 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Plano de recursos hídricos e do enquadramento dos corpos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do rio Paranaíba*. Brasília: ANA, 2013. 314p. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2013/planoRecursosHidricosParanaibaResumo.pdf>>. Acesso em: 12 de junho de 2018

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*. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <http://cbhparanaiba.org.br/download.php?file=aHR0cDovL2NiaHBhcmFuYWwliYS5vcmcuYnlvdXBsb2Fkcy9kb2N1bWVudG9zL1BSSF9QVJBTkFJQkEvUkVWSVNBT19QUkhfUEFSQU5BSUJBL1Vzb3NNdWx0aXBsb3NkYUFnZWFuYmJhY2lhZG9SaW9TYW9NYXJjb3MucGRm>>. Acesso em: 12 de junho de 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Encarte Especial sobre a Crise Hídrica. Informe 2014. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil*: Brasília, 2015. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/crisehidrica2014.pdf>>. Acesso em: 06 de agosto de 2018

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – Informe 2016*: Brasília, 2016. Disponível em: <http://www3.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2016.pdf/view>>. Acesso em: 08 de agosto de 2018

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – Relatório Pleno 2017*: Brasília, 2017. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/>>. Acesso em: 04 de setembro de 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Disponível em:  
<<http://www.hidroweb.ana.gov.br>> (consultado em 2017 e 2018)

ANDREU, J.; CAPILLA, J.; SANCHIS, E. AQUATOOL: a generalized decision support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, v. 177, n. 3-4, p. 269-291, 1996. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02963-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02963-X)

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Banco de Informações de Geração: BIG. 2016. Disponível em: <[www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em: 09 outubro 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. Brasília, DF, 2000. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2001\\_IntroducaoGerenciamentoRecursosHidricos2ed/75352f44-fa8d-ae7-8fc3-aca3ffb972](http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2001_IntroducaoGerenciamentoRecursosHidricos2ed/75352f44-fa8d-ae7-8fc3-aca3ffb972)>. Acesso em 15 de janeiro de 2019.

AQUATOOL. *Manual de Usuario Versión 1.0*. 2015. Disponível em: <[www.upv.es/aquatool/](http://www.upv.es/aquatool/)>. Acesso em: 20 junho 2018.

AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; PORTO, M. Sistema de Apoio à Decisão para o Gerenciamento Integrado de Quantidade e Qualidade da água: Metodologia e Estudo de Caso. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 3, n. 1, p. 21-51, 1998. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v3n1.p21-51>

BEIJO, L. A. Distribuição de Gumbel: estudo de métodos de estimação dos parâmetros e ajuste aos dados de precipitação máxima de Lavras, MG. 2002. 91f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agrônômica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2002

BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M. S. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, n. 2, p. 149-160, 2003. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v8n2.p149-160>.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. A integração das águas: revelando o verdadeiro aquífero Guarani. Curitiba: Ed. da Autora, 2011.

BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. 5. ed. São Paulo: Central de Concursos; Rio de Janeiro: Degrau Cultural, 2008. Disponível em: <<https://www.stf.jus.br/arquivo/cms/legislacaoConstituicao/anexo/CF.pdf>>. Acesso em

BRASIL. Controladoria Geral da União. *Relatório de Auditoria Especial nº 00190.001631/2011-17, em Furnas Centrais Elétricas S/A*. Brasília: CGU, 2011b. 107 p. Disponível em: <[http://cbhparanaiba.org.br/\\_download.php?file=aHR0cDovL2NiaHBhcmFuYWwliYS5vcmcuYnIvdXBsb2Fkcy9kb2N1bWVudG9zL0dUX1NBT19NQVJDT1MvMjAxMy8yX1JldW5pYW9fMDIuMTIuMTNfQ3Jpc3RhbgluYS1HTy9SZWxhdG9yaW9WaWFiaWxpZGFkZUZ1cm5hey1DR1UucGRm](http://cbhparanaiba.org.br/_download.php?file=aHR0cDovL2NiaHBhcmFuYWwliYS5vcmcuYnIvdXBsb2Fkcy9kb2N1bWVudG9zL0dUX1NBT19NQVJDT1MvMjAxMy8yX1JldW5pYW9fMDIuMTIuMTNfQ3Jpc3RhbgluYS1HTy9SZWxhdG9yaW9WaWFiaWxpZGFkZUZ1cm5hey1DR1UucGRm)>. Acesso em: 24 de outubro de 2017.

BRASIL. *Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 08 jan. 1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm)>. Acesso em: 22 de janeiro de 2019.

BRASIL. *Lei nº 10.406, de 10 de janeiro de 2002, art. 99, I*. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2002. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2002/lei-10406-10-janeiro-2002-432893-publicacaooriginal-1-pl.html>>. Acesso em: 02 de setembro de 2017

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional de Recursos Hídricos: síntese executiva*. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/plano-nacional-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: 05 de junho de 2017.

BRUNCKHORST, A.; BIAS, E. S. Aplicação de SIG na gestão de conflitos pelo uso da água na porção Goiana da bacia hidrográfica do rio São Marcos, Município de Cristalina – GO. *Geociências – Unesp*, São Paulo, v.33, n.2, p. 228-243, jun. 2014.

BUREK, P. et al. (2016). Water Futures and Solution: Fast Track Initiative (Final Report). IIASA Working Paper. Laxenburg, Austria, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), 2016.

CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacia através de interpolação e em Sistemas de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.7, n. 3, p. 43-51. 2002. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v7n3.p43-51>

CHÁVEZ-JIMÉNEZA, A.; GONZÁLEZ-ZEAS, D. El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *Revista Iberoamericana del Agua*, v. 2, p 3-13, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>

COBRAPE. Plano estadual de recursos hídricos do Estado de Goiás: Revisão final, 2015.

COSTA, E. S. *Estudo de otimização do aproveitamento hídrico superficial no alto curso do rio Uberaba, UPGRH-GD8*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2015.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Otimização e Simulação Comparativa de Cenários de Outorga. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 3, p. 75-91, 2005. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v10n3.p75-91>

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; RUBERT, O. A. V.; SANTOS, R. M. dos. Regionalização hidrológica na bacia do alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.6, n. 2, p. 81-105, 2001. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v6n2.p81-105>

FAO- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Dia mundial da água. 2009.

FERREIRA, A. M. *Capacidade de autodepuração nos cursos médio e baixo do rio Uberaba, UPGRH-GD8*. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.

FIRMINO, M. B. M. *META-F: um modelo de otimização quali-quantitativo para operação de sistemas de recursos hídricos e poluição fluvial*. 2007. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba. 2007.

FURQUIM, M. G. D.; ABDALA, K. De O. Caracterização Preliminar da Agricultura Irrigada em Cristalina-GO, a Estreita Relação Entre o Desenvolvimento Sustentável e o Crescimento Econômico. *Irriga*, Botucatu, 2016.  
<https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n1p129-134>

GAMIZ-FORTIS, S.R.; HIDALGO-MUNOZ, J.M.; ARGUESO, D.; ESTEBAN-PARRA, J.; CASTRODIEZ, Y. Spatio temporal variability in Ebro river basin (NE Spain): Global SST as potential source of predictability on decadal time scales. *Journal of Hydrology*, v. 409, p. 759-775, 2011. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.014>

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C.; REIS, R. J. dos. Caracterização da bacia hidrográfica do rio São Marcos. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Área Territorial Brasileira, Censo Demográfico 2017*. Disponível em:  
<[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default\\_territ\\_area.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_territ_area.shtm)>. Acesso em: 02 abr. 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Demográfico 2010: Primeiros Resultados - 29/11/10*. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br> . Acesso em: 15 dez. 2017.

JHUNIOR, H. C. S. *Otimização do aproveitamento hídrico superficial na bacia hidrográfica do rio Araguari, Triângulo Mineiro*. 2017. 252p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

LABADIE, J. W., Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 130, n.2, p. 93-111, 2004.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(93))

LANNA, A. E. L. E BENETTI, A. D. 2002 Estabelecimento de Critérios para Definição da Vazão Ecológica no Rio Grande do Sul: Relatório Final. Fundação Estadual de Proteção Ambiental FEPAM: Porto Alegre, RS.



MEDEIROS, P. C.; SOUZA, F. A. S.; RIBEIRO, M. M. R. Aspectos conceituais sobre o regime hidrológico para a definição do hidrograma ambiental. *Ambi-Agua, Taubaté*, v. 6, n. 1, p. 131-147, 2011. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.179>

MINAS GERAIS. *Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1.548*, de 29 de março 2012. Disponível em: <<http://www.agencia.baciaspcj.org.br/docs/resolucoes/resolucao-semad-igam-1548.pdf>>. Acesso em: 08 de setembro de 2018.

MINAS GERAIS. *Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999*. Disponível: <[www.siam.mg.gov.br](http://www.siam.mg.gov.br)>. Acesso em: 12 ago. 2018.

MORAES, M. M. G. A.; SAMPAIO, Y.; CIRILO, J. A.; CAI, X. Modelo Econômico Hidrológico Integrado para Gestão de Bacias Hidrográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, n. 1, p. 43-55, 2008. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n1.p43-55>

OLIVEIRA, J. R. de; PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A. Otimização do aproveitamento da disponibilidade de Águas Superficiais na Bacia do Ribeirão entre Ribeiros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 4, 157-172, 2013. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v18n4.p157-172>

PAREDES-ARQUIOLA, J.;ÁLVAREZ, J. A.; MONERRIS, M. M.; SOLERA, A. Water quantity and quality models applied to the Jucar River Basin, Spain. *Water Resources Management*, V.24, n.11, p. 2759-2779, 2010b. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9578-z>

PAREDES-ARQUIOLA, J.; SOLERA, A.; MARTINEZ-CAPEL, F.; MOMBLANCH, A.; ANDREU, J. Integrating water management, habitat modelling and water quality at the basin scale and environmental flow assessment: case study of the Tormes River, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, v. 59, n. 3–4, p. 878-889, 2014a. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.821573>

PAULO, R. G. F. *Ferramentas para a determinação de vazões ecológicas em trechos de vazão reduzida: destaque para a aplicação do método do perímetro molhado no caso e Capim Branco I*. 97 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

PCE. Projetos e Consultorias de Engenharia Ltda.; SPEC Planejamento, Engenharia e Consultoria Ltda.; e Furnas Centrais Elétricas S/A. *Estudo de Impacto Ambiental – AHE Paulistas: rio São Marcos (GO/MG)*: Rio de Janeiro AGRAR/Biodinâmica, 2005b. 501p.

PEIXOTO, T. C. L. C. P. *Reuso de água: Comparação entre os métodos DFA, programação linear e programação não linear*. 2011, 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

PELLICER-MARTÍNEZ, F.; MARTÍNEZ-PAZ, F. J. M. Grey water footprint assessment at the river basin level: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain. *Ecological Indicators*, v. 60, p. 1173-1183, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.032>

PINTO, V. G. *Modelagem ecohidrológica e caracterização biótica e abiótica da bacia hidrográfica do ribeirão do Espírito Santo*. p. 326. Tese - Programa de Pós graduação em Ecologia da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2015.

PINTO, V. G.; RIBEIRO, C. B. M.; SILVA, D. D. Vazão ecológica e o arcabouço legal brasileiro. *Revista brasileira de Geografia Física*, v.9, n.1, p. 91-109, 2016.  
<https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160006>

PRUSKI, F. F.; BOF, L. H. N.; DA SILVA, L. M. C.; DA SILVA, J. M. A.; REGO, F. S.; JUSTINO, F. B. Impact of the substitution of reference annual stream flow by monthly stream flow on the potential use of water resources. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 3, p. 496-509, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162014000300013>

REICHARDT, K.; TIMM, L.C.; Água e Sustentabilidade no Sistema Solo-Planta-Atmosfera. Barueri, SP: Manole, 2016.

RHAMA. Estratégias para segurança hídrica em Minas Gerais: Relatório Final. Contrato nº 2241.01.01.008.2015 – IGAM, 2016. Disponível em:  
[http://www.reunioes.semad.mg.gov.br/down.asp?x\\_caminho=reunioes/sistema/arquivos/materias/&x\\_nome=Item\\_6\\_Estrat%Edgicas\\_para\\_Seguran%Edica\\_H%Edrica\\_em\\_MG\\_rel\\_final\\_\(2\).pdf](http://www.reunioes.semad.mg.gov.br/down.asp?x_caminho=reunioes/sistema/arquivos/materias/&x_nome=Item_6_Estrat%Edgicas_para_Seguran%Edica_H%Edrica_em_MG_rel_final_(2).pdf). Acesso em: 03 de julho de 2017.

RIBEIRO, M. M. R.; LANNA, A. E. L. A outorga integrada das vazões de captação e diluição. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.8, n. 3, p. 151-168, 2003  
<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v8n3.p151-168>

ROWINSKI, P. M.; STRUPCZEWSKI, W. G., SINGH, V. P. A note on the applicability of log-Gumbel and log-logistic probability distributions in hydrological analyses: I. know pdf. *Hydrological Science Journal*, Walingford, Inglaterra, v. 47, n. 1, p. 107-122, Feb. 2002. <https://doi.org/10.1080/02626660209492911>

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA, J.; SOLERA, A.; ALVARÉZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. de. Variabilidade em produção de energia hidrelétrica na bacia hidrográfica do rio Araguari, Minas Gerais. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. 17 a 22 de Novembro de 2013, Bento Gonçalves – Rio Grande do Sul, Brasil.

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*, Valparaíso, v. 42, n. 1, p. 224-244, 2014a. <http://dx.doi.org/103856/vol42-issue1-fulltext-19>

SALLA, M. R.; PAREDES-ARQUIOLA J.; SOLERA, A.; ALVARÉZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. de. Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais. *Revista*

*Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 189-204, 2014b.

<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p189-204>

SALLA, M. R.; CHUERUBIM, M. L. Planejamento e Gestão Ambiental em Escala de Bacia Hidrográfica: Principais Dificuldades no Manuseio de Ferramentas Computacionais. *Educação Ambiental em Ação*, v. 13, n. 49, p. 01-12, 2014c

SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; CURI, R. C.; VIEIRA, A. S. Um Modelo de Otimização Multiobjetivo para Análise de Sistema de Recursos Hídricos I: Metodologia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 4, p. 49-60, 2011.

<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n4.p49-60>

SARMENTO, R. Estado da arte da vazão ecológica no Brasil e no mundo.

UNESCO/ANA/CBHSF, 2007. Disponível em:

[http://www.saofrancisco.cbh.gov.br/\\_docs/estudos/Vazao.Ecologica.Produito.02.Robson.Sarmento.20.06.07.pdf](http://www.saofrancisco.cbh.gov.br/_docs/estudos/Vazao.Ecologica.Produito.02.Robson.Sarmento.20.06.07.pdf). Acesso em: 10 de novembro de 2018.

SCHOR, A. R. *Riscos e Alternativas para Abastecimento de Água em uma Refinaria de Petróleo - Estudo de Caso: Refinaria Duque de Caxias - REDUC*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ. Rio de Janeiro, 2006. 106p.

SILVA, D. D. da; MARQUES, F. de A.; LEMOS, A. F. Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para bacia do rio São Francisco.

*Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v. 17, n. 5, p. 392-403. 2009.

<https://doi.org/10.13083/1414-3984.v17n05a07>

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, p.166-174, jun. 2015. <https://doi.org/10.22409/engevista.v17i2.633>

SIMÕES, J.; OLIVEIRA, R. P. Modelos de gestão de bacias hidrográficas: aplicação do IRAS-2010 e do AQUATOOL ao aproveitamento hidroagrícola do Vale do Sorraia.

*Recursos Hídricos*, v. 35, n. 2, p. 29-39, 2014. <https://doi.org/10.5894/rh35n2-3>

SULIS, A.; SECHI, G. M. Comparison of generic simulation models for water resource systems. *Environmental Modelling & Software*, v. 40, p 214-225, 2013.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.012>

TUCCI, C. E. M. Controle de Enchentes. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre, RS: ABRH-Edusp, 1993. cap. 4.

TUCCI, C. E. M. Urbanização e Recursos Hídricos. In BICUDO, C. E. M. et al. (Org.) Águas do Brasil. Análises Estratégicas. São Paulo: Academia Brasileira de Ciências; Secretaria do Meio Ambiente, 2010. p. 113-128.

TUNDISI, J.G. Água no Século XXI – Enfrentando a Escassez. Rima Editora / Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos, 2003.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no Brasil: desafios e estratégias. Rio de Janeiro: *Academia Brasileira de Ciências*, 2014. 76 p.

VESTENA, L. R. et al. Vazão ecológica e disponibilidade hídrica na bacia das Pedras, Guarapuava-PR. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science*, [s.l.], v. 7, n. 3, p.212-227, 31 dez. 2012. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.840>.

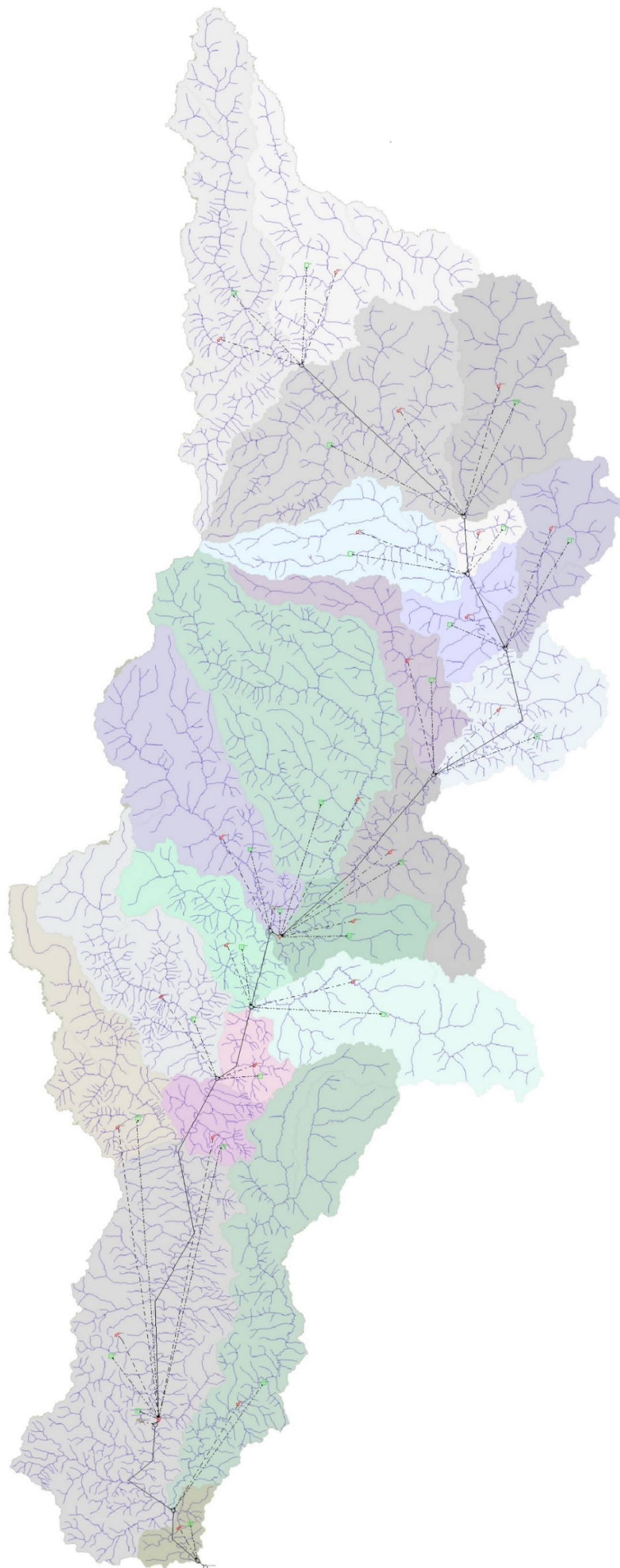
VIEIRA, A. S.; CURI, W. F. Evidenciação dos modelos de simulação e técnicas para o planejamento integrado dos sistemas hídricos. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v.5, n.1, p. 233-266, 2016. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v5e12016233-266>

VON SPERLING, M. *Estudos e modelagem da qualidade da água em rios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

WWF - WORLD WIDE FOUND. Global water challenges. 2012a.

## ANEXO A – TOPOLOGIA DO SISTEMA HÍDRICO

Figura 59 - Topologia do sistema hídrico da bacia hidrográfica do rio São Marcos



Fonte: Autor (2019)