



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

THIAGO FRANKLIN SANTOS DE ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DE PEQUENOS RESERVATÓRIOS NO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CARINHANHA**

Recife
2018

THIAGO FRANKLIN SANTOS DE ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DE PEQUENOS RESERVATÓRIOS NO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CARINHANHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

A447i Almeida, Thiago Franklin Santos de.
Influência de pequenos reservatórios no escoamento superficial da bacia hidrográfica do rio Carinhanha / - 2018.
134 folhas, il. e tab.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Pequenas barragens. 3. Rio São Francisco. 4. NDWI. 5. HEC-HMS. 6. Interceptação do escoamento. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-040

THIAGO FRANKLIN SANTOS DE ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DE PEQUENOS RESERVATÓRIOS NO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CARINHANHA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 21/08/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Ao Pai, pelo apoio e força nos
momentos mais difíceis. À família,
alicerce de todo o sucesso na vida.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pelos ensinamentos e palavras precisas nos diversos momentos da vida. É dele todas as vitórias que aconteceram em minha vida.

À minha mãe, Maria das Dores (Dorinha), pela dedicação em sempre me ajudar e colaborar para o meu crescimento pessoal e profissional. Seus ensinamentos sempre me inspiraram, os quais são além das palavras, acontecem principalmente pelas ações e exemplos. Ao meu irmão, Igor Gustavo, amigo, companheiro, e referência de coragem. Sua vontade em superar suas dificuldades é referência de luta para mim. Ao meu Pai, Romeu, seus ensinamentos também auxiliaram meu crescimento como pessoa. Ao meu avô, Manoel Bezerra (*in Memoriam*), por sempre apoiar meus sonhos e não medir esforços para me ajudar a realizá-los. Aos demais familiares, avós, tios, tias, primos, que estiveram ao meu lado em diversos momentos da minha vida.

À Lili, companheira que Deus me apresentou. Sua companhia nos últimos anos foi fundamental nas turbulências vividas. Obrigado por me permitir compartilhar as alegrias e sofrimentos, além de alegrar meu dia com seu sorriso.

Agradeço ao professor e orientador Roberto Azevedo por todas as oportunidades e confiança no meu potencial. Seus ensinamentos e colaboração jamais serão esquecidos. Também reconheço a colaboração dos demais professores e colegas do GRH-UFPE. Vocês contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço à TPF Engenharia, sobretudo a João Recena, Fabio Chaffin, Bruno Marcionilo e Roberta Alcoforado, pelo apoio nesse projeto pessoal. Também sou grato aos demais amigos que tive a oportunidade de conhecer na empresa, pelo aprendizado construído e momentos de descontração vivenciados ao longo dos anos.

Aos amigos, companheiros de longa data, pela amizade e confiança em dividirmos momentos ao longo da nossa caminhada.

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente cooperaram para o fecho desta pesquisa, minha profunda gratidão.

RESUMO

A implantação de pequenos reservatórios no semiárido brasileiro vem sendo incentivada desde meados do século XX, sobretudo a partir da década de 80. Os recursos hídricos limitados da região associado à variabilidade temporal e espacial de chuvas contribuem para esta situação. Assim a açudagem busca armazenar água durante os períodos chuvosos para disponibilizá-la durante a época de estiagem. Porém, tal prática realizada intensamente pode ser prejudicial à gestão e disponibilização dos recursos hídricos, ocasionando grandes perdas por evaporação e infiltração, além de causar uma elevada interceptação nos escoamentos, reduzindo a vazão incremental dos principais rios. O presente trabalho buscou identificar a presença de pequenos reservatórios nas bacias hidrográficas dos rios Carinhanha, Casa das Velhas, Rãs, Pitubas e Santana através de imagens de satélite Landsat 8, aplicando o índice NDWI e a classificação de Maxver-ICM. Posteriormente, foi estimado o volume dos reservatórios em função da área do espelho d'água para realizar uma modelagem hidrológica da região de estudo, na qual foi utilizado o modelo HEC-HMS. Os resultados comprovaram que onde a disponibilidade hídrica é menor há uma maior densidade de pequenos reservatórios, principalmente com área até 5 ha. Utilizando o coeficiente de Nash-Sutcliffe e a Diferença de Volumes, o modelo hidrológico mostrou eficácia qualitativa, demonstrando o impacto que a alta densidade de açudes vem causando no escoamento superficial de uma bacia hidrográfica, a qual teve redução de até 52%.

Palavras-chave: Pequenas barragens. Rio São Francisco. NDWI. HEC-HMS. Interceptação do escoamento.

ABSTRACT

The implantation of small reservoirs in the Brazilian semi-arid region has been encouraged since the mid-20th century, especially since the 1980s. The limited water resources of the region associated with the temporal and spatial variability of rainfall contribute to this situation. Thus, the dam seeks to store water during the rainy periods to make it available during the dry season. However, this intense practice can be detrimental to the management and availability of water resources, causing great losses by evaporation and infiltration, besides causing a high interception in the flows, reducing the incremental flow of the main rivers. The present work aimed to identify the presence of small reservoirs in the hydrographic basins of the Carinhanha, Casa das Velhas, Rãs, Pitubas and Santana rivers through Landsat 8 satellite images, applying the NDWI index and the Maxver-ICM classification. Subsequently, the volume of the reservoirs was estimated as a function of the area of the water mirror to perform a hydrological modeling of the study region, in which the HEC-HMS model was used. The results showed that where water availability is lower there is a higher density of small reservoirs, mainly with area up to 5 ha. Using the Nash-Sutcliffe coefficient and the Volumes Difference, the hydrological model showed qualitative efficacy, demonstrating the impact that the high density of dams has caused in the surface runoff of a watershed, which had a reduction of up to 52%.

Keywords: Small dams. São Francisco River. NDWI. HEC-HMS. Interception in the flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação do IIA com NDVI.	21
Figura 2 - Segmentação de corpos d'água através do algoritmo K-means usando a imagem IIA.	22
Figura 3 - Segmentação de corpos d'água em imagens multiespectrais e temporais usando <i>watershed</i> com marcadores automaticamente definidos.	23
Figura 4 - Reservatórios mapeados no Nordeste por Bielenki Júnior e colaboradores, com destaque para o Reservatório de Sobradinho.	24
Figura 5 - Resultado da metodologia desenvolvida pela Funceme para identificação e estimativa de área de açudes no estado do Ceará.	25
Figura 6 - Resultado da extração de corpos hídricos da pesquisa de Pacheco e Santos (2014).	28
Figura 7 - Relação área volume determinada por Molle (1994).	34
Figura 8 - Relação log(área) e log(volume) determinada por Liebe (2002).	36
Figura 9 - Relação log (área) e log(volume) determinada por Sawunyama (2005).	38
Figura 10 -Aspectos relevantes na escolha do modelo hidrológico.	41
Figura 11 - Localização da área de estudo.	50
Figura 12 - Linha do tempo da operação dos satélites do Programa Landsat.	53
Figura 13 - Média de longo termo mensal da pluviometria da região de estudo (1986-2016).	55
Figura 14 - Precipitação anual na região de estudo (1986-2016).	55
Figura 15 - Regime pluviométrico do ano hidrológico 2015-2016.	56
Figura 16 - Parâmetros para pesquisa das imagens.	57
Figura 17 - Exemplo da ampliação linear do contraste.	58
Figura 18 - Processo de mosaico de imagens.	59
Figura 19 - Processo de aplicação de máscara.	60
Figura 20 - Criação do arquivo de composição de bandas.	61
Figura 21 - Álgebra de imagens pelo SPRING.	62
Figura 22 - Atributos da classificação K-médias.	63
Figura 23 - Atributos de classificação pelo método de Maxver-ICM para amostras somente de água.	64

Figura 24 - Conversão do arquivo <i>raster</i> em polígonos.....	65
Figura 25 - Extração da declividade a partir de um MDE.	67
Figura 26 - Extração do MDT.	70
Figura 27 - Fluxo os processos das fases 2, 3, 4 da modelagem geoespacial.....	71
Figura 28 - Fluxo os processos das fases 5, 6, 7 da modelagem geoespacial.....	73
Figura 29 - Entradas das séries históricas no HEC-DSS.....	76
Figura 30 - Esquema conceitual do <i>Moisture Accounting Loss</i>	80
Figura 31 - Localização das junções na área de estudo.....	85
Figura 32 - Esquema do método <i>WMS Storage Capacity Curves</i>	88
Figura 33 - Exemplo da avaliação da presença de nuvens nas imagens Landsat 8.....	91
Figura 34 - Amostra da aplicação de realce nas imagens Landsat 8.	92
Figura 35 - Exemplo do resultado da aplicação de mosaico e recorte.	92
Figura 36 – Amostra de composição colorida verdadeira para a área de estudo.....	93
Figura 37 – Amostra de Composição falsa cor para a área de estudo.....	93
Figura 38 - Produto da aplicação NDWI36.....	94
Figura 39 - Produto da aplicação NDWI35.....	95
Figura 40 - Produto da classificação não supervisionada K-médias.	96
Figura 41 - Classificação das amostras do método Maxver-ICM.	97
Figura 42 - Produto da classificação supervisionada Maxver-ICM.	97
Figura 43 - Distribuição em função da área dos espelhos d'água.	100
Figura 44 - Comparação entre ANA (2016) e atual pesquisa - Exemplo 1.....	103
Figura 45 - Comparação entre ANA (2016) e atual pesquisa - Exemplo 2.....	103
Figura 46 - Representação da área de estudo no modelo HEC-HMS.....	110
Figura 47 - Calibração do modelo hidrológico (1975-1980).....	111
Figura 48 - Validação do modelo hidrológico (1982-1986).	115
Figura 49 - Validação do modelo hidrológico (1986-1989).	115
Figura 50 - Vazões afluentes e defluentes dos reservatórios equivalentes que apresentaram área de drenagem com elevado RVA.	121
Figura 51 - Comparação entre as vazões geradas nas bacias hidrográficas com e sem a interceptação dos reservatórios equivalentes.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grau de aceitação do coeficiente Nash-Sutcliffe segundo Moriasi <i>et al.</i> (2007) e Gottschalk e Motovilov (2000).	46
Tabela 2 - Grau de aceitação da Diferença de Volumes segundo Moriasi <i>et al.</i> (2007).	46
Tabela 3 - Características das bandas espectrais do Landsat 8.	54
Tabela 4 - Dados das imagens adquiridas do satélite Landsat 8.	57
Tabela 5 - Dados das imagens adquiridas do satélite Landsat 8 para avaliar o impactos das nuvens.	58
Tabela 6 - Critérios de avaliação em função da área do objeto.	65
Tabela 7 - Estações pluviométricas utilizadas no modelo.	75
Tabela 8 - Estações fluviométricas utilizadas no modelo.	76
Tabela 9 - Dados de evaporação utilizados no modelo.	77
Tabela 10 - Parâmetros dos canais fluviais adotados no modelo.	82
Tabela 11 - Valores iniciais dos parâmetros hidrológicos.	84
Tabela 12 - Agrupamento de sub-bacias por estação fluviométrica.	85
Tabela 13 - Períodos de simulação utilizados no modelo.	86
Tabela 14 - Extração dos espelhos d'água em função da área.	98
Tabela 15 - Avaliação da extração dos espelhos d'água em função da comparação com a imagem de composição em falsa cor.	99
Tabela 16 - Resultado da avaliação da extração dos espelhos d'água.	100
Tabela 17 - Quantidade de reservatório por bacia hidrográfica em função da área do espelho d'água.	101
Tabela 18 - Percentual de reservatório por bacia hidrográfica em função da área do espelho d'água.	101
Tabela 19 - Densidade de reservatórios a cada 1.000 km ² por bacia hidrográfica.	102
Tabela 20 - Extração dos Espelhos D'água do Brasil (ANA, 2016).	102
Tabela 21 - Amostra da declividade no cnetróide dos reservatórios.	105
Tabela 22 - Amostra dos volumes estimados dos reservatórios.	106
Tabela 23 - Informações de área e volume equivalentes por sub-bacia.	107
Tabela 24 - Informações equivalentes de área e volume por bacia hidrográfica.	108

Tabela 25 - Ajuste dos parâmetros após a calibração para as sub-bacias (junções).....	112
Tabela 26 - Valores do Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a calibração e validação e Grau de Aceitação Segundo Moriasi <i>et al.</i> (2007).....	114
Tabela 27 - Valores do Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a calibração e validação e Grau de Aceitação segundo Gottschalk e Motovilov (2000).....	114
Tabela 28 - Valores da Diferença de Volumes para a calibração e validação e Grau de Aceitação Segundo Moriasi <i>et al.</i> (2007).....	114
Tabela 29 - Associação entre as sub-bacias e os reservatórios equivalentes correspondentes.....	117
Tabela 30 - Dados dos reservatórios equivalentes.	118
Tabela 31 - Razão Volume-Área de Drenagem (RVA) para as sub-bacias.....	119
Tabela 32 - Percentual da vazão interceptada pelos reservatórios equivalentes durante o período de prognóstico.....	123

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivo	18
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	18
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Aquisição de dados de pequenas barragens por Sensoriamento Remoto	19
2.1.1	<i>Identificação e estimativa da área de pequenas barragens.....</i>	20
2.1.2	<i>Volume de pequenas barragens.....</i>	30
2.2	Modelagem Hidrológica	38
2.2.1	<i>Critérios de escolha do modelo</i>	39
2.2.2	<i>Utilização de dados históricos</i>	41
2.2.3	<i>Ajuste e verificação dos parâmetros hidrológicos.....</i>	43
2.2.4	<i>Incerteza dos resultados da modelagem</i>	46
3	METODOLOGIA.....	49
3.1	Área de estudo.....	49
3.2	Aquisição e pré-processamento de imagens.....	51
3.2.1	<i>Escolha e obtenção das imagens de satélite</i>	52
3.2.2	<i>Pré-processamento das imagens</i>	57
3.2.3	<i>Composição do mosaico e aplicação do recorte</i>	58
3.3	Adequação das técnicas de sensoriamento remoto	60
3.3.1	<i>Aplicação de composição de bandas espectrais e NDWI.....</i>	60
3.3.2	<i>Classificação das imagens e extração dos espelhos d'água.....</i>	62
3.3.3	<i>Avaliação da extração dos espelhos d'água.....</i>	65
3.4	Cálculo da capacidade de armazenamento de pequenos reservatórios.....	66
3.4.1	<i>Declividade do leito dos cursos hídricos.....</i>	66
3.4.2	<i>Estimativa do volume dos reservatórios</i>	67
3.4.3	<i>Informações equivalentes por sub-bacias</i>	68

3.5	Modelagem Hidrológica	69
3.5.1	<i>Modelo geoespacial.....</i>	69
3.5.2	<i>Dados de entrada</i>	74
3.5.3	<i>Métodos de cálculo das componentes hidrológicas.....</i>	78
3.5.4	<i>Períodos de simulação</i>	83
3.5.5	<i>Eficácia dos resultados.....</i>	87
3.5.6	<i>Caracterização dos reservatórios equivalentes</i>	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.1	Adequação das técnicas de sensoriamento remoto	90
4.1.1	<i>Pré-processamento de imagem.....</i>	90
4.1.2	<i>Composição de bandas espectrais e NDWI</i>	92
4.1.3	<i>Classificação das imagens e extração dos espelhos d'água.....</i>	95
4.1.4	<i>Avaliação da extração dos espelhos d'água.....</i>	98
4.2	Capacidade de armazenamento de pequenos reservatórios	105
4.2.1	<i>Declividade do leito dos cursos hídricos.....</i>	105
4.2.2	<i>Volume dos reservatórios</i>	106
4.2.3	<i>Informações equivalentes por sub-bacias</i>	107
4.3	Modelagem hidrológica.....	109
4.3.1	<i>Modelo geoespacial.....</i>	109
4.3.2	<i>Ajuste dos parâmetros hidrológicos.....</i>	110
4.3.3	<i>Reservatórios equivalentes</i>	117
4.3.4	<i>Prognóstico da influência dos pequenos reservatórios.....</i>	119
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	124
	REFERÊNCIAS	127

1 INTRODUÇÃO

As regiões semiáridas são caracterizadas por recursos hídricos limitados e específicas condições climáticas e fisiográficas, o que inclui a variabilidade temporal e espacial de chuvas, a elevada intensidade de precipitação, escoamento intermitente dos rios, cobertura vegetal esparsa e grande número de reservatórios (D'AGOSTINO *et al.*, 2010). Neste contexto se enquadra o semiárido nordestino. Esta região é conhecida pela reduzida disponibilidade hídrica associada a períodos longos de escassez, o que ocasiona uma problemática multidisciplinar. Corriqueiramente tal questão é abordada sobre os aspectos sociais e econômicos, abrangendo dados sobre a qualidade de vida da população, atividades econômicas da região e fluxos migratórios para outras localidades do país.

Uma forma recorrente de mitigar a escassez hídrica da região foi a construção de reservatórios, principalmente aqueles de médio e pequeno porte. A presença da pequena açudagem no semiárido nordestino é uma consequência da política adotada nessa região, que objetiva armazenar água durante os períodos chuvosos para mantê-la disponível durante os severos períodos de seca (SANTOS *et al.*, 2009). De acordo com Molle (1994), já no início da década de 1990 havia aproximadamente 70.000 pequenos açudes (com área superior a 1.000 m²) no Nordeste brasileiro. Neste contexto, Gheyi *et al.* (2011) destacam que as secas recorrentes na região criaram uma sociedade que valoriza, com muita ênfase, a construção de reservatórios, visando suprir as necessidades hídricas durante os períodos de seca.

Assim, a implantação de pequenas barragens vem auxiliando a redução da vulnerabilidade da população à seca. Seus modestos tamanhos minimizam os impactos negativos associados às construções de grandes barramentos. Porém, há a necessidade de realizar uma exploração racional destes reservatórios, bem como técnicas que visem à preservação dos mesmos se fazem necessárias (SILVA *et al.*, 2007).

A implantação compulsória destes pequenos reservatórios, associada aos problemas sociais da região, gerou um panorama com açudes construídos sem critérios técnicos e planejamento, os quais não possuem sequer a capacidade

volumétrica conhecida. Além disso, Santos *et al.* (2009) alertam que a construção sem planejamento desses pequenos açudes causa impacto na disponibilidade hídrica de grandes reservatórios da bacia e perdas de água por evaporação devido à grande concentração de espelhos d' água.

A gestão dos recursos hídricos na região semiárida necessita de informações a respeito dos pequenos reservatórios, uma vez que tais açudes correspondem à principal fonte de acesso a água para a população. Assim, a ausência de informações, mesmo que sejam aproximadas, a respeito dos reservatórios dificulta o estabelecimento de uma gestão eficiente.

Dentro deste contexto, os Sistemas de Informação Geográfica e as técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) são ferramentas úteis. Shourian *et al.* (2007) relataram que o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, na escala de uma grande bacia, como sendo um problema tão grande e complexo que torna-se imprescindível a utilização de ferramentas eficazes de modelagem, a fim de obter um plano ideal para o desenvolvimento das bacias hidrográficas. Polidorio *et al.* (2005) dissertou que a necessidade de reduzir os custos operacionais e tornar o monitoramento e o estudo dos recursos hídricos mais eficaz, pesquisadores buscam soluções baseadas em equipamentos e técnicas de Sensoriamento Remoto em apoio ao trabalho de investigação dos corpos d'água. Dentre as técnicas mais utilizadas estão as que realçam os corpos d'água, como os índices NDVI e NDWI, e a de classificação de imagens, seja esta supervisionada ou não.

Diante desse contexto de escassez hídrica do semiárido nordestino, o rio São Francisco sempre teve papel fundamental no abastecimento de água para a população e para as atividades econômicas de uma considerável parcela desta região. De acordo com ANA/GEF/PNUMA/OEA (2004), o Alto e Médio São Francisco são responsáveis por cerca de 97% da formação da vazão do rio. Pereira *et al.* (2007) publicaram que as sub-bacias hidrográficas dos rios Pará, Paraopeba, Abaeté, Velhas, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Carinhanha, Corrente e Grande, localizadas no Alto e Médio São Francisco e representando 46,3% da área da Bacia do São Francisco, contribuíram com 98% da sua vazão, no período entre 1979 e 1999. Assim, a importância das vazões incrementais destas bacias para o rio São Francisco, e, conseqüentemente, para a parcela do semiárido

congruente com a área desta bacia, fica comprovada, sendo responsáveis pela formação do escoamento dos principais cursos hídricos da região.

No mesmo estudo, Pereira *et al.* (2007) dissertaram que as demais sub-bacias contribuíram com aproximadamente 19% da vazão do rio São Francisco para o período entre 1950 a 1976. Como já relatado, este percentual reduziu para cerca de 2% para a época de 1979 a 1999. Portanto, houve uma redução de 17% na vazão incremental destas sub-bacias para a vazão do rio São Francisco. Segundo os autores, a justificativa para essa redução na vazão incremental foi o aumento da precipitação nas principais bacias formadoras de vazão do rio São Francisco (Pará, Paraopeba, Abaeté, Velhas, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Carinhanha, Corrente e Grande), principalmente na área de cabeceira e na margem esquerda do rio. Pereira *et al.* (2007) relataram que a precipitação média no segundo período foi sempre maior que a do primeiro, sendo a máxima variação na Sub-Bacia do Rio Corrente (14,4%) e a mínima na do Paracatu (0,5%).

Por outro lado, Almeida *et al.* (2016) relataram que ocorreu uma tendência de redução na precipitação média ao longo dos anos nas principais bacias formadoras de vazão do rio São Francisco, para o período entre os anos de 1986 e 2015. Consequentemente, Almeida *et al.* (2016) concluíram que ocorreu também tendência de redução da vazão a montante do reservatório de Sobradinho. Como exemplo dessa redução, observa-se o gráfico da vazão incremental entre as estações fluviométricas de São Francisco, em Minas Gerais, e Morpará, na Bahia.

Assim, a precipitação nas sub-bacias do Alto e Médio São Francisco impacta diretamente na vazão incremental do rio. Mas, outros fatores podem influenciar a vazão incremental de uma bacia hidrográfica, como as mudanças climáticas, os usos da água para irrigação, sendo esta a maior demanda hídrica, e a modificação do uso e conservação do solo. É neste terceiro grupo que se enquadra a construção de pequenos reservatórios para armazenamento de água. Segundo Martins *et al.* (2007), os estados do Ceará, Paraíba e Pernambuco tinham a maior concentração de espelhos d'água entre os estados do Nordeste. Estes estados também apresentam os maiores déficits hídricos do Brasil. Então, pode haver uma relação direta entre a reduzida disponibilidade hídrica e a implantação de pequenos reservatórios nesta região.

Tal fato pode estar acontecendo também com as sub-bacias hidrográficas classificadas como “outras” por Pereira *et al.* (2007) em sua pesquisa. A reduzida disponibilidade hídrica poderia ter ocasionado uma valorização pela construção de pequenos açudes, que estariam interceptando parte do escoamento superficial, reduzindo suas contribuições para a vazão do rio São Francisco.

A estimativa do quantitativo de pequenos reservatórios, assim como suas capacidades de armazenamento, e a influencia destes no escoamento superficial auxiliaria no gerenciamento hídrico desta região, sobretudo no entendimento das ofertas de água para a população. Portanto, estudos e pesquisas abordando esta temática deveriam ser desenvolvidos em regiões de reduzida disponibilidade hídrica, com a finalidade de produzir informações importantes para o conhecimento dos recursos hídricos de tais áreas.

1.1 Justificativa

A avaliação do quantitativo de pequenos reservatórios em bacias hidrográficas do semiárido Nordeste tornou-se uma questão fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que tais estruturas ofertam a água para o abastecimento da população e dos setores produtivos. A cultura de implantação de pequenos açudes dos governantes e da população ocasionou uma lacuna de informações nesta temática, de modo que tais estruturas foram construídas sem critérios técnicos e de planejamento.

Os pequenos reservatórios modificaram o uso e ocupação do solo das regiões de reduzida disponibilidade hídrica, causando efeito no escoamento superficial das bacias hidrográficas. Tal situação pode ter ocorrido nas bacias do rio Carinhanha, rio das Rãs, rio das Velhas, riacho Santana e Riacho das Pitubas, integrantes da bacia hidrográfica do rio São Francisco. Esta interceptação ocasiona a redução da vazão incremental dos principais rios de uma região, e, conseqüentemente, redução das vazões destes rios. Além do mais, em modelagens hidrológicas desenvolvidas, os pesquisadores costumam tratar a interceptação dos pequenos reservatórios como insignificante. Assim, a geração de informações sobre a influência de reservatórios no escoamento superficial deverá ser incentivada,

mesmo que sejam aproximadas, de modo a contribuir para gestão hídrica das bacias.

1.2 Objetivo

O objetivo geral do respectivo trabalho é listado na sequência, assim como os objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

A presente pesquisa foi realizada para avaliar o volume de pequenos reservatórios na área de interesse e analisar o impacto que a interceptação destes causam no escoamento superficial. Dessa forma, procurou-se produzir métodos e informações para auxiliar a gestão dos recursos hídricos, principalmente em regiões com a presença em larga escala de pequenos açudes. Também, buscou-se utilizar técnicas que reduzissem o tempo e custo para coletar os dados necessários para o trabalho.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, a presente pesquisa perseguiu os seguintes pontos:

- Identificar e quantificar os reservatórios distribuídos ao longo da área de estudo, através de imagens de satélite;
- Determinar o volume de cada reservatório para estimar a capacidade de interceptação máxima dos pequenos açudes;
- Realizar uma modelagem hidrológica na área de estudo analisando dois cenários, com a presença dos reservatórios e sem a presença destas estruturas, e avaliar seus resultados;
- Relacionar a reduzida disponibilidade hídrica da região e o incentivo da implantação de pequenos reservatórios;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O domínio em diferentes áreas de conhecimento foi uma das primeiras etapas da pesquisa, a qual foi realizada para permitir alcançar os objetivos, através do estudo de métodos e ferramentas aplicadas pela comunidade científica. Foram abordadas literaturas consagradas pelas respectivas temáticas, assim como o desenvolvimento científico e tecnológico de pesquisadores. Logo, as seções seguintes dissertarão aspectos relacionados à aquisição de dados de pequenas barragens e modelagem hidrológica. Tais perspectivas, adequadas de forma a serem complementares, formaram a base sólida de informações para o pleno desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Aquisição de dados de pequenas barragens por Sensoriamento Remoto

Num país de dimensão continental como o Brasil, com uma grande carência de informações adequadas para a tomada de decisões sobre a temática relacionada a Recursos Hídricos, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente (CÂMARA, DAVIS E MONTEIRO, 2004).

Cada vez mais os pesquisadores têm buscado coletar dados relacionados aos recursos hídricos de forma eficaz, utilizando técnicas que reduzam os custos e o tempo para obter resultados. Dentro deste contexto, o sensoriamento remoto vem se consolidando como uma ferramenta de apoio ao trabalho de investigação de corpos d'água. Polidorio *et al.* (2005) relataram que técnicas e metodologias têm sido criadas para mensurar, classificar e relacionar eventos. Segundo Azevedo (2007), a utilização de técnicas de sensoriamento remoto para o gerenciamento de recursos naturais é um fato consolidado no mundo das geotecnologias. As imagens orbitais têm se mostrado especialmente úteis no mapeamento de grandes áreas e em sua análise temporal, permitindo o acompanhamento da evolução de cenários ambientais ao longo de um determinado período (CARVALHO *et al.*, 2009).

As técnicas convencionais de aquisição de dados de barragens *in loco* vêm se tornando onerosas devido a grande quantidade de corpos hídricos,

principalmente de médio e pequeno porte. No caso dos pequenos açudes, por exemplo, que em geral são os que ocorrem em maior frequência em uma bacia, a batimetria seria um meio inviável (SANTOS *et al.*, 2009). Então, a técnica de sensoriamento remoto aparece como uma solução prática para estimativa das áreas dos espelhos d'água e dos volumes dos reservatórios, pois de acordo com Liebe (2002), a capacidade dos açudes está relacionada com fatores físicos da região (relevo, morfologia, forma dos córregos e dos vales) que se refletem na forma do espelho d'água e podem ser extraídos por imagens de satélite.

Liebe *et al.* (2005) defende que a gestão eficiente da água e o planejamento de reservatórios são prejudicados pela falta de informação sobre o funcionamento desses reservatórios. Desta forma, o uso de técnicas simplificadoras que obtenha dados sobre os reservatórios, independentemente do seu tamanho, visa mitigar essa carência de informação e contribuir para a gestão dos recursos hídricos de uma bacia e/ou região hidrográfica.

Deste modo, será apresentada na sequência uma coletânea de estudos que abordam a identificação de pequenos reservatórios numa bacia hidrográfica, de forma a identificar os espelhos d'água, estimar suas áreas máximas e os respectivos volumes armazenados.

2.1.1 Identificação e estimativa da área de pequenas barragens

A água apresenta a característica de refletir uma parcela muito pequena da energia luminosa incidida, uma vez que a maior parte é transmitida, absorvida e dispersada pela água. O espectro de radiação refletida pela água tem uma faixa de comprimento de onda entre 400 e 900 nm, equivalente à faixa visível e ao infravermelho próximo (NIR). A presença de sedimentos na água provoca uma resposta espectral semelhante àquela emitida por solo úmido.

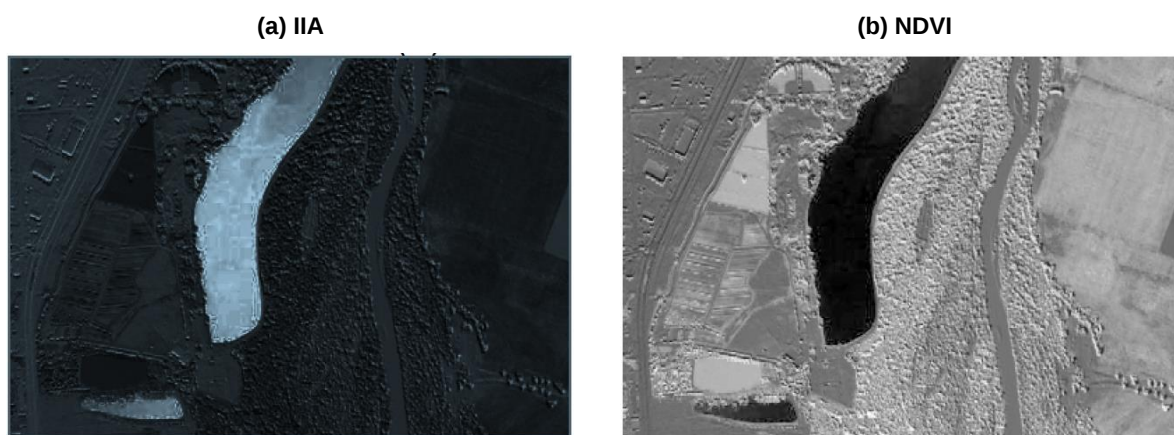
Buscando identificar corpos d'água para imagens multiespectrais através de índice indicador, Polidorio, Imai e Tommaselli (2004) analisou composições coloridas de bandas espectrais e índices conhecidos, como o NDVI e NDWI, para atingir tal objetivo. Polidorio e colaboradores constataram que, diferentemente da vegetação, em nenhuma banda do espectro a água responde de forma acentuada produzindo valores elevados de brilho, caracterizando-se pelos baixos valores.

Polidorio, Imai e Tommaselli (2004) constatou que para computar um Índice Indicador de Água (IIA) pela diferença normalizada deve-se usar uma lógica diferente daquela empregada no cômputo do NDVI, mas que tenha a capacidade de produzir resultados de destaque equivalentes (enquanto o NDVI destaca a vegetação, o IIA deve destacar a água). A proposta deste indicador pelos autores foi relacionar a banda verde (G) com a NIR:

$$IIA = \frac{G - 4NIR}{G + 4NIR} \quad (1)$$

A Equação 1 considera que, uma vez que é impossível associar os corpos d'água com altos valores de brilho, é preferível que os valores IIAs sejam aproximadamente zero para os respectivos corpos d'água e, que para outras feições sejam negativos (próximo de -1.0 como o ideal), introduzindo o realce esperado. O resultado desta aplicação pode ser comparado com o NDVI na Figura 1.

Figura 1 - Comparação do IIA com NDVI.



Fonte: Polidorio, Imai e Tommaselli (2004).

Para realizar um teste mais eficaz do quão o IIA realça os corpos d'água, foi efetuado um agrupamento, usando a classificação da imagem através do algoritmo *K-means* (K-médias) em duas classes distintas: uma com e outra sem corpos d'água, cujo resultado é apresentado na Figura 2. Polidorio, Imai e Tommaselli (2004) concluíram que houve uma boa qualidade do resultado alcançado com a aplicação do IIA, no sentido de realçar corpos d'água, o qual permitiu a aplicação de algoritmos simples para segmentação dos mesmos.

Posteriormente, Polidorio *et al.* (2005) utilizaram o método do IIA associado à marcadores automáticos definidos para segmentar corpos d'água. Segundo os autores, segmentação de regiões distintas de uma imagem segue duas abordagens, ou por contorno ou por região, como: divisão e fusão (*split and merge*) e crescimento de regiões (*region growing*). Assim foi utilizado no referido trabalho a segmentação de partição de água chamada *watershed* (D'ORNELLAS, 2001; VINCENT E SOILLE, 1991; LOTUFO E FALCÃO, 2000). A base para aplicar essa técnica consiste em associar cada região às suas características de contorno (gradiente, esqueleto, distância geodésica, etc.) e obter informações dessas regiões primitivas básicas, como: a topografia e os mínimos regionais, as quais permitem determinar regiões chamadas bacias de retenção (POLIDORIO *et al.* 2005).

Figura 2 - Segmentação de corpos d'água através do algoritmo K-means usando a imagem IIA.



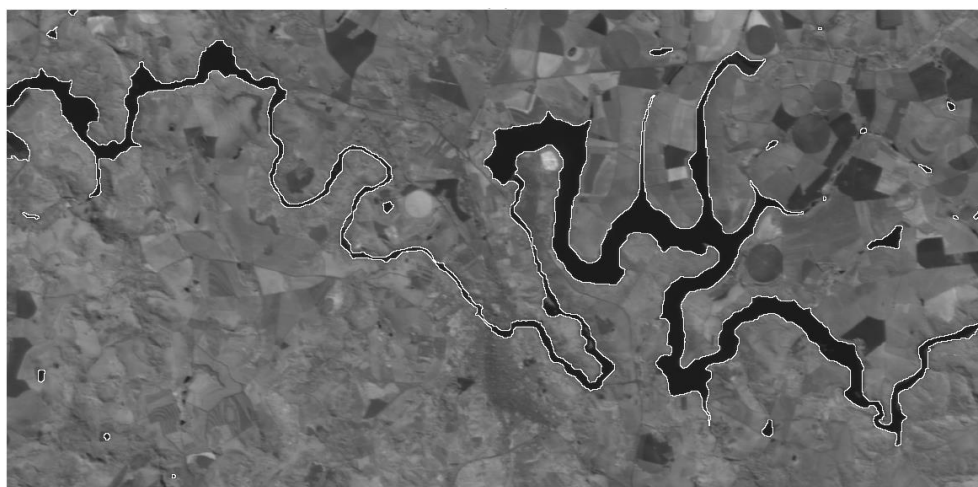
Fonte: Polidorio, Imai e Tommaselli (2004).

A metodologia utilizada por Polidorio e colaboradores foi dividida em três partes: (i) detecção dos marcadores internos e externos e realce adicional dos corpos d'água; (ii) segmentação dos corpos d'água e; (iii) uso de imagens temporais para complementar os resultados. Maiores detalhes poderão ser consultados no respectivo trabalho. Foi detectado que a presença de nuvens e sombras, bem como a aquisição de imagens com baixa qualidade de iluminação (tempo nublado, alta taxa de umidade relativa do ar, etc.) podem provocar problemas na completa segmentação dos corpos d'água (POLIDORIO *et al.* 2005). Para obter melhores resultados, foram utilizadas imagens temporais, unindo os produtos, como exibido na Figura 3.

Utilizando imagens CBERS II da região nordeste com datas posteriores ao período de chuvas do ano de 2004, Bielenki Júnior *et al.* (2007) procurou mapear os

reservatórios do Nordeste Brasileiro. De acordo com os autores, tentou-se averiguar a viabilidade de um procedimento de extração automática das feições dos reservatórios utilizando a metodologia de Polidorio *et al.* (2005), baseada em um índice discriminante para corpos d'água (IIA). Porém, devido ao tempo para a execução do trabalho, não foi possível implementá-la em sua totalidade, mas ela se mostrou útil para o auxílio na pré-identificação das feições a serem mapeadas.

Figura 3 - Segmentação de corpos d'água em imagens multiespectrais e temporais usando *watershed* com marcadores automaticamente definidos.



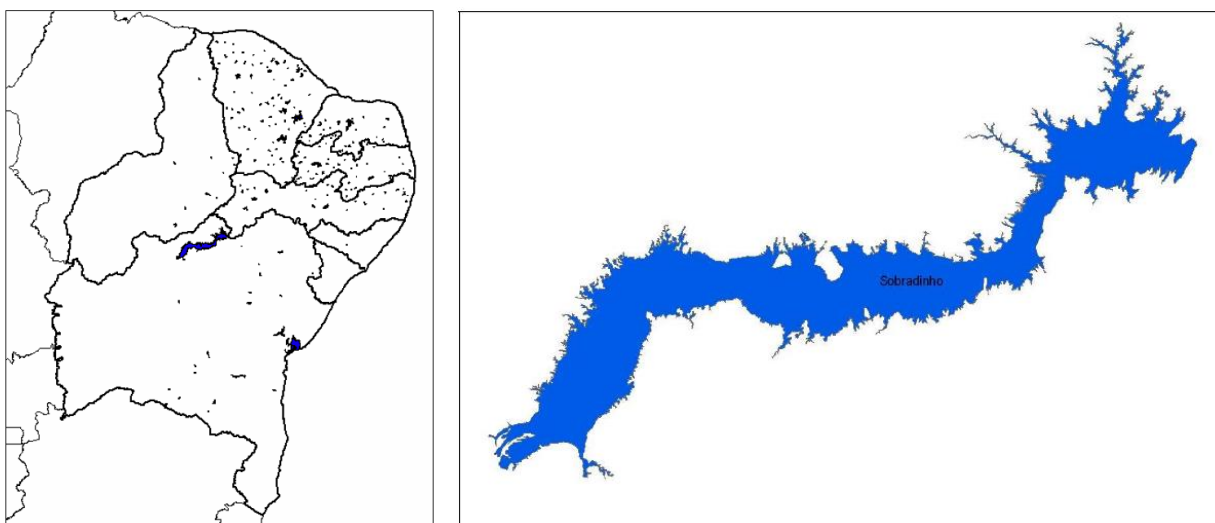
Fonte: Polidorio *et al.* (2005).

Segundo Rocha (2000), a vetorização dos corpos d'água consiste na individualização das entidades que sofreram um processo de escandimento e pode ser realizada de três maneiras: manualmente (*heads-up*), automaticamente ou semiautomaticamente. No trabalho de Bielenki Júnior e colaboradores, eram conhecidos os reservatórios que deveriam ser mapeados, e, por este motivo, optou-se pela vetorização manual (*heads-up*), cuja é realizada por um operador que persegue cada feição *raster* com o cursor, escolhendo-se as primitivas geométricas que a modelem melhor na estrutura vetorial (ROCHA, 2000). O resultado dos 236 reservatórios mapeados pode ser visto na Figura 4.

Similar ao trabalho de Bielenki Júnior *et al.* (2007), mas em uma abrangência territorial maior, foi finalizado no ano de 2008 o mapeamento dos espelhos d'água do Brasil, com o propósito de gerar informação para subsidiar ações de planejamento e gestão do setor de recursos hídricos e integrar a base do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH (FUNCEME, 2008). Esse estudo foi realizado através de um convênio envolvendo o Ministério da

Integração Nacional – MI e a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos hídricos – Funceme, o qual identificou todos os espelhos d'água do país (naturais e artificiais) que tinham área superficial a partir de 20 ha. Para o Nordeste, dado o grande número de reservatórios de pequeno e médio porte, foram mapeados todos os açudes com área igual ou superior a 5 ha.

Figura 4 - Reservatórios mapeados no Nordeste por Bielenki Júnior e colaboradores, com destaque para o Reservatório de Sobradinho.



Fonte: Adaptado de Bielenki Júnior *et al.* (2007).

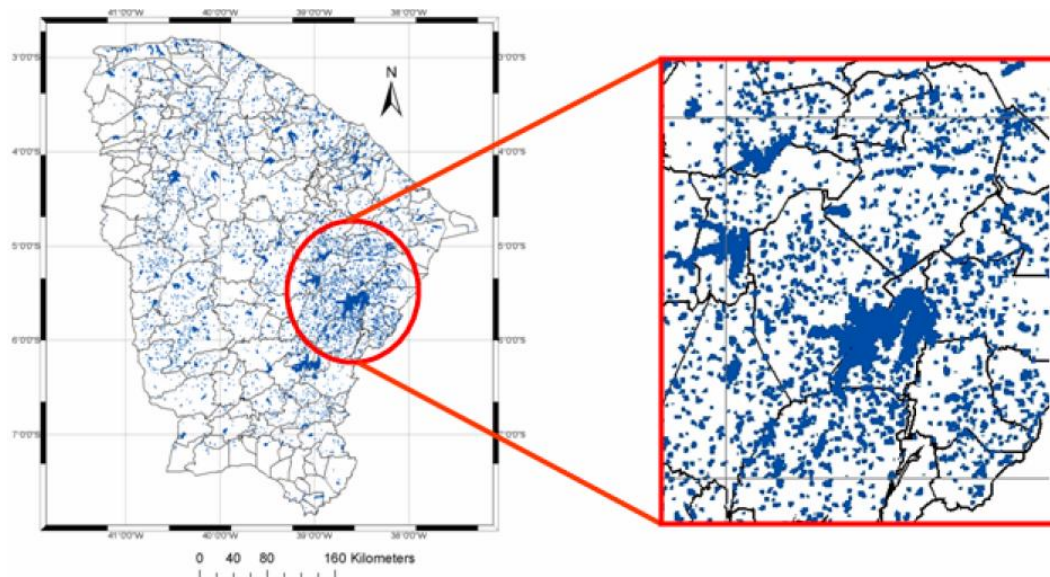
A metodologia que norteou a execução dos trabalhos foi elaborada pela Funceme e aprovada pelo MI e ANA. Esta metodologia consistia de todas as atividades do projeto, desde a aquisição, georreferenciamento das imagens e vetorização dos espelhos d'água, até os resultados finais. O mapeamento foi na escala 1:250.000, o qual faz uso de imagens CBERS para a identificação dos espelhos e de imagens Landsat TM+ (Geocover) para o fazer o georeferenciamento das primeiras (MARTINS *et al.*, 2007). Segundo Funceme (2008), a vetorização dos espelhos d'água foi realizada a partir das imagens CBERS e do Projeto Georecover¹, priorizando a primeira. Foram utilizadas a composição de cor verdadeira, falsa cor e SWIR (*Short-Wavelength Infrared*) na detecção dos reservatórios.

Semelhante ao trabalho de Bielenki Júnior *et al.* (2007), a vetorização das feições do reservatório do mapeamento dos espelhos d'água do Brasil foi realizada

¹ O **Projeto GeoCover** foi produzido por *Earth Satellite Corporation* para a NASA. Contém imagens Landsat da série dos sensores TM (Landsat 5) e TM+ (Landsat 7) com abrangência mundial.

manualmente (*heads-up*). Segundo Martins *et al.* (2007), a metodologia adotada mostrou-se eficiente para o mapeamento de espelhos d'água a partir do uso de imagens CBERS, um produto disponível gratuitamente que permitirá o monitoramento sistemático da pequena “açudagem”, um instrumento importante para o gerenciamento dos recursos hídricos (Figura 5).

Figura 5 - Resultado da metodologia desenvolvida pela Funceme para identificação e estimativa de área de açudes no estado do Ceará.



Fonte: Martins *et al.* (2007).

Porém, tanto o trabalho da Funceme (2008) quanto o de Bielenki Júnior *et al.* (2007) ficaram com a qualidade do produto na dependência do analista, devido à vetorização do trabalho ser realizada manualmente. Assim, este processo acaba por ser moroso, sendo necessário bastante tempo e mão de obra para a execução das atividades.

Silva *et al.* (2007) utilizou imagens do satélite CBERS para identificar e estimar a área do açude Cachoeira, localizado no município de Serra Talhada-PE. Para tal fim, foram realizadas três composições de bandas com o intuito de escolher a melhor delas, sendo selecionada para correção radiométrica e para segmentação a composição falsa cor. Para reconhecer o reservatório na imagem, foi realizada uma classificação supervisionada pelo método de Maxver, que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes, utilizando parâmetros estatísticos. Silva *et al.* (2007) adotaram um limiar de aceitação de 100%.

Através dos métodos aplicados, Silva *et al* (2007) relatou que com o uso de ferramentas de geoprocessamento é possível quantificar a variação de armazenagem de reservatórios superficiais através de imagens de satélites para diferentes datas.

Outro estudo relevante para identificar corpos d'água através de imagens de satélite foi publicado por Ji, Zhang e Wylie (2009), cujo analisou os limites dinâmicos dos índices de diferença normalizada da água (NDWI) apontado por outros autores. Como já relatado, o NDWI foi baseado sobre o fato de que a água absorve energia no infravermelho próximo (NIR) e comprimentos de onda infravermelhos de ondas curtas (SWIR). Os autores afirmam que a operação realizada não só melhora os sinais espectrais, contrastando a reflectância entre diferentes comprimentos de onda, mas também cancela uma grande parte dos componentes de ruído que são comuns em diferentes regiões de comprimento de onda (ou seja, calibrar e alterar as condições de radiação causadas pela iluminação, solo, topografia e condições atmosféricas, etc.).

No referido estudo, Ji, Zhang e Wylie (2009) analisaram a variação dos limites dinâmicos de diferentes NDWIs, enfatizando dois aspectos: (i) a influência do solo e vegetação nos componentes dos *pixels* na variação do limite do índice NDWI, e (ii) a performance de todas as diferentes formas de NDWIs baseada na sensibilidade do índice para os componentes dos *pixels*.

Ji, Zhang e Wylie (2009) avaliaram em sua pesquisa sete métodos de NDWIs. O primeiro corresponde à formulação proposta por McFeeters (1996), que utiliza as bandas verde (G) e infravermelho próximo (NIR), exibido na Equação 2. Rogers e Kearney (2004) utilizaram as bandas vermelha (R) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR) para reproduzir o NDWI, conforme indica a Equação 3. Xu (2006) modificou o NDWI proposto inicialmente por McFeeters (1996), propondo utilizar as bandas espectrais verde (G) e SWIR (Equação 4). Lacaux *et al.* (2007) desenvolveu um índice normatizado para detecção de lagos (NDPI) utilizando as bandas SWIR e verde (G), como o arranjo exibido na Equação 5. Ouma e Tateishi (2006) utilizaram outros três diferentes índices, utilizado as bandas verde (G), NIR, SWIR₁ SWIR₂, correspondentes as bandas 2, 4, 5 e 7 do satélite Landsat TM/ETM+, exibidas nas Equações 6 a 8.

$$NDWI_{McFeeters} = \frac{G-NIR}{G+NIR} \quad \text{McFeeters (1996)} \quad (2)$$

$$NDWI_{R-K} = \frac{R-SWIR}{R+SWIR} \quad \text{Rogers e Kearney (2004)} \quad (3)$$

$$MNDWI_{Xu} = \frac{G-SWIR}{G+SWIR} \quad \text{Xu (2006)} \quad (4)$$

$$NDPI_{Lacaux} = \frac{SWIR-G}{SWIR+G} \quad \text{Lacaux et al. (2007)} \quad (5)$$

$$NDWI_{O-T1} = \frac{SWIR2-SWIR1}{SWIR2+SWIR1} \quad \text{Ouma e Tateishi (2006)} \quad (6)$$

$$NDWI_{O-T2} = \frac{SWIR1-NIR}{SWIR1+NIR} \quad \text{Ouma e Tateishi (2006)} \quad (7)$$

$$NDWI_{O-T3} = \frac{SWIR2-G}{SWIR2+G} \quad \text{Ouma e Tateishi (2006)} \quad (8)$$

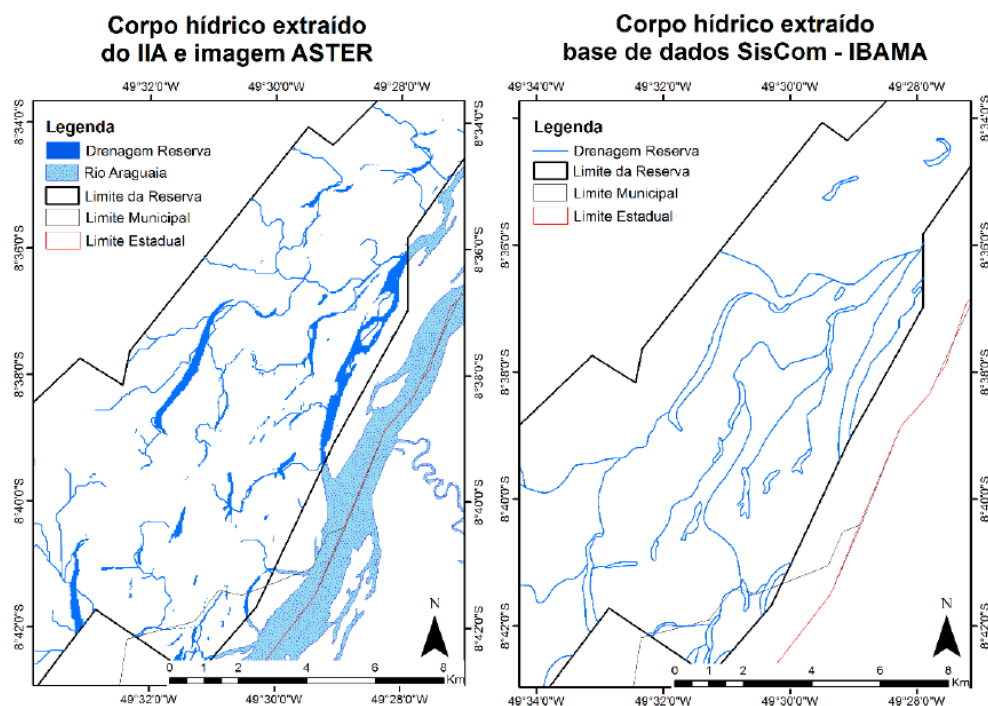
Para aplicação desses índices, foram utilizadas todas as bandas espectrais visíveis, além do NIR e SWIR, de quatro sensores de satélite: Landsat ETM+, SPOT, ASTER e MODIS. Segundo os autores, foram utilizados os espectros de água, solo e vegetação da biblioteca espectral e, em seguida, foram simuladas as assinaturas espectrais. Desta forma, foi descoberto que o NDWI que apresentou o limite mais estável foi MNDWI (Equação 4), desenvolvida por Xu (2006). Para isso, a banda SWIR deve estar na região de menor comprimento da onda (1,2 a 1,8 μm). Além disso, foi detectado pelos autores que o NDVI é muito sensível à vegetação, não sendo adequado para delinear água, a menos que as faixas SWIR não estejam disponíveis no sensor.

Outra aplicação de índices como ferramenta de mapeamento de corpos hídricos foi desenvolvido por Pacheco e Santos (2014). Na ocasião, as autoras buscaram realizar o mapeamento das lagoas da Reserva Florestal Padre Josimo Tavares em Conceição do Araguaia-PA. Para tal fim, utilizaram o IIA desenvolvido por Polidório et al. (2004), exibido neste através da Equação 1, nas bandas espectrais verde (G) e infravermelho próximo (NIR) das imagens do satélite Landsat 8, o qual é equipado pelo sensor OLI (*Operational Land Imager*). A rede de drenagem foi extraída através de imagem ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), o qual é um imageador desenvolvido pela NASA a bordo do Satélite TERRA (EOS-AMI) em funcionamento desde 1999 (PACHECO E SANTOS, 2014).

A peculiaridade deste estudo aos demais descritos nesta seção se deve a utilização das imagens do Landsat 8. Pacheco e Santos (2014) afirmam que as imagens sofreram uma melhora significativa na capacidade de detectar mudanças na superfície terrestre visto que, a qualidade dos dados (relação sinal-ruído) e quantização radiométrica (12 bits) da OLI e TIRS é maior do que instrumentos Landsat anteriores (8-bit para TM e ETM+).

No final da pesquisa, Pacheco e Santos (2014) relataram que ao comparar os resultados obtidos através do IIA e imagem ASTER com os dados hidrográficos precedentes, foi observado que o uso do IIA (considerando a limitação da resolução espacial do Landsat 8 e imagem adquirida no período de estiagem) com as drenagem extraída da imagem ASTER reconhece e identifica uma rede hidrográfica mais detalhada e parecida com a realidade, ou seja, o IIA é altamente recomendado para análises de bacias hidrográficas da região amazônica. Os resultados podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 - Resultado da extração de corpos hídricos da pesquisa de Pacheco e Santos (2014).



Fonte: Pacheco e Santos (2014).

A utilização de bandas espectrais do satélite Landsat 8 (sensor OLI) para extrair contornos de corpos d'água também foi feito por Rocha e Candeias (2015). Semelhantes aos demais estudos descritos nesta seção, as autoras aplicaram os índices NDWI e NDVI para binarização, realce de contraste e automatização da

extração de contornos de corpos hídricos. Porém, a formulação aplicada destes índices é distinta daquelas já apresentadas.

A formulação do NDWI adotada foi determinada por Jensen (2011), a qual utiliza as bandas espectrais do NIR e SWIR, conforme disposto na Equação 9. Para a aplicação do NDVI, Rocha e Candeias (2015) não citaram a referência das equações utilizadas, deixando a dúvida se tal formulação teria sido desenvolvida pelas autoras. As Equações 10 e 11 exibem tais formulações de NDVI, as quais utilizam as bandas vermelha (R) e NIR e duas constantes para contraste da imagem (a e b).

$$NDWI_{Jensen} = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (9)$$

$$NDVI_{R-C} = a + \frac{NIR - R}{NIR + R} + b \quad (10)$$

$$Neg(NDVI)_{R-C} = a + \frac{R - NIR}{R + NIR} + b \quad (11)$$

Rocha e Candeias (2015) utilizaram dois métodos de extração para posterior comparação dos resultados, uma extração automática e outra manual. Os autores não detalharam quais as ferramentas utilizadas para a extração automática dos corpos hídricos. A extração automática apresentou problemas na extração do contorno. Assim aquela realizada manualmente dispôs de melhor resultado. Logo, os pesquisadores concluíram que o negativo do índice NDVI utilizado no trabalho (Equação 11) apresentou grande êxito na análise dos corpos de água representados pelos rios Parnaíba e Poty da cidade de Teresina-PI. Também foi enfatizado que o método de binarização foi eficaz para evidenciar e separar a presença e não de água na imagem e fundamental para a transformação de *raster* para vetor.

Namikawa (2015) utilizou também imagens do satélite Landsat 8 (sensor OLI) para estimar o volume de inundação das barragens Jaguari e Jacareí, ambas pertencentes ao Sistema Cantareira. O pesquisador utilizou o estudo de Ji, Zhang e Wylie (2009) para determinar quais bandas espectrais utilizar para aplicar o índice NDWI. Para tal fim, foram escolhidas as bandas verde (G), NIR e SWIR do referido sensor remoto, utilizando as Equações 2 e 4. Também foi aplicado pelo autor a composição falsa cor, utilizando uma imagem pancromática com 15 metros de resolução do Landsat 8. Desta forma, a composição falsa cor teve sua resolução

espacial melhorada de 30 para 15 metros. Para a classificação da imagem, Namikawa utilizou o algoritmo EM implementado no software TerraView (Versão 5.0 Beta).

Nos seus resultados, Namikawa (2015) enfatizou que a utilização da metodologia proposta permitiu que se estimasse tanto a área de lâmina de água, quanto à alteração no volume de água entre duas imagens com uma diferença média menor do que 2% e máxima de 5,3%. O Autor também alertou que a metodologia depende da existência de uma relação entre área, volume e cota para o reservatório, uma vez que somente é possível determinar a área de lâmina de água em uma imagem Landsat 8. Ou seja, a relação é única para cada reservatório e pode ser encontrada na documentação técnica sobre o respectivo corpo hídrico.

Diante do exposto nesta seção, fica comprovada que a utilização de índices de diferença normalizada da água e da vegetação é ferramenta útil na detecção de corpos hídricos, independente da magnitude dos seus tamanhos. Em geral, o NDWI apresentou com uma maior acurácia, sobretudo aquele disposto na Equação 4, conforme evidenciado por Ji, Zhang e Wylie (2009). No que se refere ao método de extração do contorno dos corpos hídricos e, sucessivamente, suas respectivas áreas de espelho d'água, foram dispostos métodos manuais e automáticos nas pesquisas apresentadas. A extração manual mostrou-se morosa e custosa, devido necessitar de uma grande quantidade de mão de obra e/ou de maior tempo para sua execução. Deste modo, devem-se buscar metodologias automáticas que possam garantir a efetividade dos resultados, como por exemplo, a classificação supervisionada.

2.1.2 Volume de pequenas barragens

Para avaliar a disponibilidade hídrica de uma bacia ou região hidrográfica é necessário se obter informações das vazões de permanência dos principais rios e riachos, além da capacidade e regra de operação dos reservatórios, sejam estes últimos interanuais (grande porte) ou anuais (médio e pequeno porte). Geralmente os grandes barramentos, implantados por órgãos federais ou estaduais na sua maioria, têm suas curvas cota x área x volume conhecidas, facilitando o monitoramento do mesmo. Tal monitoramento poderá ser pelas convencionais réguas linimétricas instaladas no corpo hídrico ou através do sensoriamento remoto,

uma vez que são conhecidas técnicas que permitem estimar a área do espelho d'água com boa precisão, como mostrados na seção 2.1.1.

Porém, a maioria dos reservatórios em uma bacia hidrográfica é de médio e pequeno porte, e, segundo SANTOS *et al.* (2009), possui capacidade volumétrica desconhecida devido à falta de projeto de construção. Desta forma, pesquisadores vêm realizando estudos que objetivam estimar estes volumes indiretamente, geralmente em função de parâmetros que podem ser extraídos por técnicas como geoprocessamento e sensoriamento remoto, tais como área do espelho d'água, declividade dos cursos hídricos, topografia do reservatório, etc.. Assim, serão elencados nesta seção estudos realizados com este propósito, principalmente aqueles localizados em região semiárida.

Um importante estudo foi desenvolvido no Brasil a respeito da geometria de pequenos açudes, publicado por Molle (1994). O autor levantou um acervo de informações sobre 420 pequenos açudes na região Nordeste, com volume mediano de 100.000 m³. Com essa representatividade de amostras, foram realizados os seguintes estudos:

- Determinação, variação e crítica dos coeficientes geométricos representativos.
- Avaliação simplificada do volume de terra da barragem e o volume d'Água armazenado.
- Avaliação do volume armazenado a partir de fotos de satélite.
- Relação entre o volume de terra do maciço e o volume da fundação
- Correlações entre os coeficientes geométricos.
- Proposta para uma determinação simplificada do volume armazenado e dos coeficientes geométricos.

O autor ressaltou que os numerosos açudes Nordestinos apresentam, para qualquer observador atento, características bastante variáveis, em particular no que diz respeito a sua geometria. Por geometria, entende-se a forma geral da aguada e do vale barrado pela represa.

Para a avaliação de volume armazenado a partir de imagens de satélite, Molle (1994) avaliou que a superfície (área do espelho d'água) é o elemento principal para se obter o resultado. Além desse parâmetro, o autor definiu que na época as informações que poderiam ser obtidas por fotos aéreas ou de satélite seria o

comprimento da barragem, o perímetro do espelho d'água, o declive médio de riachos e o comprimento do talvegue.

Uma análise multilinear sobre uma amostra de 314 açudes, entre o volume e a superfície do espelho d'água, Molle (1994) obteve as seguintes regressões:

$$V_x = -3.144 + 2,04.S_x \quad R^2=0,946 \quad S_x < 80 \text{ ha} \quad (12)$$

$$V_x = -13.853 + 2,95.S_x \quad R^2=0,844 \quad S_x < 20 \text{ ha} \quad (13)$$

Onde: V_x : volume do reservatório (m^3);

S_x : superfície do espelho d'água (m^2).

O pesquisador relatou que o valor $R^2 = 0,946$, obtido para a primeira regressão é, em parte, devido a irregularidade da distribuição da variável S_x , havendo poucos valores na parte superior da faixa de variação e, por conseguinte, geração de um R^2 alto. Por tal motivo, foi efetuada uma regressão sobre a nuvem de pontos principais, restringindo-se às superfícies inferiores a 20 ha. Também foi realizada uma regressão sobre função potencial, exibidas nas Equações 14 a 16, que apresentou precisão equivalente. A precisão dessas fórmulas é de $\pm 25\%$ para uma probabilidade de 0,05.

$$V_x = 1,98.S_x^{1,001} \quad R^2=0,946 \quad \text{toda amostra} \quad (14)$$

$$V_x = -23.776 + 5,64.S_x^{0,93} \quad R^2=0,899 \quad S_x < 80 \text{ ha} \quad (15)$$

$$V_x = -6.290 + 0,425.S_x^{1,147} \quad R^2=0,844 \quad S_x < 20 \text{ ha} \quad (16)$$

Molle (1994) também introduziu a declividade média dos riachos em percentual (DM) para realizar um ajuste de uma nova formulação. As Equações 17 a 19 foram desenvolvidas em função do produto $S_x^a.DM^b$, obtendo um aumento significativo de r^2 .

$$V_x = S_x^{1,065}.DM^{0,144} \quad R^2=0,950 \quad \text{toda amostra} \quad (17)$$

$$V_x = 0,117.S_x^{1,263}.DM^{0,49} \quad R^2=0,905 \quad S_x < 20 \text{ ha} \quad (18)$$

$$V_x = 0,045.S_x^{1,348}.DM^{0,50} \quad R^2=0,880 \quad S_x < 10 \text{ ha} \quad (19)$$

A introdução da variável da maior distância até o centro da barragem (*DIAM*) pelo pesquisador não melhorou o ajustamento, enquanto a variável do comprimento do riacho (*LEITO*, em m) trouxe um pequeno aumento de R^2 , chegando-se a uma correlação satisfatória (MOLLE, 1994). Esta última é apresentada pelas formulações a seguir.

$$V_x = 0,00348.S_x.DM.LEITO \quad R^2=0,973 \quad \text{toda amostra} \quad (20)$$

$$V_x = 0,00384.S_x.DM.LEITO \quad R^2=0,944 \quad S_x < 20 \text{ ha} \quad (21)$$

$$V_x = 0,00377.S_x.DM.LEITO \quad R^2=0,916 \quad S_x < 10 \text{ ha} \quad (22)$$

A Figura 7 apresenta um exemplo de relações área x volume encontradas por Molle. Vale destacar que essas relações também não permitem estimar o volume de um determinado açude com a precisão requerida para um projeto, mas são suficientes para, em termos de planejamento, avaliar com boa precisão os volumes armazenados de uma região, havendo certa compensação dos erros (MOLLE, 1994).

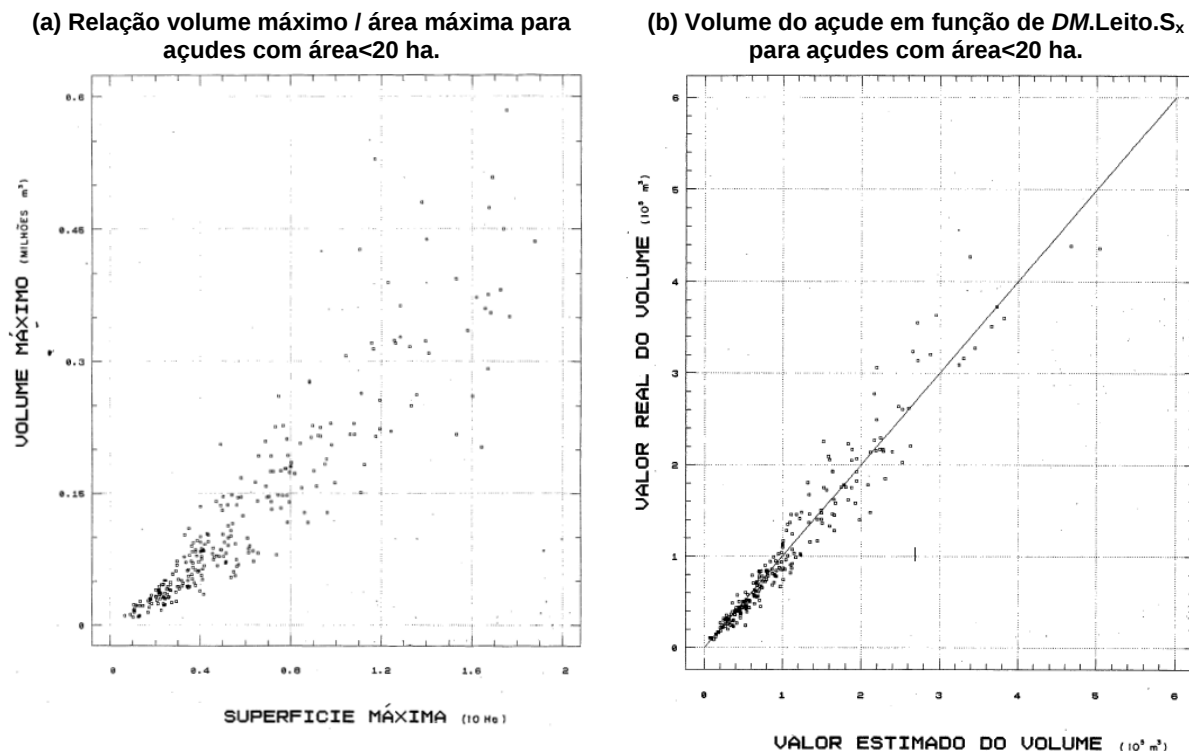
O estudo realizado por Santos *et al.* (2009) utilizou levantamento de campo e sensoriamento remoto, além de uma metodologia para estimativa de volume de açudes, como ferramentas para estimar a capacidade dos pequenos açudes localizados na bacia hidrográfica do Açude Sumé. A área de estudo está localizada no estado da Paraíba, no semiárido nordestino. Foi utilizado imagens do satélite CBERS 2B e Landsat 5 para detecção dos pequenos açudes, ambas após o fim do período chuvoso da região (mês de maio), onde não foi especificado qual a metodologia para realce dos corpos hídricos.

O autor destacou que a escolha da imagem de satélite corresponde a uma das etapas mais importantes para estimativa dos volumes, pois como a grande maioria dos açudes não possui projetos de construção, que geralmente fornecem a área e capacidade dos açudes, a única fonte prática de estimar suas áreas é através do sensoriamento remoto.

Na classificação da imagem de satélite, foi possível detectar 631 açudes na bacia de Sumé, sendo 98% das áreas dos espelhos d'água inferiores a 20 ha, indicando uma quantidade elevada de pequenos açudes na bacia (SANTOS *et al.*, 2009). Para a estimativa dos volumes dos pequenos açudes, os autores utilizam a

metodologia de Molle (1994) descrita na Equação 18, a qual necessita das informações da área do espelho d'água e da declividade do curso d'água.

Figura 7 - Relação área volume determinada por Molle (1994).



Fonte: Molle (1994).

Para validar a formulação de Molle para os pequenos açudes da bacia de Sumé, o estudo apontou que foram estudados com detalhe 23 açudes, distribuídos em diferentes bacias hidrográficas do estado da Paraíba, com área inferior a 20 ha e que possuíam volumes conhecidos. Deste modo, observaram-se aproximações de volume aceitáveis com um R^2 de 0,78. Porém, por falta de mais dados dos volumes reais de outros açudes com área inferior a 20 ha, a validade da equação apontada por Molle (1994) não pôde ser analisada com uma amostra maior de reservatórios, talvez por isso a estimativa dos volumes dos 23 açudes tenha gerado um R^2 menor que o encontrado pelo referido autor, no entanto, na bacia hidrográfica de Sumé, para os reservatórios com espelho d'água menor que 20 ha optou-se por aplicar esta formulação na estimativa dos volumes dos açudes (Santos *et al.*, 2009).

Durante a análise do volume dos açudes foi observado um alto índice de reservatórios de pequeno porte, indicando uma forte presença da pequena “açudagem” na região de estudo (Santos *et al.*, 2009). Diante dos resultados, os

autores observaram que existem relações entre características físicas da bacia que influenciam no volume dos reservatórios. Então, para obtenção de melhores estimativas dos volumes dos açudes, recomendou-se um estudo que introduza nas equações de François Molle coeficientes que possam expressar características físicas da região de estudo, tais como: relevo, geomorfologia, ordem dos riachos e abertura dos vales onde os açudes estão inseridos.

Gana é um país localizado em uma região semiárida, e como o semiárido brasileiro, apresenta uma grande quantidade de pequenos reservatórios ao longo da sua superfície. Em sua tese, Liebe (2002) procurou encontrar uma metodologia que permita estimar volumes de armazenamento de reservatórios na *Upper East Region* em Gana, em função de sua área de superfície. O conhecimento de tal função permitiu calcular volumes de reservatórios com base em dados detectados remotamente (LIEBE, 2002). O propósito do autor era determinar uma função que permitisse calcular volumes de reservatório com base em dados detectados remotamente.

Assim como destacado por Molle (1994), Liebe ressaltou que para determinar as dimensões máximas do reservatório através de dados de sensores remotos, o período de aquisição deverá ser o mais próximo possível da estação chuvosa. Assim, os reservatórios estarão próximos das suas capacidades máximas, reduzindo as perdas.

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7 (ETM+) para localizar e estimar a áreas dos espelhos d'água. A detecção e delimitação de espelhos d'água obtiveram melhores resultados utilizando as imagens das bandas espectrais visíveis e infravermelho (LIEBE, 2002). Para este fim, o autor aplicou o índice NDWI desenvolvidos por Gao (1996) e por McFeeters (1996). Para extrair os espelhos d'água da imagem, foi utilizada a classificação supervisionada Maxver. Para auxiliar na etapa de treinamento da classificação, foram geradas imagens na composição falsa cor, que auxiliou o pesquisador na identificação de corpos d'água, mitigando os possíveis ruídos.

Com as técnicas descritas em sua pesquisa, Liebe (2002) mapeou 504 reservatórios, obtendo uma área total de espelhos d'água na ordem de 3.408 ha. O pesquisador desconsiderou posteriormente os reservatórios classificados com área menor que 1 ha, e também os dois maiores reservatórios da bacia (Tono – 1.894 ha

– e Veia – 435 ha). Desta forma, foram considerados 154 reservatórios, com área variando entre 1 e 80 ha, totalizando 999,54 ha de espelhos d'água.

Em uma extensa campanha de campo, 61 reservatórios foram precisamente medidos e modelados para obter regularidades e inter-relações entre três variáveis: "área", "profundidade" e "volume" (LIEBE, 2002). Posteriormente, foram criados modelos tridimensionais para cada um destes reservatórios, com a finalidade de transferir suas propriedades geométricas em uma equação generalizada que permitisse a estimativa de volumes de armazenamento com base em áreas de superfície.

Analisando a relação área x volume (

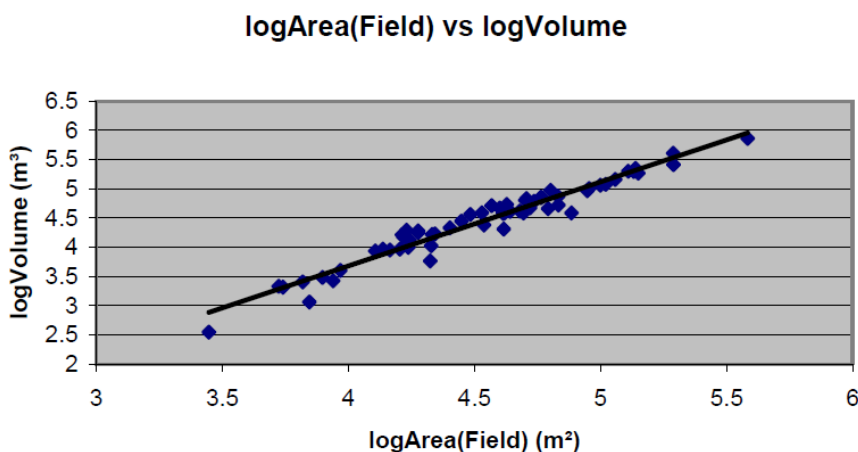
A capacidade na Equação 23 é dada em m³ e a área de superfície (espelho d'água) em m². A eficiência foi medida segundo o coeficiente de Nash-Sutcliffe, a qual teve relação entre os volumes medidos e modelados foi de 97,5%.

Figura 8), a relação encontrada por Liebe (2002) foi:

$$Volume = 0,00857 \cdot Area^{1,4367} \quad (23)$$

A capacidade na Equação 23 é dada em m³ e a área de superfície (espelho d'água) em m². A eficiência foi medida segundo o coeficiente de Nash-Sutcliffe, a qual teve relação entre os volumes medidos e modelados foi de 97,5%.

Figura 8 - Relação log(área) e log(volume) determinada por Liebe (2002).



Fonte: Liebe (2002).

Sawunyama (2005) também avaliou a relação entre capacidade de pequenos reservatórios e suas respectivas áreas do espelho d'água. Seu trabalho foi aplicado para a bacia hidrográfica do rio Limpopo, localizado em Zimbábue, e teve a metodologia semelhante àquela aplicada por Liebe (2002). Foram estudados 12 pequenos reservatórios com a finalidade de estimar suas capacidades de armazenamento em função da obtenção de suas áreas de superfície a partir de sensoriamento remoto.

De acordo com Sawunyama (2005), as áreas dos espelhos d'água e o volume do reservatório dependem de:

- Chuvas interanuais que elevam o nível da água no reservatório;
- Profundidade da barragem e profundidade do vertedouro;
- Época do ano;
- Retiradas de água;
- Redução do volume devido à evapotranspiração, infiltração e percolação;
- Idade da barragem;
- Formato do reservatório.

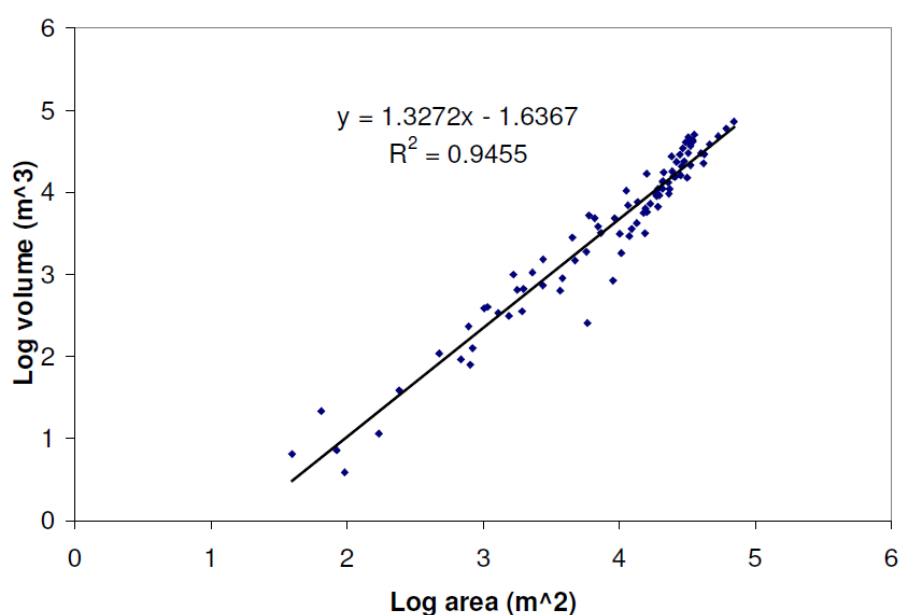
Na pesquisa de Sawunyama foram utilizadas imagens das bandas espectrais do satélite Landsat 5. Não foi mencionado pelo autor se foi aplicado algum índice de diferença normalizada, apenas que foram geradas composições colorida falsa cor para a classificação através do método supervisionado de Maxver. Para a modelagem da função volume pela área da superfície (Figura 9), foi utilizada pelo autor a forma da equação $Volume = a \cdot Area^b$, formulação semelhante à aplicada por Liebe (2002) e por Molle (1994), onde as constantes a e b são obtidas em função das características dos reservatórios. Como resultado, Sawunyama obteve a seguinte formulação:

$$Volume = 0,0231 \cdot Area^{1,3272} \quad R^2=0,9460 \quad (24)$$

O *t-test* e a análise de correlação de Pearson com intervalo de confiança de 95% indicam que as variâncias das duas áreas de superfície (área de campo e área de imagem) não são significativamente diferentes ($p < 0,05$), o que dá estimativas de volume semelhantes e é o caso porque o tempo de trabalho de campo corresponde às datas em que a imagem utilizada foi captada (SAWUNYAMA, 2005).

Portanto, para um conhecimento da hidrologia de áreas com poucas disponibilidades de dados, uma melhor percepção da distribuição de pequenas barragens torna-se essencial. A estimativa do volume desses reservatórios é possível através de métodos indiretos, como as relações entre o volume com outras características dos reservatórios (área do espelho d'água, declividade do leito, etc.), as quais foram mostradas nesta seção. Tais ferramentas devem ser utilizadas na obtenção de informações para o aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos, principalmente em áreas onde a escassez de água é recorrente.

Figura 9 - Relação log (área) e log(volume) determinada por Sawunyama (2005).



Fonte: Sawunyama (2005).

2.2 Modelagem Hidrológica

Os modelos são ferramentas desenvolvidas para representar certa realidade, permitindo se obter simulações para fabricação de dados sintéticos, os quais são utilizados para planejamento, aperfeiçoamento de um produto, prevenção de acidentes ou desastres, entre outros. Diversos modelos são produzidos em diferentes áreas de conhecimento. Por exemplo, na aviação os modelos visam simular as características da aeronave, do ambiente (geografia, condições climáticas, condições atmosféricas, etc.), reações dos pilotos, consequência de possíveis falhas e até acidentes aéreos.

Segundo Tucci (1998), o modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma fácil de acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Na temática de recursos hídricos, os modelos buscam reproduzir os fenômenos naturais complexos encontrados no ciclo hidrológico. Assim, procuram retratar os processos, como a precipitação, evaporação, infiltração e escoamento de rios, para realizar uma análise qualitativa e quantitativa dos mesmos. A diferença entre um sistema de fenômenos naturais do mencionado anteriormente é a necessidade de monitorar o seu comportamento, possibilitando prever as possíveis respostas a diferentes ações, tais como eventos extremos (cheias e secas), modificação do uso do solo, entre outros.

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (TUCCI, 1998). Há o desenvolvimento de uma grande diversidade de modelos hidrológicos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, das prioridades de representação do processo e dos objetivos a serem alcançados, sendo limitados pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos.

Logo, a aplicação de modelos hidrológicos envolve os seguintes fatores:

- Escolha do modelo;
- Seleção e análise dos dados necessários;
- Ajuste e verificação dos parâmetros hidrológicos;
- Definição do cenário de aplicação;
- Prognóstico e estimativa de incertezas dos resultados.

Esta seção irá abordar tais aspectos, apresentando alguns elementos usuais utilizados na escolha do modelo a ser aplicado neste trabalho.

2.2.1 Critérios de escolha do modelo

Um grande número de elementos necessita ser entendido na utilização de um modelo hidrológico para atender um determinado problema. Os principais aspectos são os seguintes (TUCCI, 1998):

- **Objetivos do estudo:** o objetivo para o qual o modelo é utilizado influencia na escolha do mesmo, já que modelos com muitos parâmetros podem ser

ineficientes quando o problema não exige grande detalhamento dos processos. Modelos utilizados para previsão em tempo real têm características diferentes dos utilizados para extensão de séries hidrológicas. O primeiro prioriza a determinação do nível ou vazão com rapidez e precisão, enquanto o modelo de extensão de séries deve buscar representar bem as estatísticas da série reproduzida;

- **Características da bacia e do rio:** a variabilidade das características físicas e climáticas das bacias hidrográficas é muito grande. Um mesmo modelo dificilmente atenderá as condições de todos os sistemas. Portanto, é necessário conhecer bem as vantagens e desvantagens de cada modelo e das técnicas para melhor utilizar os modelos e os algoritmos existentes;
- **Disponibilidade de dados:** os dados existentes podem inviabilizar algumas metodologias mais sofisticadas que exigem muitas informações, enquanto outras, que utilizam parâmetros relacionados com alguns indicadores, podem ser úteis para responder as questões pendentes;
- **Familiaridade com o modelo:** o melhor modelo costuma ser aquele com que o usuário tem maior sensibilidade sobre o seu uso, dentre aqueles tecnicamente aplicáveis a um problema.

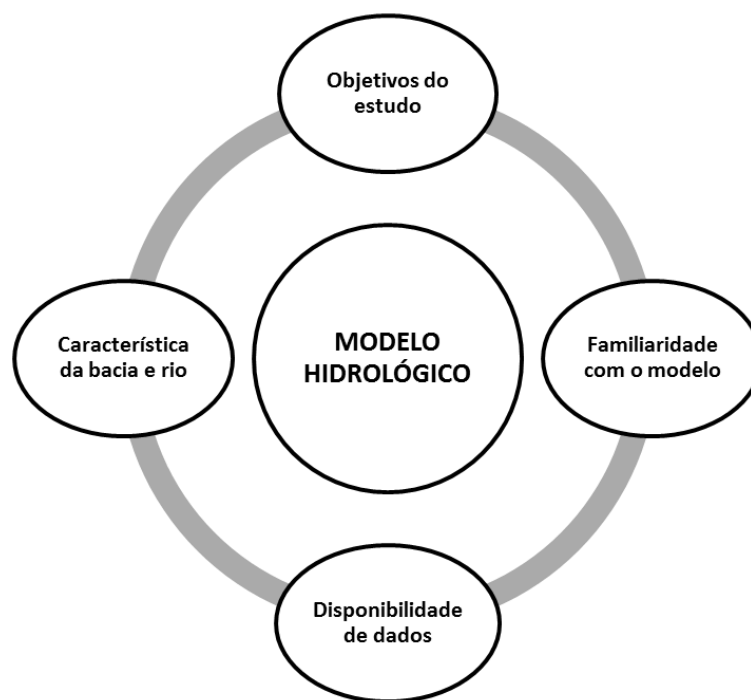
A utilização do modelo deve estar relacionada diretamente aos objetivos e metas envolvidos no estudo. É necessário ser pragmático na utilização do modelo, uma vez que este apresenta limitações em representar fielmente os processos requeridos. Além dos objetivos, a escolha do modelo deve verificar a estrutura de representação dos processos (precipitação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, etc.) e a capacidade de representá-los espacialmente. Assim, a forma de representação das características da bacia, que dependem intrinsecamente da combinação de fatores como clima, topografia, solo, geologia, cobertura vegetal, entre outros, devem ser avaliadas em cada modelo.

A quantidade e representatividade das informações para ajuste e verificação de um modelo hidrológico são fundamentais para permitir um resultado de qualidade. Tal fator é a diferença entre buscar um resultado confiável e estar somente na magnitude dos valores esperados (TUCCI, 1998). Desta forma, há um grande empirismo adotado pelas equações matemáticas introduzidas na maioria dos modelos, de forma que o melhor modelo será aquele que o usuário tiver maior

sensibilidade sobre os parâmetros e sobre o efeito dos processos no hidrograma de uma bacia.

Em síntese, os quatro elementos apresentados (Figura 10) devem fundamentar a escolha do modelo, uma vez que o atendimento dos objetivos depende essencialmente da característica da bacia, da disponibilidade de dados e do domínio do usuário do modelo e suas saídas.

Figura 10 - Aspectos relevantes na escolha do modelo hidrológico.



Fonte: O Autor, 2018.

2.2.2 Utilização de dados históricos

Os dados de entrada são a matéria-prima do modelo hidrológico. Deste modo, dados de entrada de baixa qualidade causarão resultados de baixa qualidade também. A análise dos dados torna-se, então, uma etapa obrigatória, uma vez que não se deve utilizar dados deficientes. Alguns critérios de seleção de dados devem ser adotados.

Os dados da distribuição espacial e temporal da precipitação são fundamentais para que os modelos representem o hidrograma de saída. Segundo Tucci (1998), erros na avaliação da precipitação podem produzir o seguinte: (i) hidrogramas tendenciosos e; (ii) correção de parâmetros para compensar possíveis

erros, comprometendo os prognósticos futuros. A densidade de estações pluviométricas na região de interesse é outro fator a se avaliado. Na prática, as redes pluviométricas disponíveis muitas vezes não são suficientes para representar as variabilidades temporais e espaciais, sobretudo em áreas onde há predominância de precipitação orográfica e convectiva. Assim, uma baixa densidade de dados pluviométricos pode resultar em índices sub ou superestimados.

A estimativa de precipitação média deve ser determinada, principalmente, pelo Método das Isoietas. Uma estação pluviométrica que apresente grande diferença de índices pluviométricos de outras estações próximas é um indicativo de baixa qualidade dos dados. Tal cenário é facilmente observado em um mapa de isoietas da região de estudo, identificando uma situação crítica a ser avaliada com maior detalhe. Além da avaliação das médias, uma análise de consistência de dados pluviométricos também é necessária. De acordo com Tucci (2013), o método da Dupla Massa, desenvolvido pelo *Geological Survey (USA)*, é uma prática comum adotada no Brasil, sendo válido apenas para séries mensais ou anuais.

Outra variável de entrada nos modelos hidrológicos é a evapotranspiração. Em diversos livros texto de Hidrologia, como Tucci (2013) e Collischonn e Dornelles (2015), são descritos os principais métodos de estimativa da evapotranspiração. Para o cálculo dessa variável, na maioria dos casos, são utilizados os seguintes dados: evaporímetro de Piché, evaporação de tanque classe A ou medidas de variáveis climáticas que permitem o cálculo da evapotranspiração potencial.

Os dados pluviométricos são de extrema importância nos modelos hidrológicos, pela razão de serem utilizados na verificação dos parâmetros do modelo. Logo, se houver tendenciosidade nestas informações as mesmas serão transferidas às saídas do modelo. O intervalo de tempo entre os dados de vazão deve ser escolhido de acordo com o objetivo do modelo, porém dependem das informações disponíveis. Quanto menor este intervalo, maior a precisão e também maior a quantidade de dados manipulados, que muitas vezes é desnecessário. Por outro lado, à medida que aumenta o intervalo de tempo, muita informação pode ser perdida, o que pode levar a resultados inadequados.

O intervalo de tempo é escolhido em função da variabilidade da precipitação e do tempo de resposta da bacia, representado pelo tempo de pico ou tempo de concentração (TUCCI, 1998). Para modelos que desejam simular eventos chuvosos

com variabilidade de precipitação intensa é necessário observar se os dados estão adequadamente discretizados. Segundo Tucci (1998), o critério mais utilizado para discretização de eventos chuvosos é o tempo de pico, onde o intervalo de tempo deve ser pelo menos $1/3$ do tempo de pico. Quando o interesse da modelagem é obter séries contínuas de volumes de escoamento, o intervalo de tempo pode ser maior, de forma que o modelo tem por finalidade representar bem a continuidade do volume. Porém, os parâmetros obtidos dependem do intervalo de tempo adotado, não podendo ser extrapolados sem uma análise detalhada.

2.2.3 Ajuste e verificação dos parâmetros hidrológicos

Os modelos hidrológicos são alimentados por dados físicos da bacia, que irão caracterizar sua drenagem, tipo de solo e subsolo, cobertura, características hidráulicas dos leitos dos rios, entre outros. Além destas, também são definidas variáveis de entrada intermediária e de saída. De acordo com Tucci (1998), os resultados dos modelos com limitados dados hidrológicos ainda apresentam grandes erros no prognóstico devido a: (i) empirismo dos parâmetros dos modelos conceituais; (ii) falta de representatividade de medidas pontuais frente ao comportamento espacial dos parâmetros do modelo; (iii) forte interdependência dos processos na bacia e; (iv) a incerteza dos parâmetros.

A representatividade da série de dados é importante para que a estimativa dos parâmetros hidrológicos seja confiável, uma vez que a extrapolação pode levar a resultados tendenciosos. No ajuste de séries contínuas é essencial que existam períodos secos e chuvosos para que os parâmetros sejam ajustados e verificados em ambas as condições. Logo, a confiabilidade dos dados de entrada é um elemento fundamental para que os parâmetros estimados não sejam tendenciosos, produzindo prognósticos impróprios da região de estudo.

Além das características das bacias, os modelos hidrológicos são influenciados também por outras condições que influenciam a vazão. O evento escolhido influencia diretamente no ajuste dos parâmetros do modelo. Os parâmetros são influenciados pelas condições iniciais (perdas iniciais, umidade inicial, etc.), onde a variabilidade destas condições retrata diferentes condições dos parâmetros. Os processos espaciais (precipitação, evapotranspiração, entre outros) e a variabilidade natural do parâmetro são outros fatores que influenciam

diretamente no ajuste do modelo. Portanto, é recomendado que os parâmetros sejam ajustados para um evento e verificado com outro(s), na qual deverá ser definido um conjunto que melhor represente as duas ou mais situações.

No geral, o modelo poderá ser utilizado para duas situações (TUCCI, 1998): simulação de eventos curtos ou para séries contínuas no tempo. Para a primeira opção, o ajuste é realizado com o objetivo de retratar apenas os períodos específicos (enchentes ou estiagens) de um determinado local, no qual o modelo e o ajuste não têm compromisso com outras condições da região de interesse. Deste modo, a análise realizada é, em geral, pragmática, voltada para retratar o evento selecionado e os parâmetros mais sensíveis são ajustados. Os trabalhos desenvolvidos por Silva *et al.* (2008) e Ribeiro Neto *et al.* (2015) são exemplos de aplicação de modelos hidrológicos com simulações de eventos curtos.

O ajuste em séries contínuas envolve a verificação das condições de períodos com grande variabilidade de escoamento. De acordo com Tucci (1998), nem sempre os modelos conseguem apresentar bem todo o período ou sua variabilidade, onde o ajuste dos parâmetros deve buscar uma representação adequada relacionada com a finalidade da saída do modelo. Como exemplo de aplicação de modelos em séries contínuas, pode-se citar as pesquisas de Collischonn (2001) e Felix e Paz (2016).

Os modelos tradicionais de determinação de parâmetros dos modelos são os seguintes (TUCCI, 1998):

- **Medida direta:** envolve a obtenção de valores, como área de drenagem, comprimento e características da seção do rio, que podem ser medidas diretamente em campo, mapas ou outro meio;
- **Amostragem:** quando a medida é uma amostra representativa do comportamento do parâmetro, ou seja, um parâmetro medido diretamente em um local que pode ser utilizado como amostra de um sistema;
- **Tentativa e erro:** com base em dados observados das variáveis de entrada e saída os parâmetros são obtidos, onde dependerá da experiência do usuário, e havendo a necessidade de verificação por funções hidrológicas (curva de permanência, curva de probabilidade de vazões mínimas, etc.).
- **Otimização:** aplicação de técnicas de otimizações, as quais utilizam função objetivo implícita que são alteradas de acordo com os critérios nelas embutidos.

Os dois últimos métodos são os mais usuais na modelagem hidrológica. O método de tentativa e erro envolve um grau significativo de subjetividade no ajuste dos parâmetros, dependendo principalmente da familiaridade do usuário com o modelo associado à experiência deste com a relação aos aspectos hidrológicos e de modelagem. De acordo com Tucci (1998), as principais vantagens deste procedimento são: (i) o usuário pode transferir para a simulação o conhecimento que tem da bacia, suas características e comportamento; (ii) permite a identificação de erros grosseiros e detalhados à medida que o usuário examina repetidas vezes as saídas e entradas do modelo e; (iii) melhor entendimento por parte do usuário de todos os processos. Por outro lado, este procedimento tem como desvantagens: (i) elevado custo de operacionalização do processo, uma vez que envolve uma maior quantidade de tempo de profissionais qualificados e; (ii) ocorre uma subjetividade do ajuste.

O processo de otimização é utilizado para ajuste em modelos de diversas áreas, assim como nos modelos hidrológicos. Tal processo elimina as desvantagens do método de tentativa e erro. Porém, pode apresentar diversos problemas, como (TUCCI, 1998): (i) interdependência entre os parâmetros dos modelos; (ii) descontinuidade das funções objetivas; (iii) vários ótimos locais e; (iv) descontinuidade dos algoritmos dos modelos. Deste modo, os problemas apresentados dificultam a obtenção de um conjunto único de parâmetros para o ajuste do modelo a uma bacia hidrográfica. O modelo também pode apresentar resultados fisicamente incompatíveis apesar de otimizar a função objetivo. Portanto, as técnicas de otimização utilizadas devem minimizar estes problemas.

Durante o processo de ajuste dos parâmetros hidrológicos, algumas estatísticas ou funções objetivas são aplicadas para avaliar os ajustes adotados. As principais são:

$$\text{Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS):} \quad NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n \{Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)\}^2}{\sum_{t=1}^n \{Q_{obs}(t) - Q_m\}^2} \quad (25)$$

$$\text{Diferença de Volumes (\Delta V):} \quad \Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n Q_{obs}(t) - \sum_{t=1}^n Q_{cal}(t)}{\sum_{t=1}^n Q_{obs}(t)} 100 \quad (26)$$

onde $Q_{obs}(t)$ e $Q_{cal}(t)$ são vazões observadas e calculadas pelo modelo no tempo t e Q_m é a vazão média do período.

A avaliação da aplicação destas funções estatísticas para modelos hidrológicos devem ser consideradas. Gottschalk e Motovilov (2000) avaliaram os resultados do coeficiente de Nash-Sutcliffe, hierarquizando o grau de aceitação em três grupos: bom, aceitável e não aceitável. Moriasi *et al.* (2007) em seu trabalho avaliaram a performance do Nash-Sutcliffe e da Diferença de Volumes. O grau de aceitação dos autores é apresentado na Tabela 1 para o coeficiente de Nash-Sutcliffe e na Tabela 2 para a Diferença de Volumes.

Em seu trabalho, Moriasi *et al.* (2007) destacaram que os limites aceitáveis dos critérios de avaliação da calibração de modelos hidrológicos devem ser menos exigentes para simulações com passo de tempo diário.

Tabela 1 - Grau de aceitação do coeficiente Nash-Sutcliffe segundo Moriasi *et al.* (2007) e Gottschalk e Motovilov (2000).

Moriasi <i>et al.</i> (2007)		Gottschalk e Motovilov (2000)	
Grau de aceitação	Valor NS	Grau de aceitação	Valor NS
Muito bom	$0,75 < NS \leq 1,00$	Bom	$NS > 0,75$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	Aceitável	$0,36 < NS \leq 0,75$
Satisfatório	$0,50 < NS \leq 0,65$	Não aceitável	$NS < 0,36$
Não satisfatório	$NS \leq 0,50$		

Fonte: Adaptado de Gottschalk e Motovilov (2000) e Moriasi *et al.* (2007).

Tabela 2 - Grau de aceitação da Diferença de Volumes segundo Moriasi *et al.* (2007).

Grau de aceitação	Valor ΔV
Muito bom	$\Delta V < \pm 10\%$
Bom	$\pm 10\% \leq \Delta V < \pm 15\%$
Satisfatório	$\pm 15\% \leq \Delta V < \pm 25\%$
Não satisfatório	$\Delta V \geq \pm 25\%$

Fonte: Adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

2.2.4 Incerteza dos resultados da modelagem

Segundo Tucci (1998), na análise dos resultados de um modelo as principais incertezas envolvidas são:

- Variações aleatórias e erros de aquisição das variáveis de entrada e de saída (utilizada para ajuste);
- Limitações da estrutura dos modelos para representar o sistema;
- Incertezas nas estimativas dos parâmetros.

Geralmente, os modelos hidrológicos adotam homogeneidade temporal, ocorrendo dentro de cada intervalo de tempo, e espacial, ocorrendo na sub-bacia ou no módulo de discretização. As incertezas associadas às variáveis de entrada do modelo envolvem a variabilidade natural e os erros de medição das mesmas. Para a precipitação é necessário um maior número de estações de observação e registro temporal ao longo do dia, devido esta apresentar gradientes temporais e espaciais significativos. A evapotranspiração potencial apresenta incertezas devido à limitação nas equações e na obtenção de dados. As limitações nas equações ocorrem pelas limitações das próprias equações e devido à reduzida disponibilidade de dados, pela razão que é reduzido o número de estações que contenham todas as variáveis necessárias.

Segundo relatado por Melching *et al.* (1990), as incertezas na precipitação são abordadas segundo dois critérios:

- **Método da perturbação:** admite-se conhecida uma determinada precipitação e são introduzidos erros para verificar o impacto na vazão de saída;
- **Método da rede densa:** estima-se a precipitação por uma rede densa e depois são retirados estações e verificados os erros de estimativa a partir de malhas grosseiras.

As incertezas relacionadas às incertezas de estrutura do modelo se devem às características das formulações introduzidas e sua capacidade de representar os processos envolvidos. Logo, para inserir a avaliação de incerteza sobre a estrutura do modelo é necessário desenvolver as equações dentro do conceito estatístico das variáveis e parâmetros das equações diferenciais. Tal análise tem sido introduzida principalmente no equacionamento do escoamento em meio não saturado devido a grande variabilidade de parâmetros no tempo e no espaço com a sua estrutura (TUCCI, 1998).

No que se refere às incertezas aos parâmetros, estas ocorrem devido a vários fatores, entre os quais: (i) limitações nas estruturas dos modelos; (ii) procedimentos inadequados na estimativa do parâmetro e; (iii) ausência de dados históricos ou físicos da região de interesse. O primeiro caso já foi discutido anteriormente. O segundo envolve aspectos como grande número de parâmetros, procedimentos de verificação dos parâmetros e falta de experiência do usuário do modelo. Já o último

aspecto se refere ao desconhecimento do comportamento da bacia hidrográfica frente à estrutura do modelo.

Na avaliação dos erros dos modelos hidrológicos, pode-se observar que devido às características temporais da simulação e dos dados envolvidos pode-se encontrar correlação serial entre os erros e o prognóstico (TUCCI, 1998). Segundo o mesmo autor, é necessário verificar: (i) causas da correlação obtida; (ii) quando as mesmas são estruturais, ou seja, quando o modelo for tendencioso ele deve ser revisto e; (iii) quando são amostrais, devido a incertezas dos dados, a informação deve ser melhorada ou período abandonado. A maioria dos procedimentos relatados pode levar a resultados subjetivos, o que eleva as incertezas. Quanto mais próximos dos valores reais estiverem os estimados, menores serão as incertezas.

Diante do exposto, fica evidente que os pontos levantados devem ser analisados no desenvolvimento da modelagem hidrológica, no qual cada temática abordada nessa seção foi fundamental para o melhor desempenho e resultado dessa pesquisa. Assim, a metodologia aplicada foi fundamentada pelos aspectos apontados nesta seção. Esta será detalhada no capítulo seguinte.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada com a aplicação dos métodos e ferramentas descritas neste capítulo. Os procedimentos adotados foram absorvidos através da análise de trabalhos científicos, os quais foram aprimorados e consolidados ao longo das fases de desenvolvimento da pesquisa. Logo, a sequência da técnica dissertada expõe os processos de forma coesa, evidenciando ordem cronológica destas.

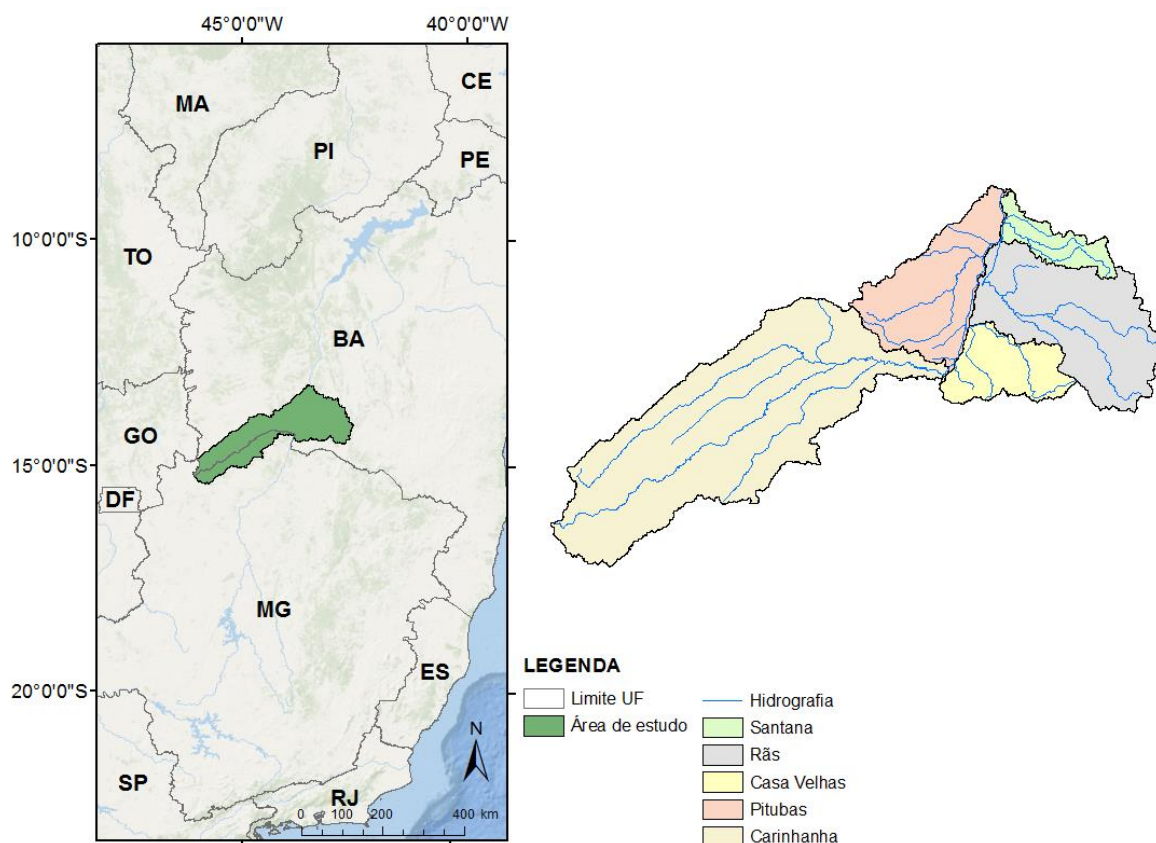
3.1 Área de estudo

A área de estudo desta pesquisa compreende 5 bacias hidrográficas, as quais são afluentes do rio São Francisco, e foram denominadas como: bacia hidrográfica do rio Carinhanha, bacia hidrográfica do rio Casa Velha, bacia hidrográfica do rio das Rãs, bacia hidrográfica do riacho Santana e bacia hidrográfica do riacho das Pitubas. Tal área engloba a região noroeste mineira e o sudoeste Baiano (Figura 11), tendo uma extensão de 34.467 km² e localizada entre as coordenadas 13°11'53"S e 15°30'10"S de latitude e 46° 8'4"O e 42°20'35"O de longitude, que inclui o Alto e o Médio São Francisco. Ao todo, 28 municípios fazem parte desta área, com uma população estimada para o ano de 2017 em 600 mil habitantes, segundo dados de IBGE (2018).

Tal área de estudo está inserida pelo Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF, 2016) em 3 sub-bacias. Assim, a bacia Casa Velha, bacia das Rãs e bacia Santana compreendem a sub-bacia 32, denominada sub-bacia Paramirim/Santo Onofre/Carnaíba de Dentro, enquanto a bacia Pitubas abrange a sub-bacia 6, denominada bacia Corrente e a bacia Carinhanha envolve a sub-bacia 30, que tem o mesmo nome.

A bacia do rio Carinhanha está localizada na região fisiográfica do Alto São Francisco. Possui área de 16.856 km² (correspondente a 7,8% da bacia do rio São Francisco) e o comprimento de sua rede de drenagem é de 2.643 km (CBHSF, 2016). Nasce no Parque Nacional Grande Sertão Veredas, na divisa entre os estados de Minas Gerais e Bahia e tem sua foz na bacia do Rio São Francisco, no município de Carinhanha – BA.

Figura 11 - Localização da área de estudo.



Fonte: O Autor, 2018.

De acordo com CBHSF (2016), ao longo do ano, os meses com precipitações mais elevadas vão de novembro a março, variando de 800 a 1.000 m^3/s (1961-2014), sendo o trimestre mais chuvoso de novembro a janeiro, onde concentra 60% do total das chuvas. Essa região não apresenta risco de suscetibilidade à desertificação e o clima predominante é o Aw, segundo a classificação de Köppen, descrito como quente úmido com chuvas de verão. Foi estimada no PRH-SF 2016-2025 (CBHSF, 2016) a disponibilidade hídrica superficial da bacia do Rio Carinhanha, no período de 1931-2013, que apresentou vazão média de 146,5 m^3/s , vazão de permanência Q_{95} de 85,4 m^3/s .

A bacia Carinhanha está estabelecida sobre o sistema aquífero Urucuia que tem um potencial de produtividade de água elevado e suas taxas de recarga são conhecidas de forma segura. A disponibilidade de água subterrânea para a bacia é de 107 m^3/s em reservas reguladoras e 21,43 m^3/s de reservas exploráveis (20% das fontes renováveis). O índice de Qualidade de água – IQA mais atual (2008-2014) é considerado bom e não há informações para o índice de Contaminação por Tóxicos

(CBHSF, 2016). Comparando a disponibilidade hídrica baseada na Q_{95} com a demanda de água para usos consuntivos, a bacia do rio Carinhanha apresentou uma situação considerada confortável, no entanto comparando com estudos realizados no PRH-SF 2004-2013, sugere que a situação vem piorando.

A sub-bacia 32 do Rio São Francisco, com base na última classificação do CBHSF (2016), fica localizada no Médio São Francisco, abrange uma área de, aproximadamente, 48.151 km² (corresponde a 7,5% da bacia do rio São Francisco) com 9.154 km de comprimento da rede de drenagem. A área utilizada para esse estudo, dentro da sub-bacia 32, compreende o trecho cercado pelo Rio Casa Velha e Riacho Santana. Os principais rios que compõem o trecho estudado são: Rio Casa Velha, Rio das Rãs, Rio Carnaíba de Fora e o Riacho Santana, e a bacia possui uma vazão média de 34,5 m³/s e uma vazão de permanência Q_{95} nula.

O clima dessa região, segundo a classificação de Köppen, é o Aw – tropical com duas estações bem definidas: uma seca e outra chuvosa, tendo como precipitação média entre 500 mm/ano e 1.000 mm/ano, média de temperatura máxima de 31°C e uma temperatura mínima variando entre 18°C e 19°C.

A bacia hidrográfica do riacho Pitubas foi inserida por CBHSF (2016) como integrante da sub-bacia 6 do rio São Francisco. Esta sub-bacia tem extensão de 47.265 km² e uma rede de drenagem com comprimento de 6.911 km, ficando localizada no Médio São Francisco. A sub-bacia obteve uma vazão média de 221,8 m³/s e uma vazão de permanência Q_{95} de 136,1 m³/s (CBHSF, 2016). Ainda segundo a classificação de Köppen, o clima da região também é o Aw – tropical e tem uma precipitação média entre 700 mm/ano e 1.400 mm/ano e sua temperatura anual varia entre 19°C e 32°C.

3.2 Aquisição e pré-processamento de imagens

Com a finalidade de identificar os pequenos reservatórios na área de estudo, a obtenção das imagens de satélite e o pré-processamento das imagens são as primeiras etapas do projeto. As características do satélite, resolução das imagens e técnicas utilizadas nesse processo são imprescindíveis para o êxito desta pesquisa. A abordagem destes pontos são apresentadas na sequência.

3.2.1 Escolha e obtenção das imagens de satélite

De acordo com Sawunyama (2005), imagens de satélites podem ser utilizadas para avaliar as mudanças de níveis de água de pequenos reservatórios ao longo do ano. Desta forma, é possível estimar a capacidade armazenamento máxima destes corpos hídricos. Para a aquisição de imagens para aplicação neste trabalho, foram analisados diversos satélites e seus produtos. Como critério de escolha, foram avaliados os seguintes pontos:

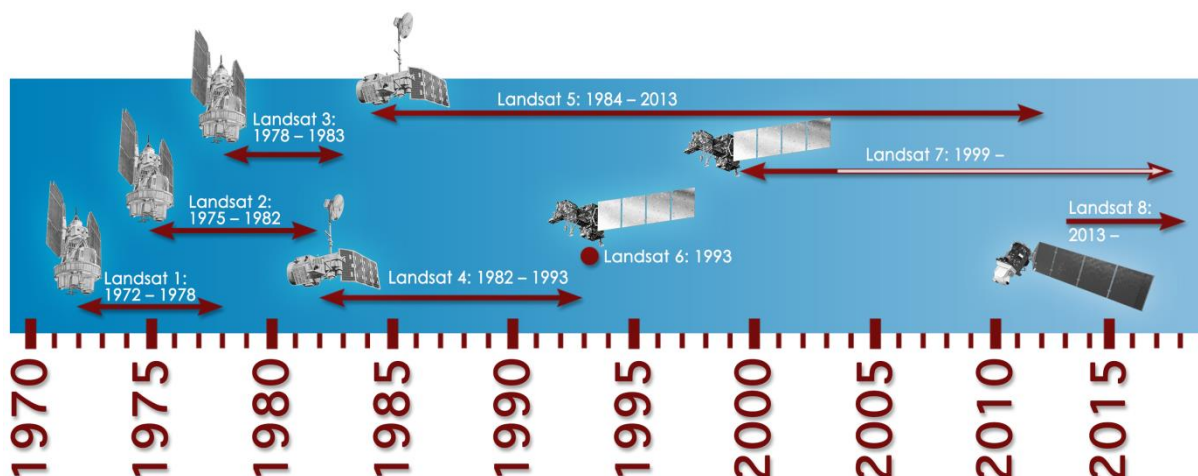
- Resolução espacial das imagens;
- Utilização das imagens dos satélites em outros trabalhos semelhantes.

A resolução espacial foi importante para permitir a identificação de reservatórios com espelhos d'água menores que 5 ha, ou seja, identificar reservatórios além dos apontados pelo Mapeamento dos espelhos d'água do Brasil (FUNCEME, 2008). A utilização das imagens em trabalhos semelhantes comprova a eficácia deste produto para atingir os objetivos do trabalho, de maneira que o conhecimento adquirido por outros pesquisadores permitissem auxiliar e colaborar no desenvolvimento das atividades desta pesquisa.

Conforme relatado por Liebe (2002), as imagens Landsat são utilizadas para detectar corpos d'água desde que as primeiras imagens foram disponibilizadas na década de 1970. Liebe (2002) e Sawanyama (2005) utilizaram as imagens do satélite Landsat 7 (ETM+) para identificarem e estimarem a área do espelho d'água e volume de pequenos reservatórios em Gana e Zimbábue, respectivamente. Ji, Zhang e Wylie (2009) também aplicou os índice de NDWI a partir de imagens do mesmo satélite e encontraram bons resultados. Já os autores Pacheco e Santos (2014) e Rocha e Candeias (2015) aplicaram seus métodos para identificar corpos hídricos em imagens do satélite Landsat 8.

Diante destas experiências e da resolução das imagens, foram escolhidas as imagens do satélite Landsat 8. Este satélite foi lançado em 11 de fevereiro de 2013 e atingiu a sua órbita operacional em 10 de abril de 2013, é integrante do Programa Landsat, que desde o ano de 1972 adquire imagens de satélite para captar informações sobre os recursos naturais terrestres. Até o momento, foram lançados ao todo 8 satélites pelo programa, cuja operação de cada satélite pode ser conferida na Figura 12. Nesta, é possível observar que em diversos momentos ocorreu uma operação concomitante de satélites.

Figura 12 - Linha do tempo da operação dos satélites do Programa Landsat.



Fonte: USGS (2017a).

O Landsat 8 é equipado com dois sensores para levantamento de dados: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). As bandas espectrais do sensor OLI proporcionam aprimoramento de instrumentos Landsat anteriores, com a adição de duas bandas espectrais adicionais: um canal visível azul profundo (banda 1), projetado especificamente para recursos hídricos e investigação de zonas costeiras; e um novo canal infravermelho de ondas curtas (banda 9) para a detecção de nuvens cirros (USGS, 2018). Já o instrumento TIRS coleta duas bandas espectrais para o comprimento de onda coberto por uma única banda nos sensores anteriores TM e ETM+.

Esses sensores fornecem desempenho radiométrico de sinal-ruído (SNR) melhorado, quantificado em uma faixa dinâmica de 12 bits, o que indica que traduz em 4.096 níveis de cinza em potencial em uma imagem em comparação com apenas 256 níveis de cinza em instrumentos de 8 bits anteriores) O desempenho melhorado do sinal para ruído permite uma melhor caracterização do estado e condição da cobertura da terra. Os produtos são entregues como imagens de 16 bits (dimensionados para 55.000 níveis de cinza).

As 9 bandas espectrais do Landsat 8 tem resolução espacial de 30 metros para as bandas 1 a 7 e para a banda 9. A resolução para a banda 8 (pancromática) é de 15 metros. As cenas têm tamanhos aproximados de 170 km na direção norte-sul por 183 km na direção leste-oeste (BARSÍ *et al.*, 2014). As características de cada banda podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características das bandas espectrais do Landsat 8.

Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (metros)
Banda 1 - Azul profundo	0,435 - 0,451	30
Banda 2 - Azul	0,452 - 0,512	30
Banda 3 - Verde	0,533 - 0,590	30
Banda 4 - Vermelho	0,636 - 0,673	30
Banda 5 - Infravermelho próximo (NIR)	0,851 - 0,879	30
Banda 6 - Infravermelho de onda curta (SWIR) 1	1,566 - 1,651	30
Banda 7 - Infravermelho de onda curta (SWIR) 2	2,107 - 2,294	30
Banda 8 - Pancromática	0,503 - 0,676	15
Banda 9 - Cirrus	1,363 - 1,384	30
Banda 10 - Infravermelho termal (TIRS) 1	10,60 - 11,19	100* (30)
Banda 11 - Infravermelho termal (TIRS) 2	11,50 - 12,51	100* (30)

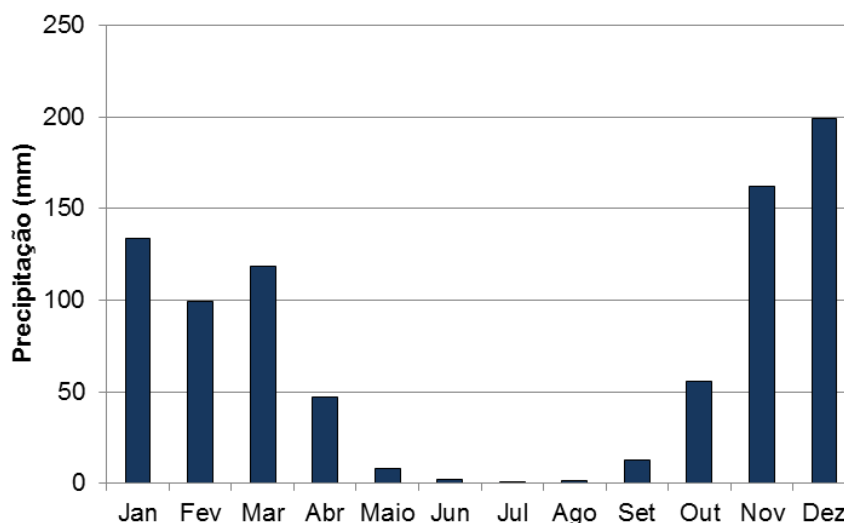
*As bandas TIRS são adquiridas com resolução de 100 metros, mas são reamostradas para 30 metros no produto de dados entregues.

Fonte: USGS (2017b).

Uma estimativa global dos volumes armazenados em reservatórios a partir da superfície do espelho d'água é dependente da época na qual o procedimento é realizado. De acordo com Molle (1994), uma avaliação do volume total somente será possível logo depois de uma estação chuvosa muito abundante. Tal fato já foi relatado anteriormente neste trabalho. Observando o hietograma da média de longo termo entre 1986 e 2016 (Figura 13) a partir de 16 estações pluviométricas, observa-se que o período chuvoso ocorre de novembro a março, sendo dezembro o mês mais chuvoso. Deste modo, a obtenção de imagens de satélite deveria ocorrer a partir do mês de abril.

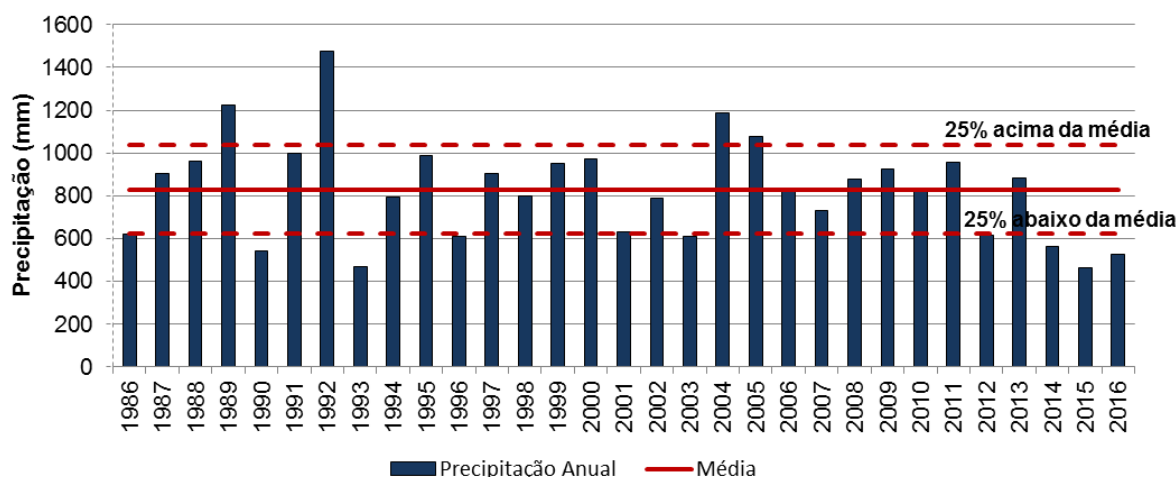
Foi analisada também a média anual de pluviometria das estações da região, durante o mesmo período relatado, calculada pelo método de Thiessen. Os valores indicam uma tendência de redução da precipitação na região hidrográfica durante o período analisado. Apenas os anos de 1989, 1992, 2004 e 2005 apresentaram uma precipitação anual maior que 25% acima da média. Então, a princípio teria que serem utilizadas imagem do ano de 2005 para estimativas dos volumes de pequenos reservatórios, as quais induziriam resultados obsoletos.

Figura 13 - Média de longo termo mensal da pluviometria da região de estudo (1986-2016).



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 14 - Precipitação anual na região de estudo (1986-2016).



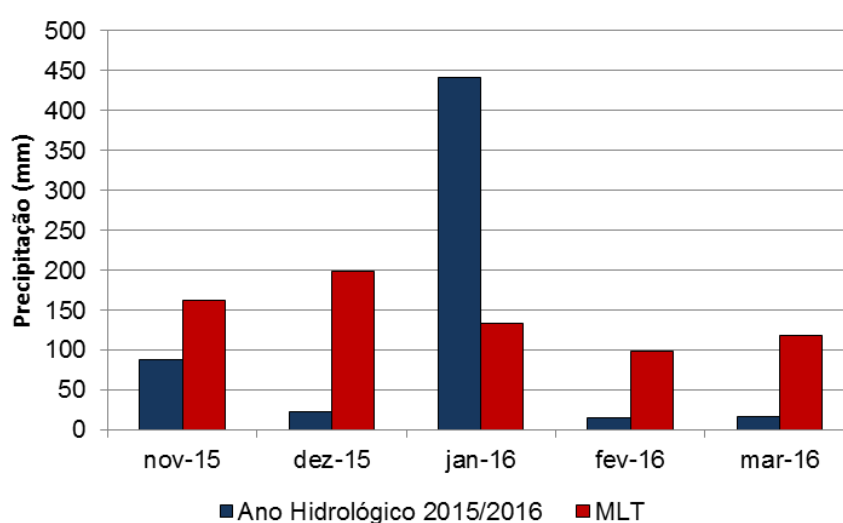
Fonte: O Autor, 2018.

Porém, foi observado que em janeiro de 2016 o índice pluviométrico da região foi 3 vezes maior que a média de longo termo (MLT), exibido na Figura 15. Provavelmente, esta elevada precipitação no mês de janeiro deve ter causado o armazenamento máximo dos pequenos reservatórios da região, possibilitando a utilização de imagens a partir de abril de 2016.

As imagens de Landsat 8 para o período determinado foram adquiridas de forma gratuita no portal do INPE (<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>). A Figura 16 exibe os parâmetros utilizados na pesquisa das imagens, onde é possível observar que foram buscadas imagens entre os meses de abril e junho de 2016.

Como relatado por Santos *et al.* (2009), foi priorizada a escolha de imagens com a menor quantidade de nuvens e que tivessem sido captadas pelos satélites durante ou logo após o período chuvoso na região. Assim, foi diagnosticado que a área de estudo se encontrava entre 6 quadrantes de imagens, entre as órbitas 218 e 220 e entre os pontos 069 e 070. As datas das imagens obtidas ficaram entre os dias 18/04/2016 e 27/05/2016, como pode ser observado na Tabela 4. Para tais, foram adquiridas as bandas espectrais 2 (azul), 3 (verde), 4 (vermelho), 5 (NIR) e 6 (SWIR 1).

Figura 15 - Regime pluviométrico do ano hidrológico 2015-2016.



Fonte: O Autor, 2018.

Deste modo, foi feita a aquisição das imagens das bandas espectrais utilizadas nesta pesquisa. Antes de fazer a operação com estas imagens foi necessário realizar o pré-processamento, temática abordado na sequência.

Figura 16 - Parâmetros para pesquisa das imagens.

The image shows a web interface for searching satellite images. It is divided into two main sections: 'Parâmetros Básicos' (Basic Parameters) and 'Região' (Region).

Parâmetros Básicos:

- Filtros:** 'Aprovadas' (Approved) is checked, and 'Rejeitadas' (Rejected) is unchecked.
- Satélite:** A dropdown menu showing 'LandSat-8'.
- Instrumento:** A dropdown menu showing 'OLI'.
- Data início:** A date picker showing '01/04/2016'.
- Data fim:** A date picker showing '30/06/2016'.
- % Cobertura Máxima:** A slider ranging from 0 to 100, currently set at 100.
- Qualidade Mínima:** A slider ranging from 0 to 10, currently set at 10.
- Buttons:** 'Reiniciar Valores' (Reset Values) and 'Pesquisar Imagens' (Search Images).

Região:

- Four input fields for coordinates: -12.69, -42.411, -15.504, and -46.37.
- Buttons: 'Reiniciar Valores' (Reset Values) and 'Pesquisar Imagens' (Search Images).

Fonte: INPE (2017).

Tabela 4 - Dados das imagens adquiridas do satélite Landsat 8.

Satélite	Instrumento	Órbita / Ponto	Data	% Nuvens	Qualidade
Landsat 8	OLI	219/070	2016-04-18	0,04	9
Landsat 8	OLI	218/070	2016-05-13	0,01	9
Landsat 8	OLI	218/069	2016-05-13	0,49	9
Landsat 8	OLI	219/069	2016-05-20	0,00	9
Landsat 8	OLI	220/069	2016-05-27	0,00	9
Landsat 8	OLI	220/070	2016-05-27	0,00	9

Fonte: O Autor, 2018.

3.2.2 Pré-processamento das imagens

O pré-processamento das imagens foi efetuado com a finalidade de aumentar a qualidade de informações que podem ser consultadas em comparação com a imagem original. Assim, foram realizadas análise no que se refere à presença de nuvens nas imagens e da diferença radiométrica das imagens.

A análise de presença de nuvens se fez necessária para avaliar o grau de impacto que este ruído poderia causar nos resultados, o qual poderia ser relevante ou não para a pesquisa. Conforme exibido na Tabela 4, não foi possível obter imagens sem a presença de nuvens em todas as imagens, apesar daqueles que tiveram a presença de nuvem apresentaram um percentual relativamente baixo. A avaliação realizada foi identificar as nuvens nas imagens e examinar visualmente por

imagens de satélite de outro período de tempo se havia a presença de corpos d'água sobpostos pelas nuvens. As imagens utilizadas estão listadas na Tabela 5.

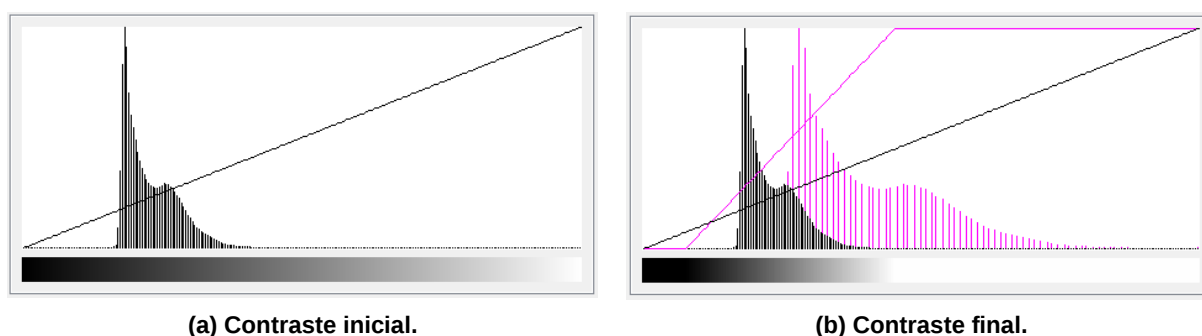
Tabela 5 - Dados das imagens adquiridas do satélite Landsat 8 para avaliar o impactos das nuvens.

Satélite	Instrumento	Órbita / Ponto	Data	% Núvens	Qualidade
Landsat 8	OLI	219/070	2016-07-07	0,00	9
Landsat 8	OLI	218/070	2016-07-16	0,00	9
Landsat 8	OLI	218/069	2016-07-16	0,01	9

Fonte: O Autor, 2018.

Posteriormente, foi realizada a avaliação das diferenças radiométricas da imagem, com a finalidade de aumentar a qualidade das imagens e, conseqüentemente, permitir uma melhor discriminação os elementos nela presentes. Foram aplicadas as técnicas de realce da imagem através da ampliação linear do contraste, utilizando o *software* SPRING 5.5.1². A Figura 17 dispõe de um exemplo da aplicação desta ferramenta.

Figura 17 - Exemplo da ampliação linear do contraste.



Fonte: Adaptado do *software* Spring 5.5.1.

Com esta etapa do processamento de imagens concluída, foi possível realizar os demais processos com as imagens das bandas espectrais, os quais são detalhados na seção seguinte.

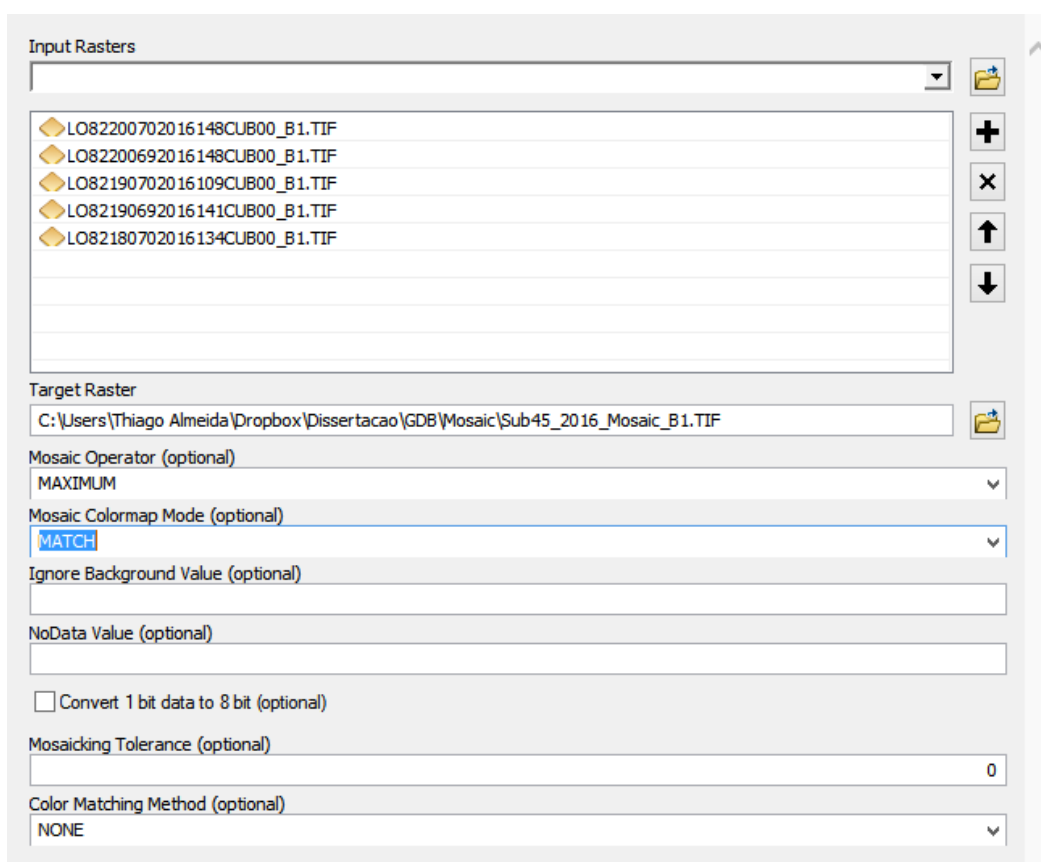
3.2.3 Composição do mosaico e aplicação do recorte

Ao todo, foram utilizadas seis imagens para cada banda espectral. Para a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto é necessário que cada banda

² O **SPRING** é um SIG (Sistema de Informações Geográficas) desenvolvido pelo INPE/DPI que apresenta funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais. É um *software* gratuito.

espectral seja composta com uma única imagem. Assim, há a necessidade de realizar o mosaico das imagens das respectivas bandas. Este processo foi realizado no *software* ArcMap 10.2.2³, através dos seguintes comandos: *ArcToolBox / Data Management Tools / Raster / Raster Dataset / Mosaic*. São então inseridas as imagens que compõe o mosaico, com exceção de uma, que deverá ser o arquivo que receberá as demais imagens, como pode ser observado na Figura 18. Ao final do processo, foram obtidas um arquivo de imagem (.TIFF) para cada banda espectral trabalhada.

Figura 18 - Processo de mosaico de imagens.



Fonte: Adaptado do *software* ArcMap 10.2.2.

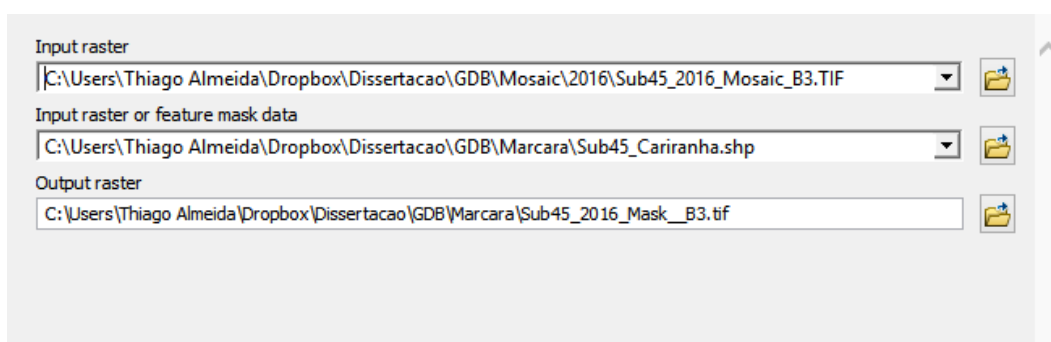
O processo de máscara é utilizado quando a imagem (ou conjunto de imagem) é maior do que a área de estudo. Este é o caso deste estudo. Foi preciso aplicar uma máscara para extrair uma imagem com “recorte” da área de interesse. Os limites da área de estudo foram extraídos na modelagem geoespacial. Novamente foi utilizado o *software* ArcMap 10.2.2 para aplicação desta ferramenta,

³ A licença de utilização do ArcMap 10.2.2 está vinculada à TPF Engenharia, na qual o autor do trabalho é colaborador.

a partir dos comandos: *ArcToolBox / Spatial Analyst Tools / Extraction / Extract by Mask*. Nesta ferramenta é adicionado o arquivo de origem (arquivo mosaico), a máscara a ser aplicada (contorno da região hidrográfica) e a escolha do nome, formato e origem do arquivo de saída. A Figura 19 exibe o emprego da ferramenta.

Os processos apresentados nesta seção 3.2 são as atividades iniciais deste trabalho. Após os processos explicados nesta seção, será possível aplicar as técnicas de sensoriamento remoto para a identificação e determinação das áreas de pequenos reservatórios. Tais processos serão especificados na sequência.

Figura 19 - Processo de aplicação de máscara.



Fonte: Adaptado do software ArcMap 10.2.2.

3.3 Adequação das técnicas de sensoriamento remoto

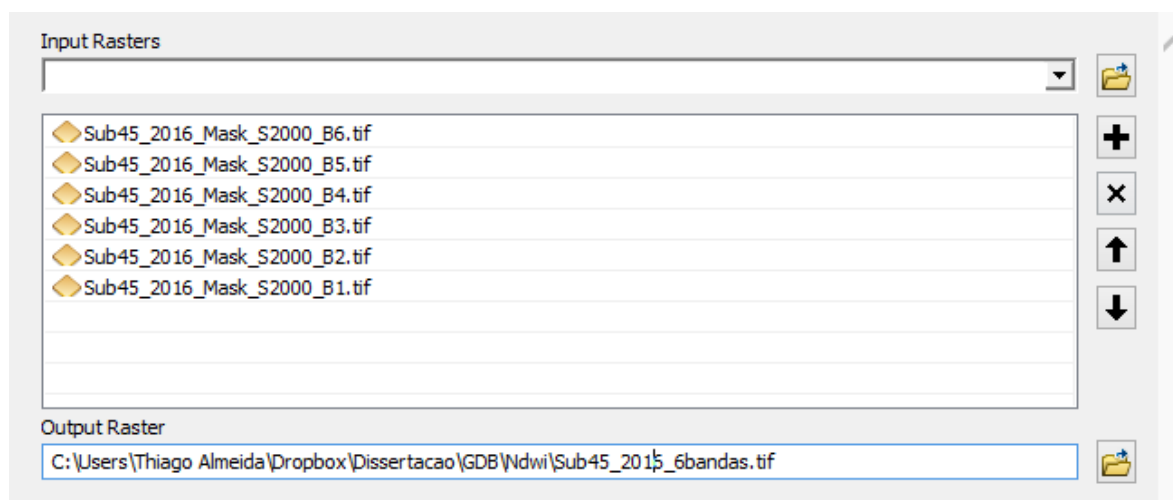
Para identificação e determinação dos espelhos d'água na região de estudo, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto levantadas ao longo da revisão da bibliografia (capítulo 2). Tais ferramentas foram adequadas para o presente estudo, enfatizando sua importância e finalidade, como descrito nas atividades na sequência.

3.3.1 Aplicação de composição de bandas espectrais e NDWI

Foram obtidas as bandas 2 (azul-B), 3 (verde-G), 4 (vermelho-R), 5 (infravermelho próximo-NIR) e 6 (infravermelho de ondas curtas (SWIR 1) do satélite Landsat 8 (OLI). As bandas 4, 3, 2 (RGB) foram utilizadas para a geração da composição colorida verdadeira, enquanto a composição 6, 5, 4 foi utilizada para gerar a falsa cor. Tais composições foram geradas no software ArcMap 10.2.2,

através dos comandos: *Data Management Tools / Raster / Raster Processing / Composite Bands*. Na sequência foram adicionadas as seis bandas utilizadas (com a máscara aplicada) para criação do arquivo que será gerado a composição (Figura 20). Vale ressaltar que o local de saída do arquivo criado e sua extensão (.TIFF) devem ser indicadas nesta etapa.

Figura 20 - Criação do arquivo de composição de bandas.



Fonte: Adaptado do software ArcMap 10.2.2.

A partir deste arquivo foi possível fazer as combinações de bandas espectrais para criar a composição verdadeira (R-B4, G-B3, B-B2) e falsa cor (R-B6, G-B5, B-B4). Estas composições foram necessárias para validar a aplicação do NDWI e a classificação. De acordo com Liebe *et al.* (2005), as banda visível vermelha e as bandas do infravermelho (próximo e de ondas curtas) são bem sucedidas para detecção e delimitação de corpos hídricos. Como afirmando por Ji, Zhang e Wylie (2009), o uso do índice NDWI é indicado como limiar para ser utilizado para delimitar a lâmina de água dos outros alvos de uma imagem de satélite, ao contrário do NDVI, que não é adequado para este fim.

Os resultados do estudo de Ji, Zhang e Wylie (2009) indicaram que a formulação de NDWI desenvolvida por Xu (2006) como àquela que apresentou melhores resultados. O método de Xu utiliza as bandas espectrais verde (banda 3) e SWIR (banda 6). Outros autores, como Liebe (2002), Oliveira *et al.* (2013) e Brenner e Guasselli (2015), utilizaram o índice NDWI proposto do McFeeters (1996), que determina o índice de normatização diferenciado da água através das bandas verde (banda 3) e infravermelho próximo (NIR). No presente estudo, as duas formulações

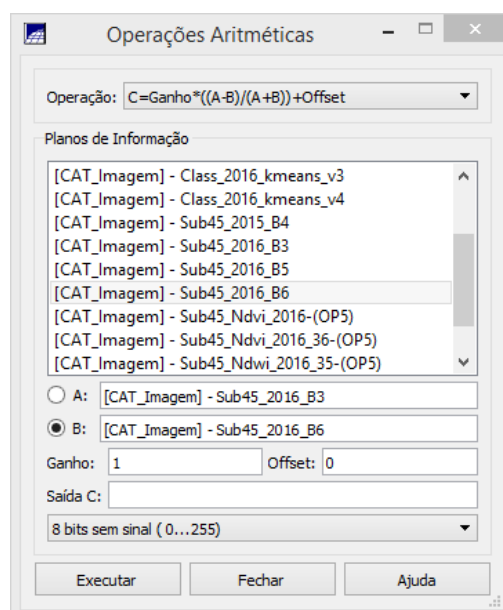
foram aplicadas, e aquela que apresentou melhor resultado foi utilizado no processo de classificação das imagens. Assim, os NDWIs utilizados foram:

$$NDWI_{35} = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad \text{McFeeters (1996)} \quad (2)$$

$$NDWI_{36} = \frac{G - SWIR}{G + SWIR} \quad \text{Xu (2006)} \quad (4)$$

Para por em prática estes métodos, foi utilizado novamente o *software* SPRING 5.5.1. Nele, foram importadas as imagens do recorte das bandas espectrais 3, 5 e 6, e posteriormente aplicado a álgebra de imagens. Este processo foi executado através dos comandos: *imagem / Operações Aritméticas*. Em seguida, foi escolhida a operação a ser realizada, os parâmetros da equação e definido a saída (indicando a quantidade bits), conforme é exibido na Figura 21. Com o produto desta etapa foi realizada a classificação a qual será descrita posteriormente.

Figura 21 - Álgebra de imagens pelo SPRING.



Fonte: Adaptado do *software* Spring 5.5.1.

3.3.2 Classificação das imagens e extração dos espelhos d'água

A partir do produto gerado do NDWI que melhor destacou os pequenos reservatórios, foi realizada a classificação desta imagem de três formas diferentes. A

primeira consistiu de uma classificação não supervisionada pelo método de K-médias (*K-means*), como aplicado por Polidorio, Imai e Tommaselli. (2004) e Polidorio *et al.* (2005). Para este método de classificação, foram definidos dois temas (água e não água) e 10 iterações para realizar o procedimento. Também foi informada a categoria do arquivo de saída e seu respectivo nome, como mostra a Figura 22.

As outras classificações foram realizadas pelo método supervisionado Maxver-ICM. Para justificar tal escolha, foram observados os trabalhos realizados por Silva *et al.* (2009), Liebe (2002) e Sawunyama (2005), que utilizaram o método de Maxver para detecção de corpos d'água em imagens de satélite, e Gomes *et al.* (2005), que através do coeficiente de concordância Kappa diagnosticou que a classificação Maxver-ICM apresenta melhores resultados que o método Maxver. Para a primeira classificação por Maxver-ICM, foram coletadas amostras para duas classes: água e não água. Para a outra classificação Maxver-ICM, foi criada apenas a classe de água, para qual foram coletadas as amostras. A Figura 23 apresenta a classificação pelo classificador Maxver-ICM para o segundo caso descrito.

Figura 22 - Atributos da classificação K-médias.

Atributos do Classificador

Tipo do Classificador: KMedias

Limiar de Aceitação: 100%

% Mudança: 1

#Temas: 2 # Iterações: 10

Área de Aquisição... Analisar Amostras...

Imagem de Saída

Categoria... CAT_Imagem

Nome: Class_2016_kmeans

Executar Fechar Ajuda

Fonte: Adaptado do *software* Spring 5.5.1.

Para avaliar as classificações realizadas, foram comparados os produtos e aplicações com as imagens NDWIs e a composição falsa cor, além resultados obtidos em outras pesquisas. Também se utilizaram a análise das amostras e a ferramenta *Pós-Classificação* do SPRING para definir qual a classificação apresentou o melhor produto.

Figura 23 - Atributos de classificação pelo método de Maxver-ICM para amostras somente de água.

(a) Treinamento para amostras de água.

(b) Classificador Maxver-ICM.

(a) Treinamento para amostras de água.

Nome: Cor... ■

Temas

Tema	Núm.Total de Pixels
Agua	2775

Modo: ☒ Normal ☐ Agrupar ☐ Desagrupar ☐ Exibe todas

Tipo: ☒ Aquisição ☐ Teste

Contorno: ☐ Poligonal ☒ Retangular ☐ Região

Amostras

Núm.	Tipo	Núm.de Pixels
1	(Aquisição)	4
2	(Aquisição)	73
3	(Aquisição)	49
4	(Aquisição)	47

☐ Exportar Arquivo de Redes Neurais (SRN)

Edição Poligonal

- ☐ Criar LF
- ☐ Adicionar P
- ☐ Mover P
- ☐ Remover P

Exportar Temas

Categoria...

PI:

Aquisição

(b) Classificador Maxver-ICM.

Atributos do Classificador

Tipo do Classificador:

Limiar de Aceitação:

% Mudança

#Temas: # Iterações:

Área de Aquisição...

Imagem de Saída

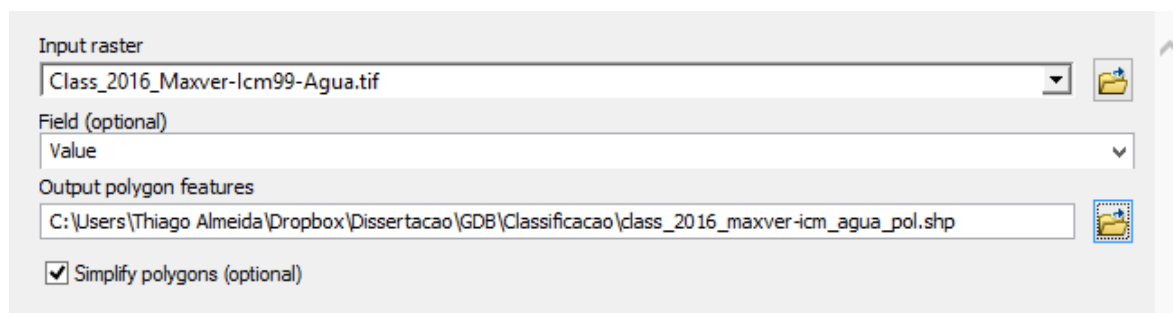
Categoria...

Nome:

Fonte: Adaptado do software Spring 5.5.1.

O produto da classificação foi em formato *Raster*, mas para se obter a área de cada corpo d'água é preciso que este seja em outra forma. Com o produto de classificação que apresentou resultados mais consistentes, foi realizada a extração dos polígonos, ou seja, das delimitações dos corpos hídricos. Para tal propósito, a imagem da classificação foi exportada com formato .TIFF e importado no ArcMap10.2.2. Aplicando a ferramenta *Raster to Polygon (Conversion Tools / From Raster / Raster to Polygon)* foi realizada tal operação (Figura 24). Com os polígonos dos corpos hídricos gerados, se adicionou aos seus atributos a componente área em ha.

Porém, foi preciso avaliar se todos os polígonos gerados condizem com corpos hídricos na região de estudo. Esta etapa do trabalho foi chamada de avaliação da extração, etapa que não pôde ser realizado por procedimentos de processamento de imagens.

Figura 24 - Conversão do arquivo raster em polígonos.

Fonte: Adaptado do software ArcMap 10.2.2.

3.3.3 Avaliação da extração dos espelhos d'água

O primeiro critério de avaliação diz respeito à área dos objetos classificados. Liebe *et al.* (2005) relataram em seu trabalho que através de imagens Landsat com 30 m de resolução, a probabilidade de classificar elementos de pequenos tamanhos indevidamente é alta. Em seu trabalho, os reservatórios com área menor que um ha foram excluídos, sendo adotados como ruídos do processo de classificação. Tal critério também foi adotado na presente pesquisa.

Já Molle (1994) desenvolveu no seu trabalho procedimentos de estimativa de área e volume para pequenos reservatórios utilizando apenas os açudes com área inferior à 80 ha. Como este método foi utilizado neste trabalho, conforme será relatado na seção 3.4.2, os produtos com área maior que 80 ha foram retirados da amostra de espelhos d'água. Em síntese (Tabela 6), os objetos com área menor que um ha e maiores que 80 ha foram descartas neste trabalho.

Tabela 6 - Critérios de avaliação em função da área do objeto.

Descrição	Critério	Fonte
Limite interior da área	≥ 1 ha	Liebe <i>et al.</i> (2005)
Limite superior da área	≤ 80 ha	Molle (1994)

Fonte: O Autor, 2018.

A segunda etapa de avaliação foi realizada avaliando todos os elementos classificados como corpos hídricos, que atenderam ao critério da área, separando-os em 5 grupos: reservatório, lagoa, rio, nuvem e ruído. Os elementos ditos como “reservatório” condizem com os açudes existentes na região. Aqueles dos grupos de lagoa e rio também são corpos hídricos, indicando que a classificação foi realizada

corretamente, mas foram retirados do produto validado da classificação, uma vez que o interesse foi apenas em reservatórios.

Os objetos classificados como nuvem foram oriundos da presença destas nas imagens utilizadas, os quais foram excluídos do produto da classificação. O último grupo condiz com os ruídos do produto da classificação.

Com a extração dos espelhos d'água devidamente validada, foi possível submeter o produto ao cálculo de armazenamento dos pequenos reservatórios.

3.4 Cálculo da capacidade de armazenamento de pequenos reservatórios

A estimativa da capacidade de armazenamento dos pequenos reservatórios foi realizada seguindo as diretrizes disposta nesta seção, obtendo-se também a declividade do leito dos cursos hídricos. As informações também foram agrupadas por bacia hidrográfica, de modo a se obter um painel equivalente por sub-bacia.

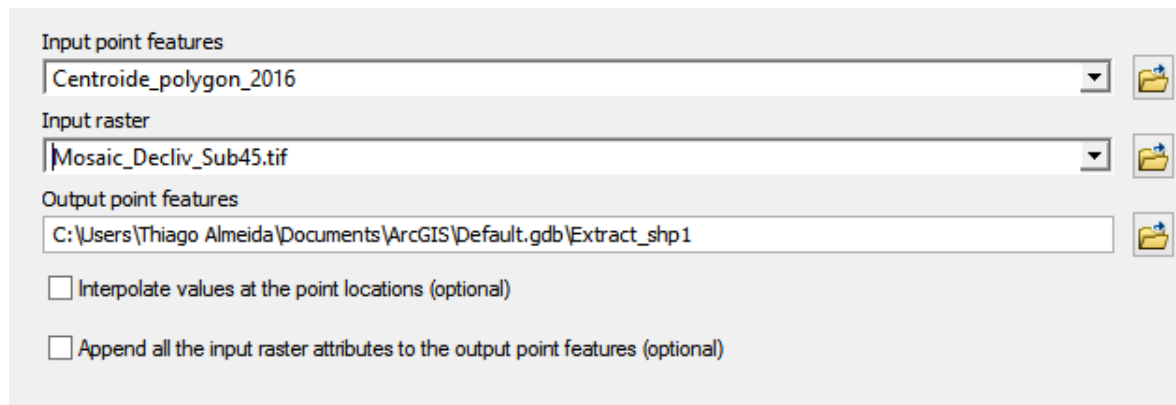
3.4.1 Declividade do leito dos cursos hídricos

Além dos dados da área do espelho d'água, outras informações podem ser úteis na estimativa dos volumes em reservatórios. Dados como altura do barramento, extensão do espelho d'água da direção do curso do rio e declividade do leito do curso do rio podem ser elementos complementares para esta estimativa. Dentro desse contexto, foram consultados os dados da plataforma TOPODATA, desenvolvida pelo INPE (INPE, 2018). Através dos dados SRTM disponibilizados pelo USGS, o INPE desenvolveu modelos digitais de elevação (MDE) com a finalidade de fornecer dados geomorfométricos do Brasil. Os dados foram disponibilizados em formatos correspondentes às etapas de processamento dos dados SRTM: preenchimento de falhas, refinamento, derivação e pós-processamento.

Dentre os dados fornecidos nesta plataforma está a declividade. Foram coletados os MDEs que sobreporiam os limites da área de estudo e realizados os processos de mosaico e aplicação de máscara, utilizando as mesmas ferramentas descritas no item 3.2.3. Foram definidos os centroides dos espelhos d'água e partir dele extraídos a declividade para cada reservatório. Tal procedimento foi possível

através da ferramenta *Extract Values to Points* (*Spatial Analyst Tools / Extraction / Extract Values to Points*) disposta na Figura 25.

Figura 25 - Extração da declividade a partir de um MDE.



Fonte: Adaptado do software ArcMap 10.2.2.

Os elementos obtidos até esta etapa foram suficientes para uma estimativa dos volumes dos pequenos reservatórios, a qual é descrita na próxima seção.

3.4.2 Estimativa do volume dos reservatórios

A estimativa de volume de pequenos açudes normalmente é realizada por métodos empíricos e simplificados. Segundo D'Agostino *et al.* (2010), o uso de metodologias simplificadoras em Hidrologia é geralmente associado com a incerteza em suas estimativas e a incerteza no resultado do modelo é originada por diversas causas. Porém, Shourian, Mousavi e Tahershamsi (2007) afirmam que metodologias simplificadoras sejam talvez os métodos mais utilizados para avaliar os recursos hídricos não monitorados. Pois além de fornecer um resultado rápido para a avaliação, podem ser usados como base para o gerenciamento dos recursos da bacia (ARAÚJO *et al.*, 2012).

Deste modo, foram adotadas as equações determinadas por Molle (1994) na estimativa de volume dos reservatórios neste estudo. Tais equações são em função da área do espelho d'água e da declividade do leito do rio, sendo divididas em dois grupos:

Em função da área do espelho d'água (S_x):

$$V_x = -23.776 + 5,64 \cdot S_x^{0,93} \quad R^2=0,899 \quad S_x < 80 \text{ ha} \quad (15)$$

$$V_x = -6.290 + 0,425.S_x^{1,147} \quad R^2=0,844 \quad S_x < 20 \text{ ha} \quad (26)$$

Em função da área do espelho d'água (S_x) e declividade do leito do rio (DM):

$$V_x = S_x^{1,065} . DM^{0,144} \quad R^2=0,950 \quad \text{toda amostra} \quad (17)$$

$$V_x = 0,117.S_x^{1,263} . DM^{0,49} \quad R^2=0,905 \quad S_x < 20 \text{ ha} \quad (18)$$

$$V_x = 0,045.S_x^{1,348} . DM^{0,50} \quad R^2=0,880 \quad S_x < 10 \text{ ha} \quad (19)$$

onde V_x é dado em m^3 , S_x em m^2 e DM em m .

Os dados obtidos através da extração dos espelhos d'água dos reservatórios (item 3.3.3) e da declividade do leito dos rios (item 3.4.1) que contêm os reservatórios são as variáveis das equações descritas. Assim, foi possível obter uma estimativa do volume dos pequenos reservatórios da área de estudo.

3.4.3 Informações equivalentes por sub-bacias

Inserir cada um dos reservatórios no modelo hidrológico seria uma tarefa árdua e passível de erro devido ao trabalho repetitivo. Uma forma simplificadora de obter a informação dos volumes por reservatório teve que ser formulada. Assim, foram utilizadas informações equivalentes por sub-bacia. Tal método consiste em admitir um reservatório equivalente no exutório de cada sub-bacia, o qual teria a área de espelho d'água e volume igual à soma destas variáveis dos reservatórios inseridos na sub-bacia.

Em síntese, cada sub-bacia teve um reservatório equivalente em seu exutório, o qual tinha seu volume correspondente à soma do volume dos reservatórios inseridos na respectiva sub-bacia (Equação 27). O mesmo vale para a área do espelho d'água do reservatório (Equação 28).

$$V_{eq}(Res) = \sum_{i=1}^n V_i \quad (27)$$

$$A_{eq}(Res) = \sum_{i=1}^n A_i \quad (28)$$

3.5 Modelagem Hidrológica

Tucci (1998) afirmou que quatro fatores devem ser avaliados na escolha do modelo hidrológico: objetivo do estudo, característica da bacia e do rio, disponibilidade de dados e familiaridade com o modelo. Cada um destes aspectos tem seu peso na análise do modelo a ser utilizado. O mesmo autor também relatou em seu texto que o melhor modelo será aquele que o usuário tiver maior sensibilidade sobre os parâmetros e sobre o efeito dos processos no hidrograma de uma bacia.

Desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers*, o modelo HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) foi desenvolvido em 1992 e é aplicado em escala mundial. Este modelo foi designado para simular o processo chuva-vazão com aplicação em diversas áreas geográficas para resolver problemas relacionados à: abastecimento de água, hidrologia de grandes bacias hidrográficas e escoamento de pequenas bacias hidrográficas urbanas e rurais. Diversos trabalhos em escala mundial utilizaram este modelo, como Derdour, Bouanani e Babahamed (2018) e Dastorani *et al.* (2011), com diversas aplicações também no Brasil: Souza *et al.* (2012), Ribeiro Neto *et al.* (2015), Coterato *et al.* (2015) e Santos (2017).

Portanto, devido ao seu tempo de desenvolvimento e a diversidade de trabalhos no qual o modelo já foi aplicado, o HEC-HMS 4.2.1 foi escolhido para ser utilizado nesta pesquisa. Os componentes desta seção abordaram as etapas de desenvolvimento e aplicação do modelo para a área de estudo.

3.5.1 Modelo geoespacial

O desenvolvimento do modelo geoespacial da área de estudo foi realizado através do ArcMap 10.2.2 associado a extensão HEC-GeoHMS 10.2 (*Geospatial Hydrologic Modeling Extension*), também desenvolvida pelo USACE. Desta forma, a área de estudo foi projetada em uma ferramenta de Sistema de Informação Geográfica (SIG) aplicada para modelagem hidrológica. O produto final da projeção foi o arquivo de entrada no modelo HEC-HMS. As atividades desenvolvidas nesta etapa são listadas na sequência, cujas foram realizadas com as instruções do manual do usuário do HEC-GeoHMS (USACE, 2013). O trabalho pôde ser dividido em e fases, as quais serão explanadas nesta seção:

- Fase 1: geração do modelo digital do terreno;
- Fase 2: processamento do terreno;
- Fase 3: projeto HEC-HMS;
- Fase 4: processamento de bacias;
- Fase 5: características hidrológica de rios e sub-bacias;
- Fase 6: estimativa dos parâmetros hidrológicos;
- Fase 7: exportação do arquivo de entrada do HEC-HMS.

De início foi obtido o Modelo Digital do Terreno (MDT) no projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) que consiste em reproduzir dados de altimetria a partir de um conjunto de pontos (x,y) e atributos que descrevem a variação da superfície (z). Os modelos produzidos pelo radar do SRTM, com resolução espacial de 30 metros (1 arco), sendo adquiridas no portal do USGS (USGS, 2017) no formato .tiff a partir do retângulo envolvente, que foi definido para a área de estudo (Figura 26). Foram realizadas correções das imagens MDT e a projeção destas no Datum SIRGAS 2000 na zona 23S, sendo compatível com a área de interesse.

Figura 26 - Extração do MDT.

a) Mapa da América do Sul.



b) Coordenadas do retângulo Envolvente.

Coordinates		Predefined Area	Shapefile	KML
Degree/Minute/Second		Decimal		
1.	Lat: 12° 30' 55" S, Lon: 046° 28' 21" W			✖
2.	Lat: 15° 36' 38" S, Lon: 046° 28' 21" W			✖
3.	Lat: 15° 36' 38" S, Lon: 042° 03' 38" W			✖
4.	Lat: 12° 30' 55" S, Lon: 042° 03' 14" W			✖

Use Map Add Coordinate Clear Coordinates

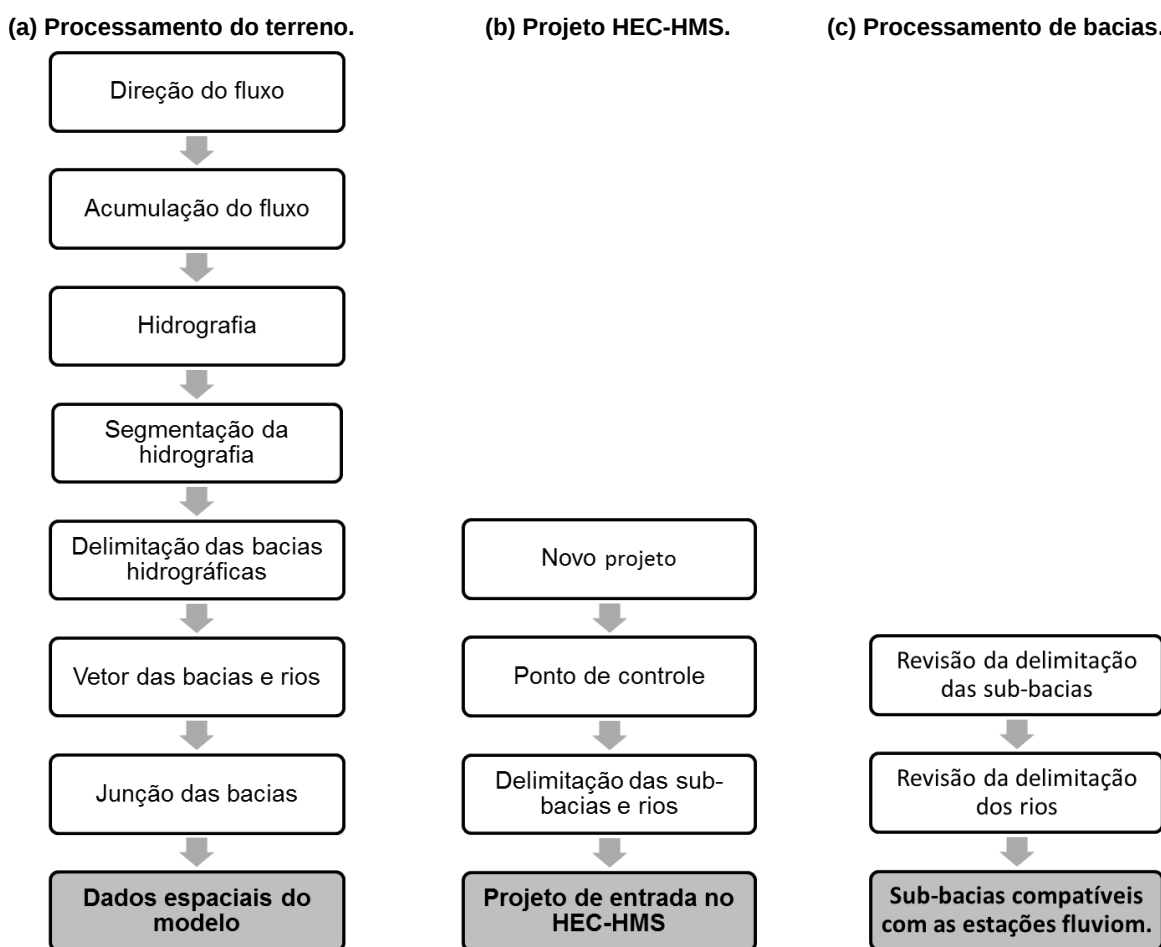
Fonte: USGS (2017).

A etapa seguinte foi realizar os procedimentos do processamento do terreno (*Terrain Processing*). Nesta etapa foi utilizado o MDT como entrada da realização de oito conjuntos de dados adicionais que descrevem coletivamente os padrões de drenagem da bacia hidrográfica, permitindo a delimitação da bacia do escoamento. Os cinco primeiros conjunto de dados foram gerados para representar a direção do fluxo (*flow direction*), acumulação do fluxo (*flow accumulation*), hidrografia (*stream network*), segmentação da hidrografia (*stream segmentation*) e delimitação das bacias (*watersheds delineation*), todas no formato *grid layers*. Os dois conjuntos de

dados seguintes que foram gerados correspondem a vetores (*vector layer*) das bacias hidrográficas e dos escoamentos (rios, riachos, etc.). O último dado gerado nesta etapa foi a junção de bacias (*aggregated watersheds*), responsável por aperfeiçoar a delimitação da bacia.

A síntese dos processos realizados nesta etapa está exposta na Figura 27. Após a conclusão do processamento do terreno, os produtos gerados corresponderam ao conjunto de dados espaciais do modelo.

Figura 27 - Fluxo os processos das fases 2, 3, 4 da modelagem geoespacial.



Fonte: O Autor, 2018.

A terceira etapa corresponde à configuração do projeto, cuja foi responsável por extrair dados que foram utilizados posteriormente na criação do projeto HEC-HMS (*HMS Project Setup*). A abordagem da extração envolveu especificar um ponto de controle da vazão de saída, ou seja, do exutório da área de interesse. Tal ponto representou o limite do projeto HEC-HMS. Após a definição do ponto de controle, foram delimitadas as áreas de drenagens das bacias a montante deste, utilizado o

conjunto de dados espaciais determinados na etapa anterior. Assim, esta etapa refinou as delimitações das bacias e rios, extraiu algumas características físicas das bacias e rios, estimou os parâmetros do modelo e preparou os arquivos de entrada do HEC-HMS. De forma sucinta (Figura 27), esta etapa foi responsável por gerar o arquivo de entrada do HEC-HMS, o qual contém características físicas das bacias.

O processamento de bacias (*Basin Processing*) deu continuidade ao refinamento da delimitação da bacia e rios. Nesta etapa foi possível customizar a delimitação das sub-bacias, na qual foi possível unir, separar ou excluir bacias e trechos de rios. Como critério para execução desta etapa, foi observada a localização das estações fluviométricas disponíveis, de modo que estas fossem coincidentes com os exutórios das sub-bacias. Além desta, foi utilizado o método da área máxima na divisão em sub-bacias, cujo valor foi de 1.000 km². Em outras palavras, a customização das sub-bacia e rios foi realizada de forma que toda estação fluviométrica ficasse localizada no exutório de uma sub-bacia, mas nem toda sub-bacia teve uma estação fluviométrica no seu exutório. Os processos para tal finalidade são exibidos na Figura 27.

A quinta etapa (Figura 28) consistiu em determinar as demais características hidrológicas das sub-bacias e rios (*Stream and Subbasin Characteristics*) através das ferramentas disponíveis do HEC-GeoHMS. Foram computadas várias características topográficas dos rios e bacias por esta ferramenta, na qual foram calculados os seguintes componentes:

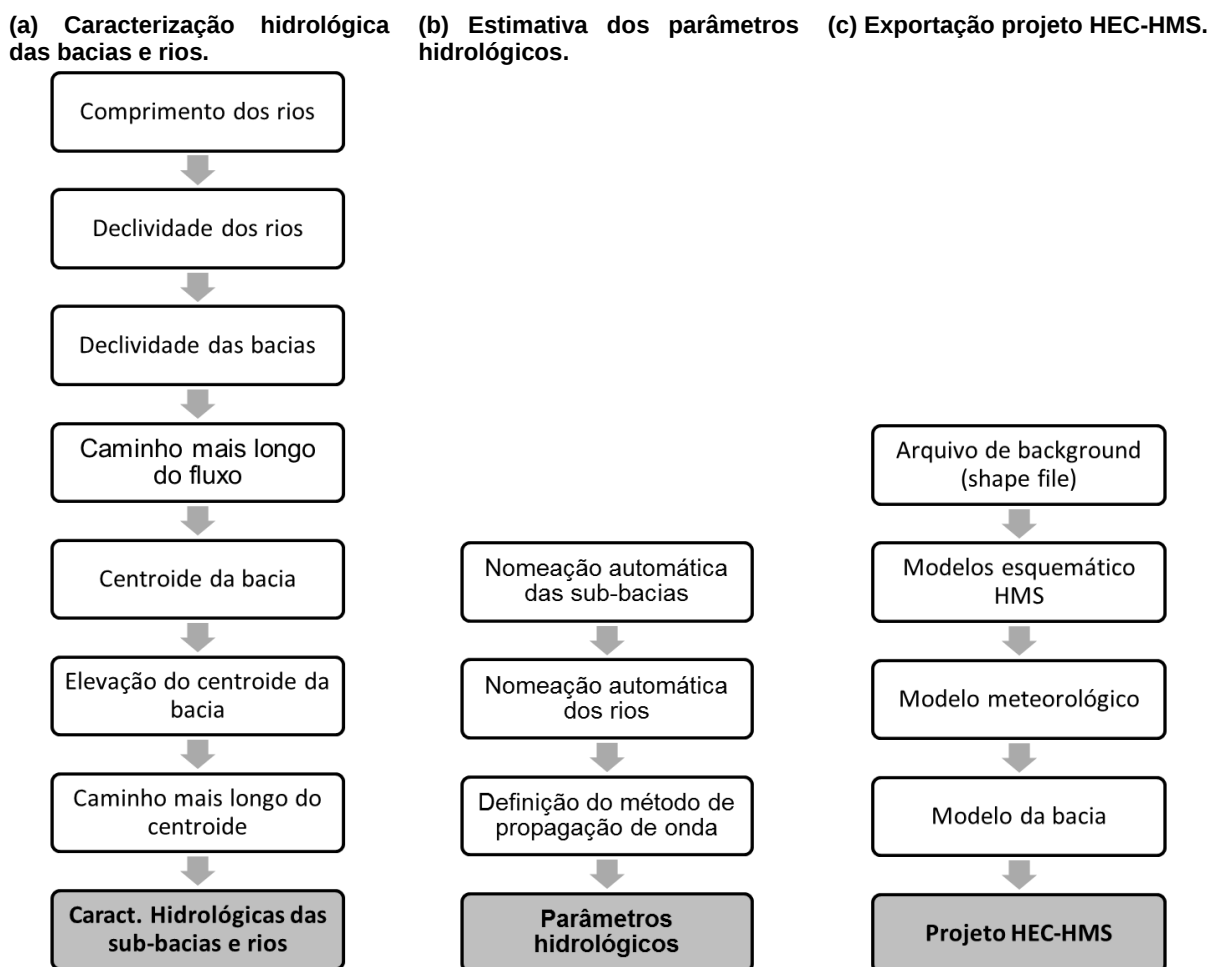
- Comprimento dos rios (*river length*);
- Declividade dos rios (*river slope*);
- Declividade das bacias (*basin slope*);
- Caminho mais longo do fluxo (*longest flowpath*);
- Centroide da bacia (*basin centroid*);
- Elevação do centroide da bacia (*centroid elevation*);
- Caminho mais longo do centroide (*centroidal elevation*).

As características hidrológicas dos rios e sub-bacias extraídas foram salvas nas tabelas de atributos dos *layers* dos rios e sub-bacias pelo processo da ferramenta do HEC-GeoHMS.

Após obter as características das sub-bacias e rios, a sexta etapa consistiu em determinar os parâmetros hidrológicos (*Hydrologic Parameters Estimation*).

Foram nomeadas automaticamente as sub-bacias e rios, e em seguida foi definido o método da propagação de ondas (Figura 28). O método utilizado para este fim foi o Muskingum-Cunge, uma das opções disponíveis no HEC-HMS. Devido à dimensão e característica da região de estudo, a definição dos parâmetros de propagação de onda foi definida apenas no modelo HEC-HMS, cujo será tratada na seção 3.5.3.

Figura 28 - Fluxo os processos das fases 5, 6, 7 da modelagem geoespacial.



Fonte: O Autor, 2018.

A última etapa foi composta por desenvolver o arquivo de entrada do HEC-HMS (.hms). Para isso, foram realizadas as seguintes atividades: preparar o *background shape files*, o modelo esquemático HMS (*HMS schematic*), o modelo meteorológico (*metheorologic model*) e o modelo da bacia (*basin model*). O *backgroud* representou as divisões das sub-bacias, cujo tem a finalidade de orientar espacialmente os componentes do modelo, sendo um arquivo shape file (.shp). O modelo esquemático foi formado para representar os elementos da região de estudo (sub-bacias, rios, reservatórios, junções de rios, etc.). Os dados meteorológicos são

exportados para um arquivo (.met), o qual foi inserido no HEC-HMS. Tal modelo foi composto pelas estações pluviométricas da bacia, mas contém apenas a descrição e as coordenadas geográficas destas. A inserção dos dados de precipitação ocorreu posteriormente, como descrita na seção 3.5.2. Por último, foi criado o modelo da bacia (.basin), o qual contém os dados obtidos nas fases anteriores compatíveis com a configuração e disposição do HEC-HMS.

Assim, esta última etapa foi responsável por compatibilizar as informações geradas ao longo do modelo geoespacial em informações para o modelo HEC-HMS, de modo que os dados tivessem a arquitetura requerida por este modelo. A síntese foi disposta na Figura 28. É importante ressaltar que os reservatórios equivalentes não foram inseridos no modelo nesta etapa, apenas após a calibração e validação do mesmo. Tal ponto será abordado na seção 3.5.6.

Com a criação dos elementos expostos ao longo da seção, foi possível inserir os dados de séries históricas disponíveis, assim como definir os métodos de cálculos das componentes do ciclo hidrológico.

3.5.2 Dados de entrada

A quantidade e representatividade das informações para ajuste e validação de um modelo hidrológico são fundamentais para permitir um resultado de qualidade. De acordo com Tucci (1998), o ideal é dispor de medidas de campo e depender menos de séries históricas. Porém, devido à finalidade deste trabalho, foram obtidos dados históricos para o ajuste e validação do modelo. Os dados de entrada utilizados neste trabalho correspondem à precipitação, vazão e evaporação.

Os dados de precipitação e vazão foram obtidos no portal Hidroweb da ANA (ANA, 2017). Ao todo, foram utilizadas 30 estações pluviométricas e 7 estações fluviométricas. A lista das estações pluviométricas utilizadas está disposta na Tabela 7, enquanto as estações fluviométricas são apresentadas na

Tabela 8.

Para inserção dos dados de precipitação e vazão no HEC-HMS foi utilizado o HEC-DSS (*Data Storage System*), o qual é um sistema designado para armazenar e

recuperar de forma eficiente dados de séries históricas. A Figura 29 apresenta a inclusão dos dados históricos de precipitação e vazão no HEC-DSS. Os processos para esta etapa foram realizados seguindo as orientações do Guia do Usuário HEC-DSSvue (USACE, 2009), com as unidades de precipitação definida em mm e vazão em m³/s.

Tabela 7 - Estações pluviométricas utilizadas no modelo.

Código	Latitude	Longitude	Nome	Entidade	Período
1342001	-13,6	-42,93	Riacho de Santana	DNOCS	1933-1994
1342015	-13,75	-42,7	Igaporã (bonito)	DNOCS	1947-1991
1342024	-13,9	-42,85	Matina	ANA	2005-2017
1342025	-13,6	-42,94	Riacho de Santana	ANA	2005-2017
1343001	-13,92	-43,55	Parateca	DNOCS	1939-1999
1343009	-13,64	-43,47	Fazenda Batalha	DNOCS	1939-1994
1343018	-13,25	-43,4	Bom Jesus da Lapa	INMET	1969-1998
1343019	-13,26	-43,44	Bom Jesus da Lapa	ANA	1945-2017
1343025	-13,98	-43,3	Urtiga	ANA	2002-2017
1343026	-13,72	-43,49	Quilombo	ANA	2005-2017
1442002	-14,28	-42,73	Açude Ceraima	DNOCS	1942-1999
1442006	-14,5	-42,68	Pindaí	DNOCS	1933-1991
1442009	-14,22	-42,78	Guanambi	DNOCS	1933-1991
1442010	-14,4	-42,63	Guirapa (Umburanas)	DNOCS	1933-1991
1442045	-14,26	-42,78	Guanambi	ANA	2005-2017
1442046	-14,49	-42,69	Pindaí	ANA	2005-2017
1443002	-14,3	-43,77	Carinhanha	ANA	1937-2014
1443015	-14,27	-43,17	Palmas de Monte Alto	DNOCS	1911-1990
1443018	-14,3	-43,77	Carinhanha	DNOCS	1911-1985
1443022	-14,3	-43,77	Carinhanha	INMET	1977-1998
1443026	-14,26	-43,17	Palmas de Monte Alto	ANA	1984-2017
1444000	-14,31	-44,46	São Gonçalo	ANA	1946-2014
1444001	-14,43	-44,48	Capitânea	ANA	1952-2017
1444004	-14,27	-44,16	Juvenília	ANA	1964-2014
1444005	-14,28	-44,41	Lagoa das Pedras	ANA	1969-2017
1444015	-14,18	-44,53	Cocos	DNOCS	1943-2001
1444017	-14,27	-44,52	Fazenda Porto Alegre	ANA	1946-2014
1444021	-14,23	-44,63	Ponte do Itaguari	INEMA-BA	2004-2014
1445000	-14,84	-45,17	Cajueiro	ANA	1981-2017
1445003	-14,64	-45,5	Ponte do Fortunato	INEMA-BA	2004-2014

Fonte: Adaptado de ANA (2017).

Tabela 8 - Estações fluviométricas utilizadas no modelo.

Código	Latitude.	Longitude	Nome	Rio	AD (km²)	Período
45170001	-14,26	-44,52	Fazenda Porto Alegre	Itaguari	5.850	1963-2016
45131000	-14,31	-44,46	São Gonçalo	Carinhanha	6.020	1945-2017
45298000	-14,30	-43,76	Carinhanha	São Francisco	254.000	1932-2014
45260000	-14,26	-44,15	Juvenília	Carinhanha	16.300	1965-2017
45210000	-14,28	-44,41	Lagoa das Pedras	Carinhanha	12.600	1969-2017
45220000	-14,42	-44,48	Capitânea	Coxá	2.380	1968-2016
45480000	-13,26	-43,44	Bom Jesus da Lapa	São Francisco	271.000	1962-2017

Fonte: Adaptado de ANA (2017).

Figura 29 - Entradas das séries históricas no HEC-DSS.

(a) Entrada dos dados de precipitação no HEC-DSS.

Help

Pathname Parts

A: CARIRANHA B: 1342001 C: PRECIP-INC

D: 01JAN1933 E: 1DAY F: OBS

Pathname: /CARIRANHA/1342001/PRECIP-INC/01JAN1933/1DAY/OBS/

Start Date: 30 April 1933 Units: mm

Start Time: 24:00 Type: PER-CUM

Paste

Manual Entry Automatic Generation

Ordinate	Date	Time	1342001 PRECIP-INC OBS
Units			mm
Type			PER-CUM
1	30 Apr 1933	24:00	0,00
2	01 May 1933	24:00	0,00
3	02 May 1933	24:00	0,00
4	03 May 1933	24:00	0,00
5	04 May 1933	24:00	0,00
6	05 May 1933	24:00	0,00
7	06 May 1933	24:00	0,00

Plot Graphically Edit Save Cancel

(b) Entrada dos dados de vazão no HEC-DSS.

Help

Pathname Parts

A: CARIRANHA B: 45260000 C: FLOW

D: 01JAN1964 E: 1DAY F: OBS

Pathname: /CARIRANHA/45260000/FLOW/01JAN1964/1DAY/OBS/

Start Date: 31 March 1964 Units: m3/s

Start Time: 24:00 Type: PER-AVER

Paste

Manual Entry Automatic Generation

Ordinate	Date	Time	45260000 FLOW OBS
Units			m3/s
Type			PER-AVER
1	31 Mar 1964	24:00	168,60
2	01 Apr 1964	24:00	169,31
3	02 Apr 1964	24:00	167,19
4	03 Apr 1964	24:00	158,77
5	04 Apr 1964	24:00	156,68
6	05 Apr 1964	24:00	156,68
7	06 Apr 1964	24:00	153,90

Plot Graphically Edit Save Cancel

Fonte: Adaptado do software HEC-DSSVue 2.0.1.

Os dados de evaporação utilizados foram coletados na plataforma das normais climatológicas do Brasil para o período entre 1960-1990 (INMET, 2017), onde foi utilizado os dados da estação climatológica de Bom Jesus da Lapa (Tabela 9).

Tabela 9 - Dados de evaporação utilizados no modelo.

Evaporação Total - Evaporímetro de Piché (mm)	
Código	83288
Nome da Estação	Bom Jesus da Lapa
UF	BA
Jan	124,3
Fev	111,2
Mar	134,4
Abr	127,5
Mai	154,1
Jun	177,7
Jul	220,0
Ago	253,4
Set	253,0
Out	204,8
Nov	129,7

Dez	115,8
Ano	2.005,9

Fonte: O Autor, 2018.

A qualidade dos dados de entrada é fundamental para o ajuste e prognósticos do modelo. As séries históricas foram analisadas quanto a qualidade dos dados, uma vez que a grande parte dos dados foram consolidados pelos órgãos responsáveis. Aqueles que não haviam passado por este processo, o mesmo foi realizado antes da inserção no modelo. Assim, foi assegurada a qualidade dos dados utilizados neste trabalho, reduzindo as incertezas dos resultados associadas a este componente.

3.5.3 Métodos de cálculo das componentes hidrológicas

Com o modelo devidamente estruturado, contendo a distribuição espacial das sub-bacias, rios e junções e os dados de entrada, o passo seguinte foi definir o método de cálculo das componentes hidrológicas das sub-bacias e os valores iniciais de simulação dos parâmetros destes componentes, sendo estes:

- Evapotranspiração e interceptação (*canopy*)
- Superfície (*surface*);
- Perdas (*loss*);
- Transformação chuva-vazão (*transform*);
- Escoamento subterrâneo (*baseflow*);
- Propagação de onda (*routing*).

Para tal objetivo, foi consultado o guia do usuário do modelo HEC-HMS (USACE, 2016). O método de cálculo da evaporação e interceptação é definido da dimensão (*Canopy Method*), cuja representação adotada foi o *Simple Canopy*. Este método representa a interceptação como um “reservatório”, o qual armazena a água da precipitação até sua capacidade máxima ser atingida. A evapotranspiração atua para esvaziar o “reservatório de interceptação”, a qual foi multiplicada por um coeficiente de correção internamente no modelo. Somente após esvaziar o “reservatório de interceptação”, a evapotranspiração potencial atua na superfície e no solo. Os parâmetros deste método, com seus respectivos valores iniciais de simulação, foram:

- *Initial storage (%)*: 50 (0-100)
- *Max storage (mm)*: 20 (0-50)
- *Crop coefficient*: 1,0 (0-1,0)
- *Evapotranspiration*: wet and dry periods
- *Uptake method*: simple

A superfície foi adicionada para representar a água que é acumulada nas depressões do relevo. O método (*surface method*) escolhido foi *Simple Surface*, o qual armazenou a água da precipitação que chegava à superfície do solo, até que o “reservatório de superfície” atingisse a sua capacidade máxima de armazenamento. A infiltração ocorria mesmo quando o reservatório não estivesse cheio. Quando a capacidade chegasse ao valor máximo e o índice de precipitação fosse maior que a taxa de infiltração, ocorreria o início do escoamento superficial. Desta forma, apenas dois parâmetros são utilizados neste método:

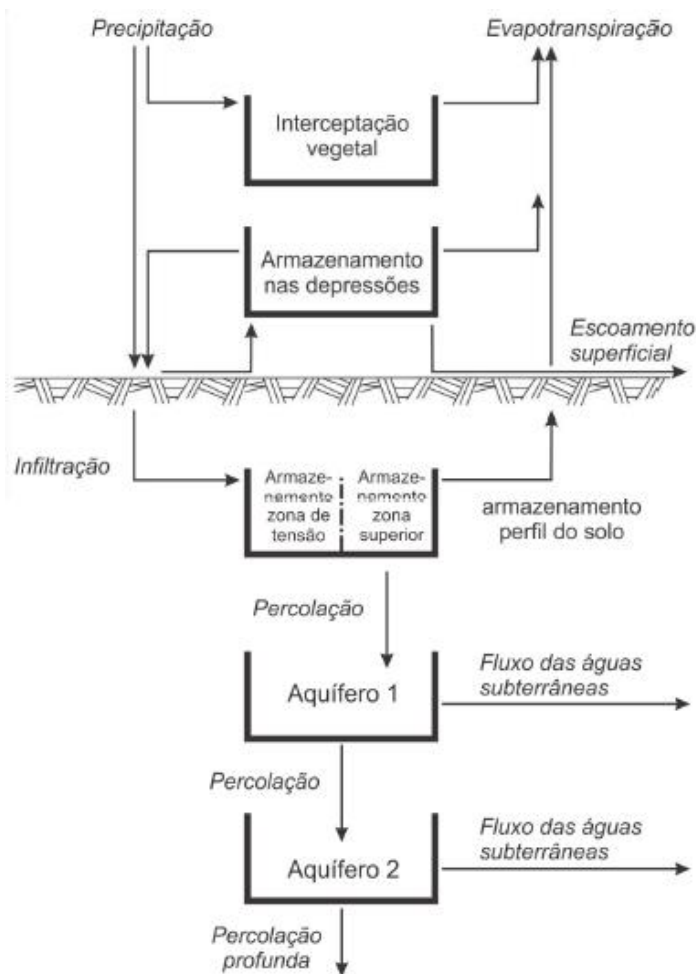
- *Initial storage (%)*: 50 (0-100);
- *Max storage (mm)*: 10 (0-20).

No HEC-HMS a infiltração é calculada separadamente do escoamento superficial e subterrâneo, no qual o cálculo real de infiltração é calculado por um método de perda contida no modelo (*loss method*). O método escolhido foi o *Soil Moisture Accounting Loss* (Figura 30), o qual utiliza três camadas para representar o fluxo de água no solo. Este método é utilizado no modelo associado com o *canopy method* e *surface method*. Este método prevê ciclos úmidos e de recuperação, podendo ser utilizado por longos períodos de simulação contínua, desde que seja selecionado um método para calcular a evapotranspiração. Os parâmetros e os valores iniciais adotados foram:

- *Soil*: 50 (0-100);
- *Groundwater 1 (%)*: 50 (0-100);
- *Groundwater 2 (%)*: 50 (0-100);
- *Max infiltration (mm/h)*: 5 (0,5-50);
- *Impervious (%)*: 5 (0-100);
- *Soil storage (mm)*: 150(100-400);
- *Tension storage (mm)*: 40 (100- soil storage);
- *Soil percolation (mm/h)*: 1 (0,35-4,00);
- *GW 1 storage (mm)*: 50 (1-100);

- GW 1 *percolation* (mm/h): 3 (3-6);
- GW 1 *coefficient* (h): 100 (100-480);
- GW 2 *storage* (mm): 0;
- GW 2 *percolation* (mm/h): 0;
- GW 2 *coefficient* (h): 0.

Figura 30 - Esquema conceitual do *Moisture Accounting Loss*.



Fonte: Santos (2013).

O escoamento contido nas sub-bacias foi calculado pelo método de transformação (*transform method*) chuva-vazão. Para esta pesquisa, foi adotado o método *SCS Unit Hydrograph Transform*. Este método define um hidrograma unitário curvilíneo, definindo o percentual do escoamento que ocorre antes da vazão de pico. No HEC-HMS, um hidrograma unitário triangular é ajustado de modo que o tempo total do hidrograma possa ser calculado, sendo definido que 37,5% do escoamento ocorrem antes do pico. Apenas dois parâmetros foram inseridos neste componente:

- *Graph type*: Standard (PRF 484);
- *Lag time*: calculado pra cada sub-bacia.

O primeiro parâmetro corresponde ao tipo de gráfico do hidrograma unitário, o qual representa o percentual de escoamento que ocorreu antes do pico, chamada de taxa de pico (PRF). Neste trabalho, o valor utilizado foi o valor padrão do HEC-HMS. O segundo corresponde ao *Lag Time*, cujo valor corresponde à 60% do tempo de concentração. Neste trabalho, o tempo de concentração foi estimado pelo método de Kirpich CTH, sugerido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica de São Paulo.

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (29)$$

$$Lag\ Time = 0,6 \cdot t_c \quad (30)$$

Onde : t_c : tempo de concentração (min).

L : caminho mais longo do fluxo (km).

H : diferença de elevação ponto remoto da bacia e exutório (m).

A componente do escoamento subterrâneo foi calculada no HEC-HMS separadamente do escoamento superficial (*Baseflow Method*). O método da recessão (*Recession Baseflow*) foi adotado neste trabalho, cujo é designado para aproximar o comportamento típico observado nas bacias quando a vazão do rio regride exponencialmente após um evento de cheia. Entretanto, este método não reinicia automaticamente após cada evento chuvoso e, conseqüentemente, é indicado para simulações contínuas. Dentre os parâmetros definidos esteve a constante de recessão. Esta é responsável por descrever a taxa que o escoamento subterrâneo regride entre os eventos chuvosos. Assim, os parâmetros e seus valores iniciais de simulação foram:

- Initial type: discharge per area
- Initial discharge ($m^3/s/km^2$): calculado para cada sub-bacia
- Recession constant: 0,75 (0-1,0)
- Threshold type: ratio to peak
- Ratio: 0,05 (0-1,0)

O método de propagação de onda (*Routing Method*) assumido neste trabalho foi o Muskingum-Cunge, o qual se baseia na combinação da equação de conservação da massa e a representação da conservação no momento. Neste método, os parâmetros de roteamento são recalculados a cada etapa, com base na profundidade do canal e na profundidade da lâmina d'água no rio. Muskingum-Cunge pode ser usada em rios com baixa declividade, o que acontece nesta pesquisa.

Sobre o intervalo de passo do método, foi adotado na maioria dos casos como *automatic fixed method*, no qual o programa calcula esta variável automaticamente. Porém, em alguns casos, durante a simulação ocorreu o erro de falta de memória no cálculo desta componente para alguns trechos de rios. Nestes casos, foi alterado o método do intervalo do passo para *Automatic Adaptation*.

Os parâmetros de comprimento e declividade de cada trecho do rio foram calculados durante o processo da modelagem geoespacial, explanada na seção 3.5.1. Já o valor adotado para o coeficiente de Manning foi de 0,035, de acordo com Azevedo Netto (2015). As seções dos rios foram definidas como trapezoidais, obtidas a partir dos perfis das estações fluviométricas, conforme exposto na Tabela 10. Assim, os trechos de rios utilizaram tais representações de perfis, observando a proximidade dos trechos.

Tabela 10 - Parâmetros dos canais fluviais adotados no modelo.

Estação	Manning n	H:1V (esq) (m)	H:1V (dir) (m)	H:1V (médio) (m)
45170001	0,035	2,42	3,83	3,13
45131000	0,035	3,87	11,65	7,76
45298000	0,035	2,89	3,25	3,07
45260000	0,035	4,15	5,21	4,68
45210000	0,035	5,31	3,44	4,38
45220000	0,035	8,96	7,24	8,10
45460000	0,035	2,83	3,85	3,34
45470000	0,035	10,46	11,33	10,90
45120000	0,035	28,62	29,60	29,11

Fonte: O Autor, 2018.

Desta forma, os parâmetros e valores iniciais de simulação foram:

- *Time step method: automatic fixed interval / automatic adaptation;*
- *Length (m):* variado para cada trecho de rio;

- *Slope* (m/m): variado para cada trecho de rio;
- *Manning's n*: 0,035
- *Shape: trapezoid*:
- *Bottom width* (m): variado para cada trecho de rio;
- *Side slope* (xH:1V): variado para cada trecho de rio.

As componentes hidrológicas apresentadas, assim como seus parâmetros, indicaram os métodos de cálculo para a simulação da área de estudo, concluindo esta fase da metodologia. A síntese dos valores iniciais dos parâmetros é exibida na Tabela 11. Para finalizar o modelo hidrológico foi necessário definir os períodos de simulação, inserir os reservatórios equivalentes no modelo e estabelecer a medida de eficácia da simulação.

3.5.4 Períodos de simulação

Com os dados físicos da bacia devidamente inseridos, assim como definidas as variáveis de entrada do modelo, o passo seguinte foi definir o período de simulação para ajuste dos parâmetros e prognóstico. O processo de ajuste de parâmetros foi composto em duas fases: calibração e validação.

Como a finalidade desta pesquisa foi determinar a influência de pequenos reservatórios no escoamento superficial da área de estudo, o período de calibração do modelo foi determinado de forma que na época houvesse a menor quantidade possível de pequenos açudes, ou seja, na época mais remota possível, desde que estivessem dados disponíveis e de qualidade para o processo. Assim, o período de calibração foi entre janeiro de 1975 e dezembro de 1980.

Para a validação foram escolhidos dois momentos. O primeiro entre janeiro 1982 a dezembro 1986, e o segundo entre janeiro de 1986 a outubro de 1989. A definição de dois períodos de validação ocorreu para se obter duas amostras para a avaliação de eficácia do modelo, a qual será relatada na seção 3.5.5. Para a calibração e validação os reservatórios equivalentes não foram inseridos no modelo, os quais foram incluídos para a realização do prognóstico. Assim, o modelo fica caracterizado pelo ajuste em série contínua e por tentativa e erro, além de passo de tempo mensal. Este método de ajuste dos parâmetros foi adotado para se obter um

maior entendimento dos processos hidrológicos atuantes nas bacias hidrográficas, o que acrescentou conhecimentos sobre a região de estudo.

Tabela 11 - Valores iniciais dos parâmetros hidrológicos.

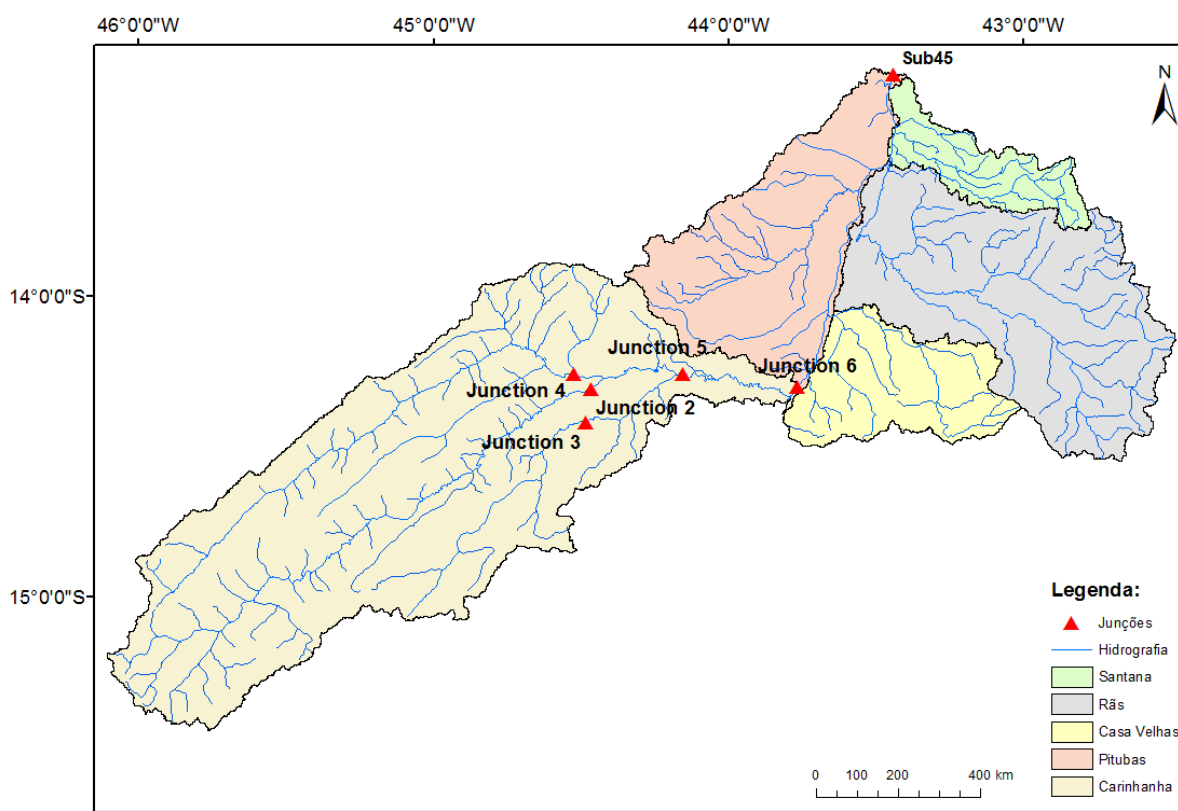
Componente	Método	Parâmetro	Valor
Canopy (Interceptação e Evapotranspiração)	Simple Canopy	Initial Storage	50
		Max Storage	20
		Crop Coeficient	1
		Uptake Method	Simple
Surface (Superfície)	Simple Surface	Initial Storage (%)	50
		Max Storage (mm)	10
Loss (Perdas)	Soil Moisture Accouting	Soil	50
		Groundwater 1	50
		Groundwater 2	50
		Max Infiltration	5
		Impervious	5
		Soil Storage	150
		Tension Storage	40
		Soil Percolation	1
		GW 1 Storage	50
		GW 1 Percolation	3
		GW 1 Coefficient	100
		GW 2 Storage	0
		GW 2 Percolation	0
		GW 2 Coefficient	0
Transform Method (Transf. chuva-vazão)	SCS Unity Hydrograph	Graph type	Standard
		Lag time (min)	_*
Baseflow (Escoamento Subterrâneo)	Recession	Initial type	Discharge Per Area
		Initial Discharge (m ³ /s /km ²)	_*
		Recession Constant	0,75
		Threshold Type	Ratio to Peak
		Ratio to peak	0,05
Routing (Propagação de onda)	Muskingum- Cunge	Time step method	automatic fixed interval
		Length	_*
		Slope	_*
		Manning's n	0,035
		Shape	Trapezoid
		Botton width	_*
		Side slope	_*

*Valores definidos individualmente por sub-bacia ou trecho de rio.

Fonte: O Autor, 2018.

Para aumentar a precisão do processo de ajuste, as sub-bacias foram agrupadas de acordo que a bacia hidráulica representativa das estações fluviométricas em operação na região de estudo, uma vez que o número de sub-bacias é muito maior que o número de estações com dados disponíveis. Assim, os resultados calculados puderam ser comparados com as séries históricas observadas nas estações fluviométricas. No modelo, estas estações foram nomeadas como junções (Figura 31). Tal agrupamento é exibido na Tabela 8.

Figura 31 - Localização das junções na área de estudo.



Fonte: O Autor, 2018.

O prognóstico, avaliação da influência dos reservatórios no escoamento superficial, foi realizado para o período de janeiro de 2016 a abril de 2016, o mesmo ano do qual foram obtidas as imagens de satélite para estimativa de área do espelho d'água e volume dos respectivos reservatórios (item 3.2.1). A Tabela 13 sintetiza as premissas descritas nesta seção. É importante ressaltar que o período da análise não fica restrito ao período das imagens de satélite.

Tabela 12 - Agrupamento de sub-bacias por estação fluviométrica.

Estação Fluviométrica	Junção	Sub-bacias
45131000 (São Gonçalo)	Junction 2	W6049 W6050 W5200 W5190 W2639
45220000 (Capitanea)	Junction 3	W3900 W5499
45170001 (Faz. Porto Alegre)	Junction 4	W5440 W3390 W6000 W5990 W4840 W2490 W719
45260000 (Juvenília)	Junction 5	W720 W2640 W5490 W5500 W710 W4440 W4349
45298000 (Caririnha)	Junction 6	W4350 W7209
45480000 (Bom Jesus da Lapa)	Sub45	W5400 W1350 W649 W1440 W650 W2440 W5940 W590 W600 W1499 W1550 W1500 W7220 W7210 W560 W530 W1700 W1640 W1650 W1590

Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 13 - Períodos de simulação utilizados no modelo.

Simulação	Período
Calibração	jan/1975 a dez/1980
Validação 1	jan/1982 a dez/1986
Validação 2	jan/1986 a out/1989
Prognóstico	jan/2016 a abr/2016

Fonte: O Autor, 2018.

3.5.5 Eficácia dos resultados

Para a avaliação da eficácia dos resultados das simulações, foram utilizadas estatísticas. Os dois métodos para esta análise foram o Coeficiente Nash-Sutcliffe (NS) e a diferença de volumes (ΔV), os quais são definidos pelas seguintes equações:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n \{Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)\}^2}{\sum_{t=1}^n \{Q_{obs}(t) - Q_m\}^2} \quad (29)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{t=1}^n Q_{obs}(t) - \sum_{t=1}^n Q_{cal}(t)}{\sum_{t=1}^n Q_{obs}(t)} 100 \quad (30)$$

onde $Q_{obs}(t)$ e $Q_{cal}(t)$ são vazões observadas e calculadas pelo modelo no tempo t e Q_m é a vazão média do período.

O grau de aceitação dos resultados foi medido pelos limiares sugeridos por Gottschalk e Motovilov (2000) e Moriasi *et al.* (2007), sintetizados na Tabela 1 e na Tabela 2. Com o grau de aceitação avaliado, pode-se jogar se o modelo apresentou resultados qualitativos e/ou quantitativos.

3.5.6 Caracterização dos reservatórios equivalentes

Os reservatórios equivalentes foram inseridos após os ajustes do modelo (calibração e validação), integrando apenas a simulação do prognóstico. Como já relatado anteriormente, os reservatórios foram inseridos no exutório de cada sub-bacia, de modo a agrupar as informações de área de espelho d'água e volume dos açudes inseridos nas respectivas sub-bacias.

O conceito dos reservatórios equivalentes foi que este estaria vazio no início do período chuvoso, uma vez que são açudes anuais⁴, e que a vazão defluente teve início somente após a sua capacidade máxima ser atingida. Este efeito de intercepção no escoamento superficial dos reservatórios é um dos objetivos deste trabalho. Para cada reservatório equivalente, foram inseridas as seguintes informações:

- Método de cálculo da vazão defluente;

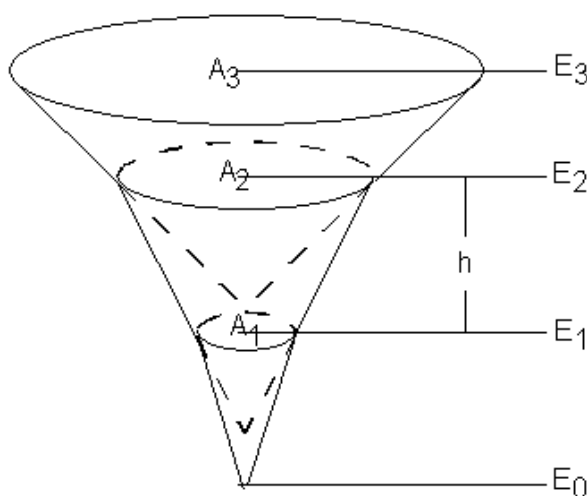
⁴ Açudes Anuais na região semiárida são aqueles que esvaziam todos os anos, acarretando seu esvaziamento somente com a evaporação.

- Método de armazenamento;
- Função Cota x Volume;
- Condição inicial;
- Método de passo do tempo;
- Quantidade de vertedouros.

O método de cálculo da vazão defluente (*method*) foi o das estruturas de vazão de saída (*outflow structure*), no qual as vazões são calculadas a partir dos dados das estruturas (vertedouros, derivações, captação por bombas, etc.). No caso deste estudo, a única estrutura com vazão de saída dos reservatórios foi vertedouros, no qual cada reservatório conteve apenas um. O método de armazenamento (*storage method*) definido foi o Elevação x Armazenamento (*Elevation-Sotorage*).

Para isto, foi necessário estimar a altura máxima de cada reservatório equivalente e as respectivas curvas Cota-Volume (*Elevation-Sotorage function*). Para tal fim, foi utilizado o WMS *Storage Capacity Curves*. Este é o mesmo método usado internamente nas rotinas do modelo HEC-HMS para conversão da curva cota x volume na curva cota x área. Este método consiste em determinar o volume através de um método cônico, que relaciona este componente com as áreas das superfícies inferior e superior e a diferença de cotas entre as superfícies, conforme exemplificado na Figura 32.

Figura 32 - Esquema do método WMS *Storage Capacity Curves*.



Fonte: AQUAVEO (2018).

$$\Delta V_{(i,i+1)} = \frac{h}{3} (A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i A_{i+1}}) \quad (31)$$

Onde:

$\Delta V_{(i,i+1)}$: variação de volume entre as respectivas superfícies inferior e superior do cone (m³).

A_i : área da superfície “i” (m²).

h : distância vertical entre as superfícies inferior e superior (m).

E_i : elevação da área de superfície (m).

Portanto, a partir da Equação 31 foi possível estimar a altura máxima de cada reservatório equivalente e a respectiva curva cota x volume. Para isto, foram definidas 6 percentuais da área máxima do espelho d’água dos reservatórios (0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%), determinados os volumes associados a cada percentual de área através das equações 15 e 16 e isolado a variável da altura (h) da Equação 31.

Assim como nas definições da onda de propagação de vazão (seção 3.5.3), o método de passo de tempo (*time step method*) utilizado foi o *Automatic Adaption*. Já as dimensões dos vertedouros foram calculadas de forma que o vertedouro tivesse extensão igual ao raio da superfície superior da forma cônica (*WMS Storage Capacity Curves*) e cota de elevação superior a 50% da altura máxima. Para o cálculo da vazão do vertedouro, foi utilizado o método *Broad-Crested Spillway*, com coeficiente igual a 1,38 (m^{0,5}/s), valor médio do intervalo sugerido por USACE (2016), que era entre 1,10 a 1,66 no sistema internacional de unidades.

Com todos os elementos expostos, o modelo hidrológico esteve concluído, no qual foram realizadas as simulações. Vale ressaltar que os modelos apresentam limitações, as quais podem limitar as saídas. Assim, os aspectos quantitativos do prognóstico podem apresentar baixa eficácia. Os resultados dos métodos adotados nesta pesquisa estão expostos no capítulo subsequente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram dispostos em maneira similar à disposição da metodologia relatada no capítulo anterior, de modo a facilitar o entendimento dos produtos. Assim, os resultados foram divididos em três grupos: adequação das técnicas de sensoriamento remoto, capacidade de armazenamento de pequenos reservatórios e modelagem hidrológica.

4.1 Adequação das técnicas de sensoriamento remoto

As técnicas de sensoriamento remoto tiveram como finalidade a identificação e extração dos espelhos d'água dos pequenos reservatórios localizados na área de estudo. Além deste, produtos intermediários foram obtidos nesta pesquisa, os quais foram necessários para alcançar o propósito mencionado. A descrição destes resultados foi ordenada nesta seção.

4.1.1 *Pré-processamento de imagem*

Os procedimentos de pré-processamento aplicados nas imagens foram a avaliação de presença de nuvens sobrepostas aos corpos hídricos e a análise das diferenças radiométricas das imagens de Landsat 8, e posteriori a composição de mosaico e aplicação da máscara.

A avaliação da presença de nuvens concluiu que as nuvens presentes nas imagens selecionadas não prejudicariam significativamente o uso destas para extrair os espelhos d'água. Tal conclusão pôde ser realizada primeiramente em função do baixo percentual de nuvens sobrepondo as imagens, assim como tal sobreposição pouco afetou a identificação de pequenos reservatórios. Esta última afirmação foi originada a partir da comparação visual das imagens da Tabela 4 e Tabela 5 nos pontos com a presença de nuvens. A Figura 33 apresenta uma amostra desta avaliação.

Figura 33 - Exemplo da avaliação da presença de nuvens nas imagens Landsat 8.

(a) Imagem 218/070 em 13/05/16.



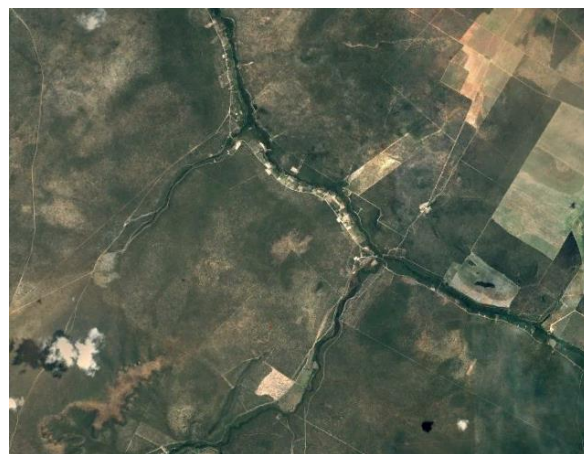
(b) Imagem 218/070 em 16/07/16.



(c) Imagem 219/070 em 18/04/16.



(d) Imagem 219/070 em 07/07/16.



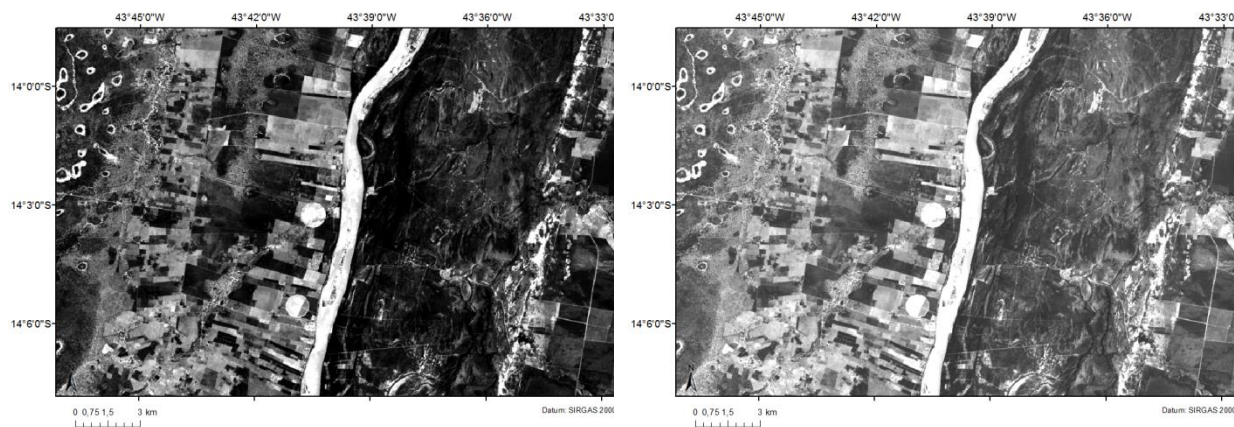
Fonte: O Autor, 2018.

Já a análise da diferença radiométrica foi realizada aplicando a técnica de realce. Os resultados realce. Os resultados (Figura 34) aperfeiçoaram o produto das imagens das bandas espectrais requeridas, as quais foram importantes na etapa seguinte, composição das bandas espectrais e NDWI e classificação das imagens. Os resultados da aplicação do mosaico e máscara são exibidos na sequência (Fonte: O Autor, 2018).

Figura 35).

Os produtos gerados foram base para as etapas futuras, os quais apresentaram boa qualidade dos resultados apresentados, influenciando diretamente as demais etapas de aplicação de ferramentas de sensoriamento remoto.

Figura 34 - Amostra da aplicação de realce nas imagens Landsat 8.

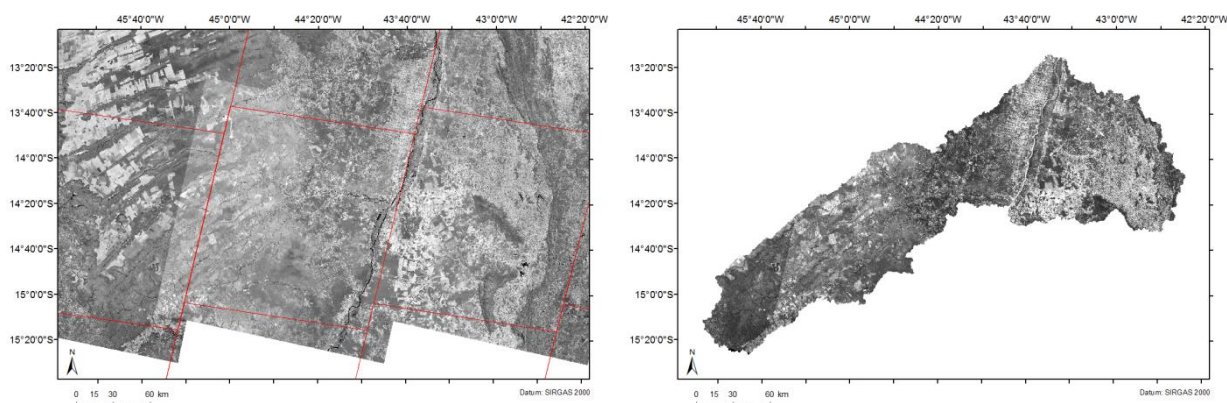


(a) Imagem da banda 4 sem realce.

(b) Imagem da banda 4 com realce.

Fonte: O Autor, 2018.

Figura 35 - Exemplo do resultado da aplicação de mosaico e recorte.



(a) Aplicação do mosaico para a banda 6.

(b) Aplicação da máscara para banda 5.

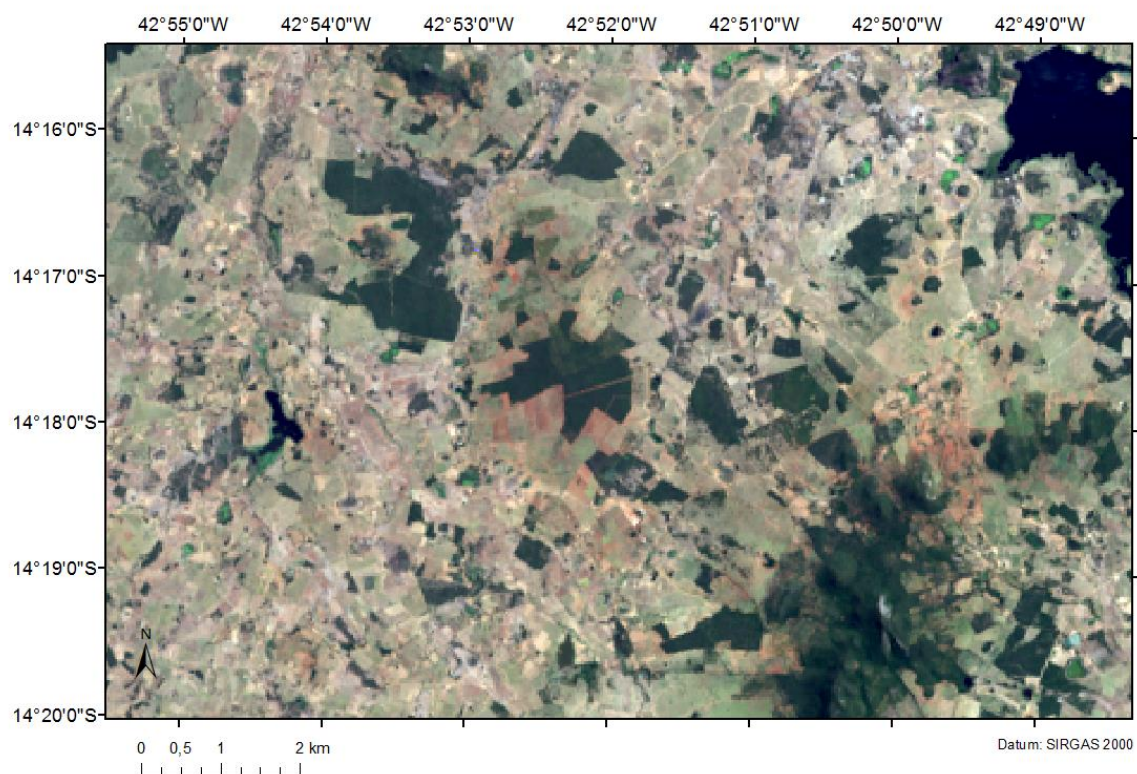
Fonte: O Autor, 2018.

4.1.2 Composição de bandas espectrais e NDWI

As composições de bandas espectrais foram realizadas para permitir uma posterior classificação de imagem, de modo que os espelhos d'água fossem identificados e extraídos. De início foram realizadas as composições colorida verdadeira e falsa cor, verdadeira e falsa cor, utilizando os produtos da aplicação da máscara. Para a composição colorida verdadeira os resultados são expostos na Figura 36. Já os resultados da composição falsa cor estão apresentados na Fonte: O Autor, 2018.

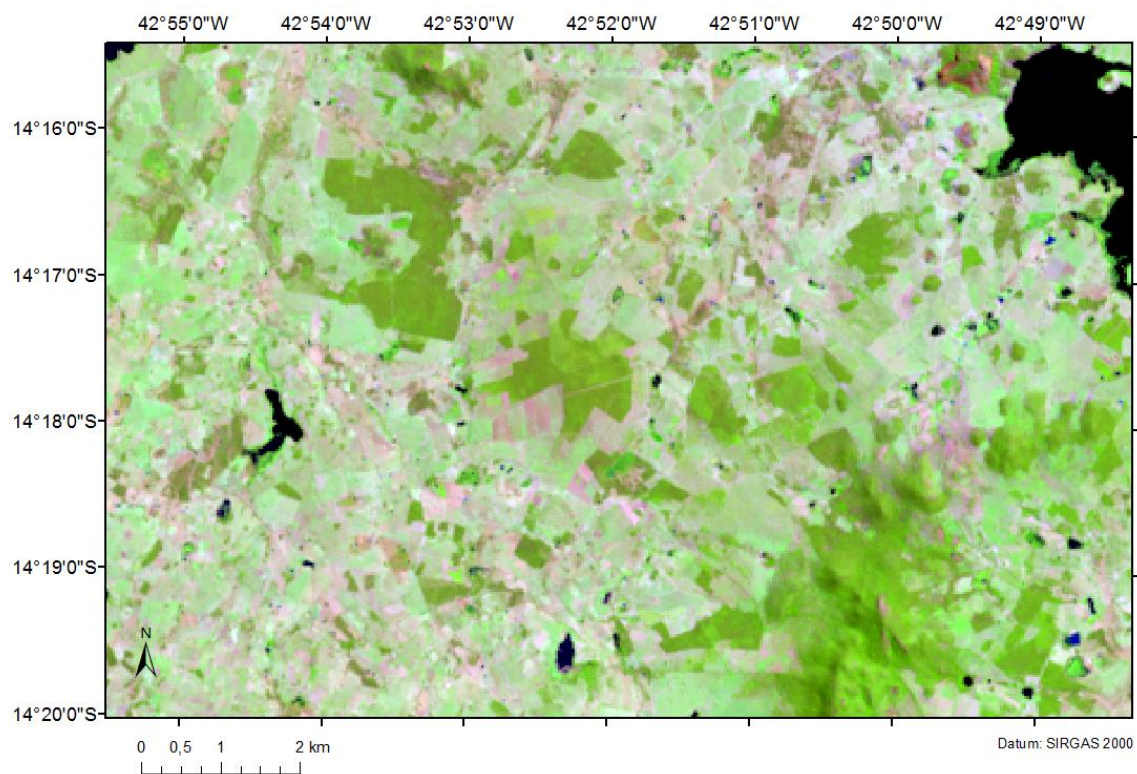
Figura 37.

Figura 36 – Amostra de composição colorida verdadeira para a área de estudo.



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 37 – Amostra de Composição falsa cor para a área de estudo.

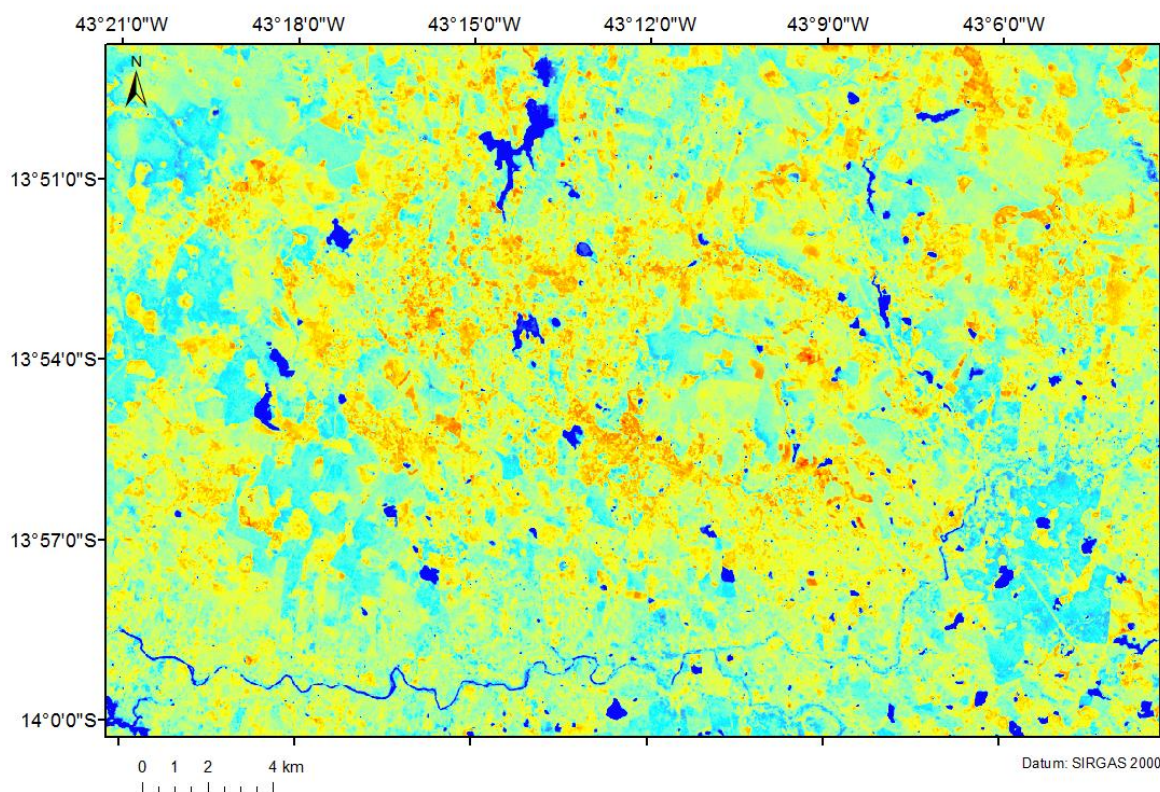


Fonte: O Autor, 2018.

Comparando os resultados das duas composições, pôde-se afirmar que a composição falsa cor teve um melhor realce dos corpos d'água, principalmente aqueles com menores áreas de espelho d'água. Portanto, esta composição foi adotada para avaliar os resultados das duas formulações do índice NDWI, como também para a avaliação da extração dos espelhos d'água.

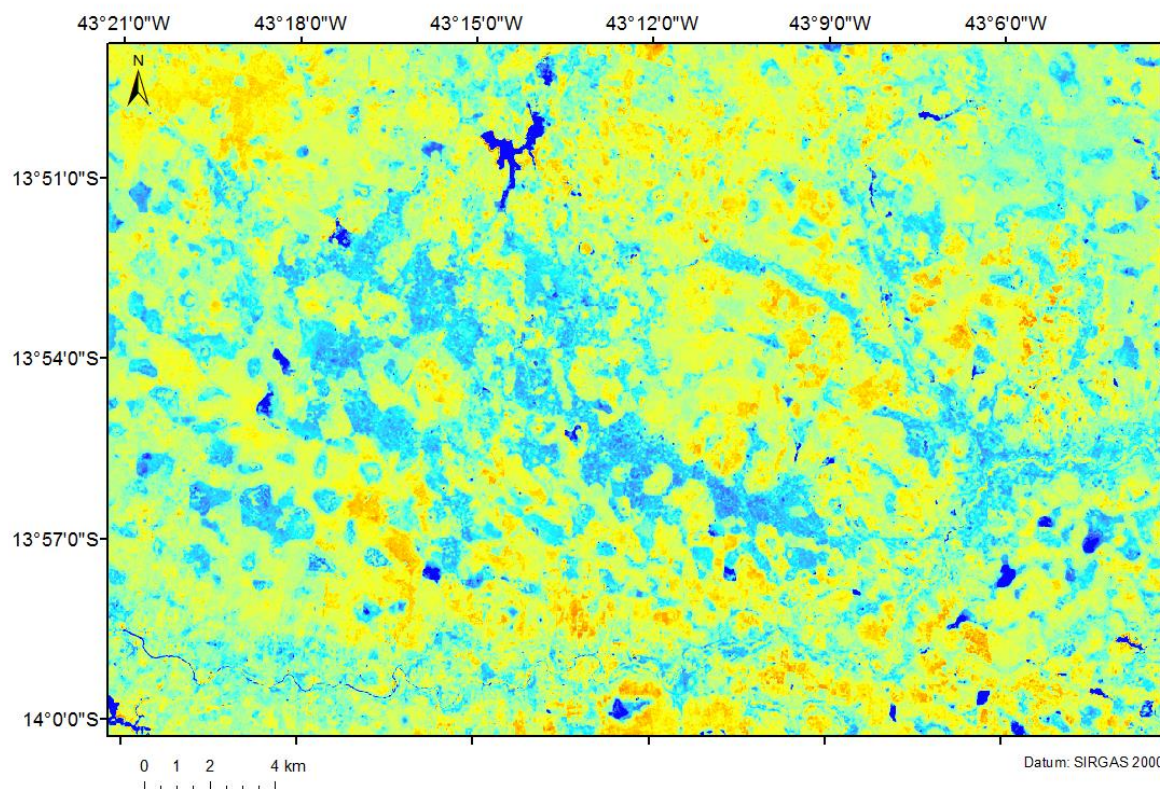
As duas formulações aplicadas para o NDWI têm seus resultados dispostos na sequência. A primeira combinação ocorreu entre as bandas espectrais verde (banda 3) e SWIR (banda 6), chamada neste trabalho de $NDWI_{36}$. Já a segunda combinação ocorreu entre as bandas verde (banda 3) e NIR (banda 5), com produto denominado como $NDWI_{35}$. Como relatado por Ji, Zhang e Wylie (2009), ocorreu um excelente realce dos corpos hídricos nos produtos, como pode ser verificado na Figura 38 ($NDWI_{36}$) e na Figura 39 ($NDWI_{35}$).

Figura 38 - Produto da aplicação $NDWI_{36}$.



Fonte: O Autor, 2018.

Figura 39 - Produto da aplicação NDWI₃₅.



Fonte: O Autor, 2018.

Apesar dos bons resultados obtidos com os produtos do NDWI, apenas um tinha que ser escolhido para a classificação e extração dos corpos d'água. Para isso, o critério de escolha foi baseado nos resultados de pesquisas anteriores que comparam os produtos obtidos pelas duas formulações. O trabalho de Ji, Zhang e Wylie (2009) comparou os resultados obtidos pelos índices e concluiu que o NDWI₃₆ apresentou os limites dos espelhos d'água mais estáveis, recomendando-o para o mapeamento de corpos hídricos.

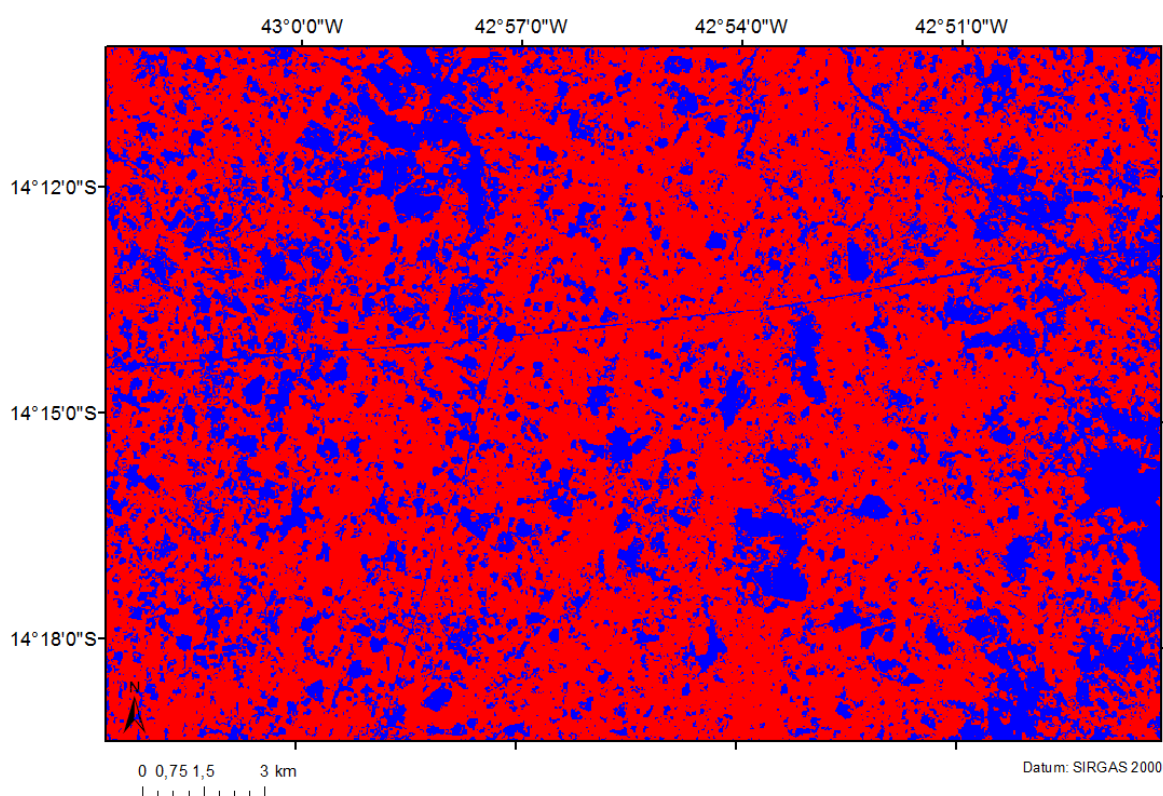
Diante do exposto, a composição NDWI₃₆ foi aquela que apresentou o melhor realce dos corpos hídricos, sendo este o produto utilizado na classificação e extração. Os resultados de tais processos estão apresentados na seção seguinte.

4.1.3 Classificação das imagens e extração dos espelhos d'água

A classificação do produto NDWI₃₆ foi realizada por um método não supervisionado e outro supervisionado, conforme exposto na seção 3.3.2. Para o método não supervisionado (K-médias) os resultados não foram satisfatórios, na

qual houve muita interferência entre as classes, principalmente devido a grande extensão da área de estudo. Para classificação água e não água, o método K-médias mostrou melhor eficácia quando aplicada em pequenas áreas, onde o recorte é realizado sobre um corpo hídrico, como, por exemplo, um recorte de um reservatório de médio porte. Para extração de espelhos d'água de pequeno porte, tal método não foi eficaz, o qual é exibido na Figura 40.

Figura 40 - Produto da classificação não supervisionada K-médias.



Fonte: O Autor, 2018.

A classificação supervisionada (Maxver-ICM) apresentou os resultados esperados, ou seja, uma classificação que permitiu separar os corpos hídricos dos demais elementos. A análise de amostra não apresentou nenhuma rejeição das amostras coletadas, como destacado na Figura 41. Desta forma, não houve confusão na classificação da imagem. O produto da classificação está exposto na Figura 42. Vale destacar que tal produto ainda apresentava ruídos, os quais foram tratados após a extração.

Figura 41 - Classificação das amostras do método Maxver-ICM.

Análise de Amostras: ☒ Aquisição ☐ Teste

Desempenho Médio: 100.00 %

Abstenção Média: 0.00 %

Confusão Média: 0.00 %

Temas

Nome	Núm.Total de Pixels	Matriz de Confusão do Tema
Agua	2	Agua 100.00 %% Rejeição 0.00 %%

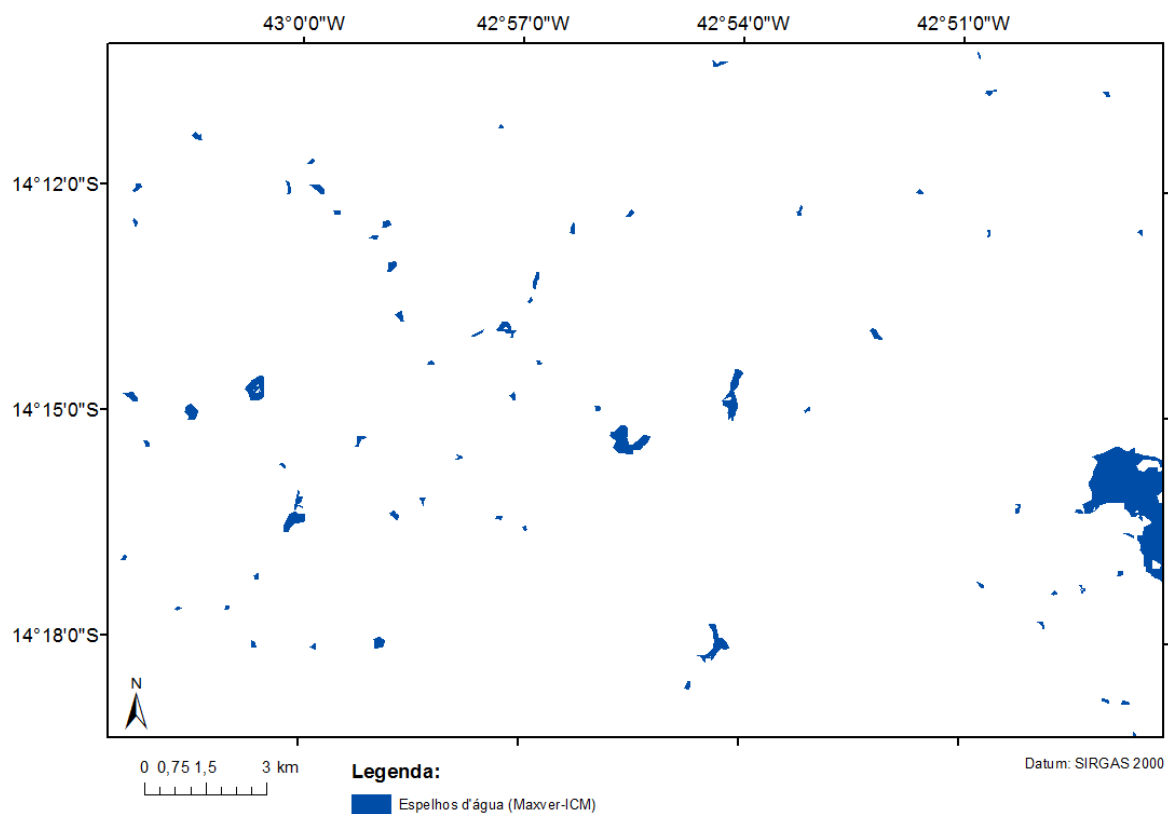
Amostras

Nome	Num.de Pixels	Matriz de Confusão da Amostra
Amostra1	2	Agua 100.00 %% Rejeição 0.00 %%
Amostra2	2	
Amostra3	2	
Amostra4	2	
Amostra5	2	
Amostra6	2	

Salvar... Fechar Ajuda

Fonte: Adaptado do *software* Spring 5.5.1.

Figura 42 - Produto da classificação supervisionada Maxver-ICM.



Fonte: O Autor, 2018.

A extração dos espelhos d'água resultou em um produto tipo *raster*, que foi transformando em um vetor que contabilizou 20.136 elementos, dos quais 17.759 (88%) tinham área menor que um ha. Outros 1.055 (5%) apresentaram área variando entre um e dois hectares e 420 (2%) entre dois e três hectares. Tal distribuição está exposta na Tabela 14.

Tabela 14 - Extração dos espelhos d'água em função da área.

Área (ha)	Quantidade	%
0,0 - 1,0	17.759	88,2%
1,0 - 2,0	1.055	5,2%
2,0 - 3,0	420	2,1%
3,0 - 4,0	230	1,1%
4,0 - 5,0	164	0,8%
5,0 - 10,0	287	1,4%
10,0 - 15,0	80	0,4%
15,0 - 20,0	45	0,2%
20,0 - 40,0	61	0,3%
40,0 - 60,0	15	0,1%
60,0 - 80,0	6	0,0%
80,0 - 100,0	3	0,0%
> 100,0	11	0,1%
Total	20.136	100,0%

Fonte: O Autor, 2018.

Os espelhos d'água expostos na Tabela 14 incluem reservatórios, rios, segmentos de rios, lagoas marginais e ruídos da classificação. Então, não são os resultados conclusivos da área de superfície de reservatórios da região de estudo. Para tal fim, os dados precisaram ser validados.

4.1.4 Avaliação da extração dos espelhos d'água

A avaliação consistiu em eliminar os ruídos da classificação e em retirar os reservatórios de grande porte. O primeiro objetivo iniciou com a exclusão dos reservatórios com área menor que um ha, conforme critérios dispostos na seção 3.3.3. Assim, restaram 2.379 espelhos d'água, os quais foram analisados um a um, comparando-os com a imagem da composição colorida falsa cor. Tal comparação separou os objetos em 5 grupos (Tabela 15): reservatório, lagoa marginal, rio, nuvem e ruído.

Tabela 15 - Avaliação da extração dos espelhos d'água em função da comparação com a imagem de composição em falsa cor.

Avaliação	Quantidade	%
Reservatório	1.162	48,8%
Lagoa Marginal	536	22,5%
Rio	425	17,9%
Nuvem	51	2,1%
Ruído	205	8,6%
Total	2.379	100,0%

Fonte: O Autor, 2018.

Do resultado apresentado na Tabela 15, observou-se que 1.162 (49%) objetos correspondiam aos reservatórios, 536 (22%) às lagoas marginais, 425 (18%) aos rios e fragmentos de rio, 205 (9%) aos ruídos e 51 (2%) às nuvens. Vale destacar que aproximadamente 90% dos elementos correspondiam a corpos hídricos (reservatórios, rios e lagoas marginais), comprovando a eficácia da combinação do NDWI com a classificação Maxver-ICM para detecção e extração de corpos hídricos, métodos utilizados nesta pesquisa.

O último critério de avaliação aplicado foi eliminar os reservatórios com área superior a 80 ha. Deste modo, restaram 1.157 reservatórios de pequeno porte na área de estudo, área de estudo, com distribuição em função da área expostos na Tabela 16 e na Fonte: O Autor, 2018.

Figura 43. Nota-se que cerca de 515 (45%) reservatórios da área de estudo tem sua área de espelho d'água entre 1,0 e 2,0 ha e 208 (18%) entre 2,0 e 3,0 ha. Vale destacar que 920 (79%) dos espelhos d'águas tiveram suas áreas limitadas até 5 ha, e se este limite for elevado até 10 ha, a representatividade da amostra chega a 1.065 (92%) unidades, evidenciado pelo gráfico da distribuição dos espelhos d'água (Fonte: O Autor, 2018).

Figura 43). Assim, fica comprovado que a grande maioria dos espelhos d'água da região de estudo tem suas áreas entre 1,0 e 10,0 ha, sendo assim, a existência de uma grande quantidade de pequenos açudes.

Segundo CBHSF (2016), a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Carinhanha, medida através da Q_{90} , era de 93,1 m³/s, enquanto as demais bacias (rio Casa Velha, rio das Rãs, rio Carnaíba de fora, riacho Santana, riacho do ramalho, riacho das Lagoas e Riacho das Pitubas) apresentavam esta componente zerada. Tal fator pode ter influenciado na distribuição das pequenas barragens.

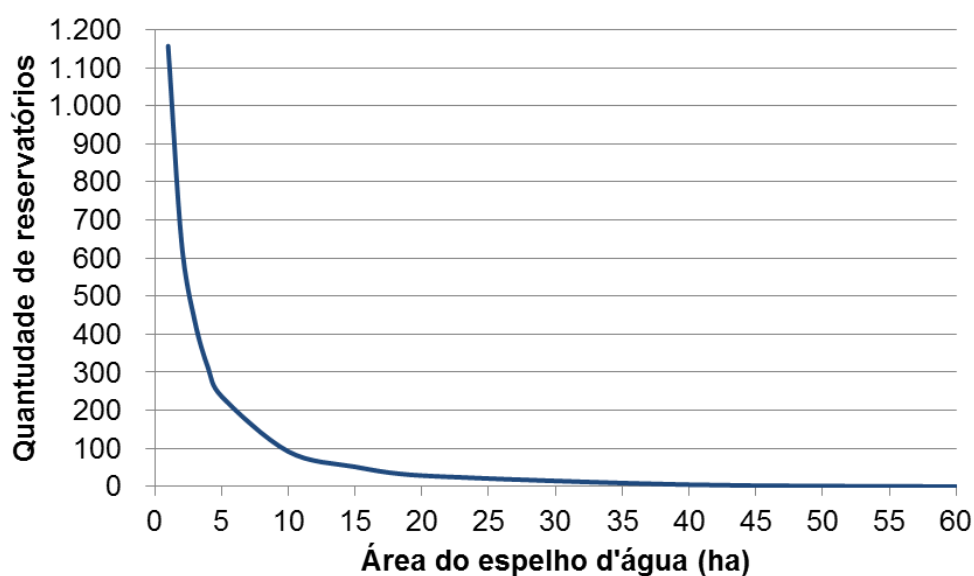
Tabela 16 - Resultado da avaliação da extração dos espelhos d'água.

Área (ha)	Quantidade	%
------------------	-------------------	----------

1,0 - 2,0	515	44,5%
2,0 - 3,0	208	18,0%
3,0 - 4,0	123	10,6%
4,0 - 5,0	74	6,4%
5,0 - 10,0	145	12,5%
10,0 - 15,0	40	3,5%
15,0 - 20,0	23	2,0%
20,0 - 40,0	24	2,1%
40,0 - 60,0	5	0,4%
60,0 - 80,0	0	0,0%
Total	1.157	100,0%

Fonte: O Autor, 2018.

Figura 43 - Distribuição em função da área dos espelhos d'água.



Fonte: O Autor, 2018.

Regiões com disponibilidade hídrica reduzida tendem a ter uma maior concentração de pequenos reservatórios, como destacado no início deste texto. Assim, a bacia hidrográfica do rio das Rãs apresentou uma maior concentração de reservatórios (701), seguida por Pitubas (220) e Casa Velha (130), as quais podem ser visualizadas na Tabela 17. Em todas as bacias, a maioria dos espelhos d'água têm entre 1,0 a 5,0 ha (Fonte: O Autor, 2018).

Tabela 18), sobretudo os da bacia de Santana.

Tabela 17 - Quantidade de reservatório por bacia hidrográfica em função da área do espelho d'água.

Área (ha)	Carinhanha	Casa Velha	Rãs	Pitubas	Santana
-----------	------------	------------	-----	---------	---------

1,0 - 2,0	55	46	321	85	8
2,0 - 3,0	8	26	126	48	0
3,0 - 4,0	13	12	74	23	1
4,0 - 5,0	7	13	45	9	0
5,0 - 10,0	11	19	76	39	0
10,0 - 15,0	1	7	27	5	0
15,0 - 20,0	0	3	14	5	1
20,0 - 40,0	0	3	16	5	0
40,0 - 60,0	0	1	2	1	1
60,0 - 80,0	0	0	0	0	0
Total	95	130	701	220	11

Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 18 - Percentual de reservatório por bacia hidrográfica em função da área do espelho d'água.

Área (ha)	Carinhanha	Casa Velha	Rãs	Pitubas	Santana
1,0 - 2,0	57,9%	35,4%	45,8%	38,6%	72,7%
2,0 - 3,0	8,4%	20,0%	18,0%	21,8%	0,0%
3,0 - 4,0	13,7%	9,2%	10,6%	10,5%	9,1%
4,0 - 5,0	7,4%	10,0%	6,4%	4,1%	0,0%
5,0 - 10,0	11,6%	14,6%	10,8%	17,7%	0,0%
10,0 - 15,0	1,1%	5,4%	3,9%	2,3%	0,0%
15,0 - 20,0	0,0%	2,3%	2,0%	2,3%	9,1%
20,0 - 40,0	0,0%	2,3%	2,3%	2,3%	0,0%
40,0 - 60,0	0,0%	0,8%	0,3%	0,5%	9,1%
60,0 - 80,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Fonte: O Autor, 2018.

Outro dado a ser observado corresponde à densidade de reservatório por km² em cada bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica do rio das Rãs apresentou a maior densidade de pequenos reservatórios, aproximadamente 93 reservatórios a cada 1.000 km² da bacia, seguido por Casa Velha, 46 açudes a cada 1.000 km², e Pitubas, 41 a cada 1.000 km². Novamente a relação disponibilidade hídrica e quantidade de reservatórios mostrou-se verdadeira, uma vez que Carinhanha apresentou a menor densidade de reservatórios. Analisando toda a área de estudo, a densidade de reservatórios era cerca de 34 reservatórios por 1.000 km².

O trabalho Mapeamento dos Espelhos D'água do Brasil (ANA, 2016) levantou os espelhos d'água de todo o país com área superior a 20 ha, e na região semiárida com área superior a 5 ha. Para a área de estudo, foram identificadas no referido estudo 179 espelhos d'água, dos quais 25 (14%) tinha uma área maior do que 80 ha. A Tabela 20 expõe a extração dos espelhos d'água da ANA (2016). A partir

desta foi possível observar que não houve registro de espelhos com área menor que 20 ha, os quais obtiveram a maioria da extração com área entre 20 e 40 ha (57%).

Tabela 19 - Densidade de reservatórios a cada 1.000 km² por bacia hidrográfica.

Bacia Hidrográfica	Área (km ²)	Quantidade	Densidade (Qtde/1.000km ²)
Carinhanha	17.183	95	5,529
Casa Velha	2.846	130	45,670
Rãs	7.513	701	93,303
Pitubas	5.358	220	41,057
Santana	1.566	11	7,024
Total	34.467	1.157	33,568

Fonte: O Autor, 2018.

Vale ressaltar que neste estudo são considerados os espelhos d'águas naturais (lagos, lagoas, lagoas marginais, etc.) e artificiais (reservatório, açudes, etc.). Por este motivo, o número de espelhos é bem superior para certos limites de área ao apresentado nesta pesquisa, como, por exemplo, para o limite entre 20 e 40 ha.

Tabela 20 - Extração dos Espelhos D'água do Brasil (ANA, 2016).

Área (ha)	Quantidade	%
1,0 - 2,0	0	0,0%
2,0 - 3,0	0	0,0%
3,0 - 4,0	0	0,0%
4,0 - 5,0	0	0,0%
5,0 - 10,0	0	0,0%
10,0 - 15,0	0	0,0%
15,0 - 20,0	1	0,6%
20,0 - 40,0	102	57,0%
40,0 - 60,0	36	20,1%
60,0 - 80,0	15	8,4%
> 80,0	25	14,0%
Total	179	100,0%

Fonte: Adaptado de ANA (2016).

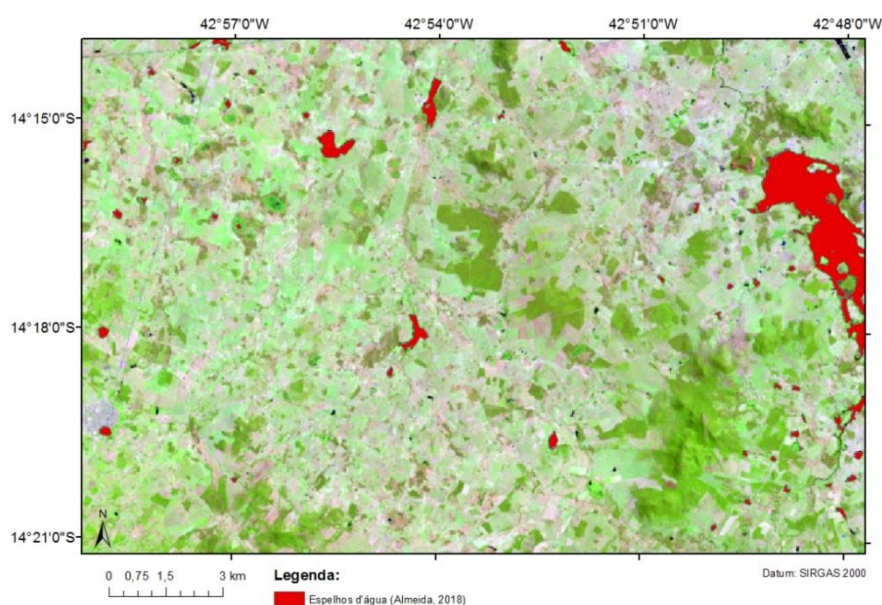
A Figura 44 e a Fonte: O Autor, 2018.

Figura 45 dispõem de dois exemplos da comparação entre os resultados de ANA (2016) e o atual trabalho. Na primeira, é possível observar que a extração realizada neste trabalho conseguiu identificar um maior número de reservatórios, principalmente àqueles de menor porte. Porém, até para o reservatório de médio

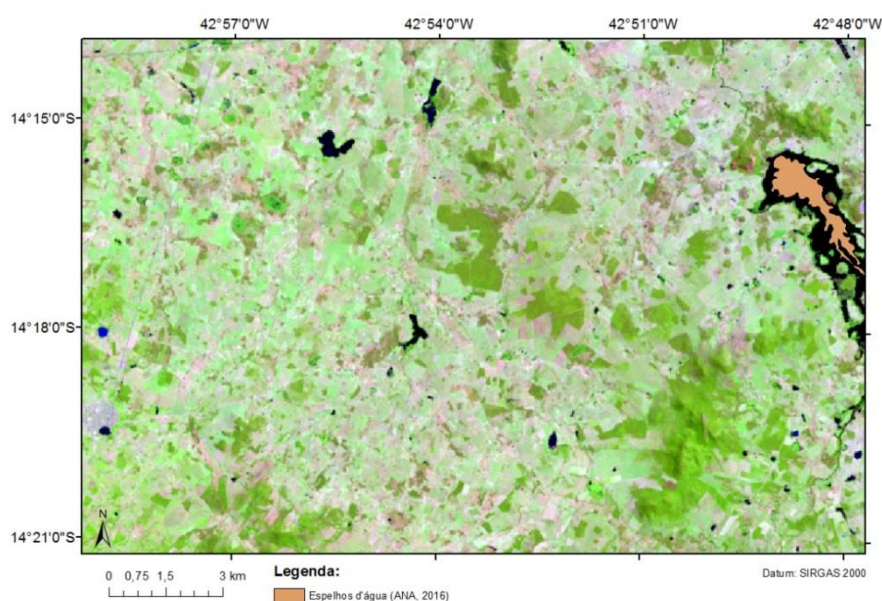
porte, foi possível notar que o resultado apresentado por ANA (2016) subestima a área do espelho d'água. Já a segunda figura apresenta o outro ponto discutido anteriormente, o referente à catalogação dos espelhos d'água naturais. Foi possível observar que os espelhos levantados por ANA (2016) abrangeu principalmente os de origem natural.

Figura 44 - Comparação entre ANA (2016) e atual pesquisa - Exemplo 1.

(a) Extração de espelhos d'água segundo a atual pesquisa.



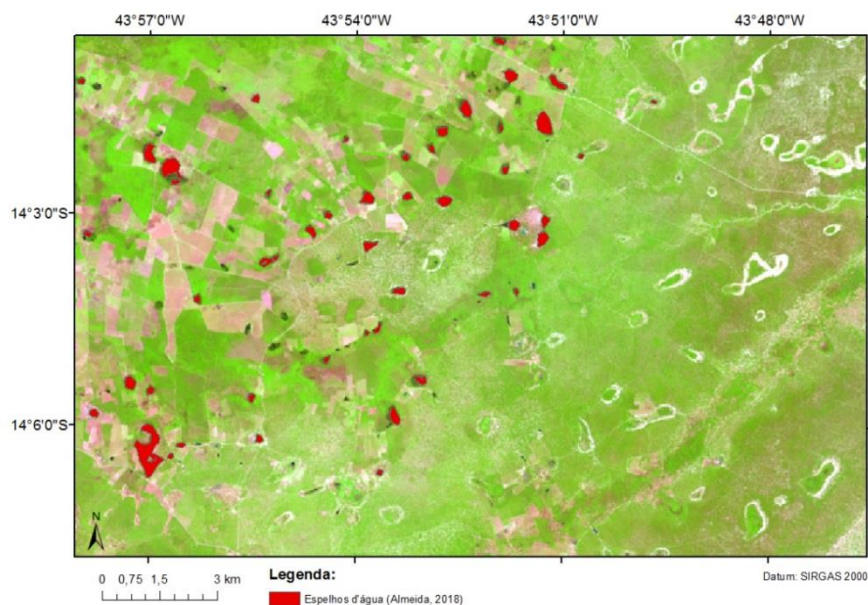
(b) Extração de espelhos d'água segundo ANA (2016).



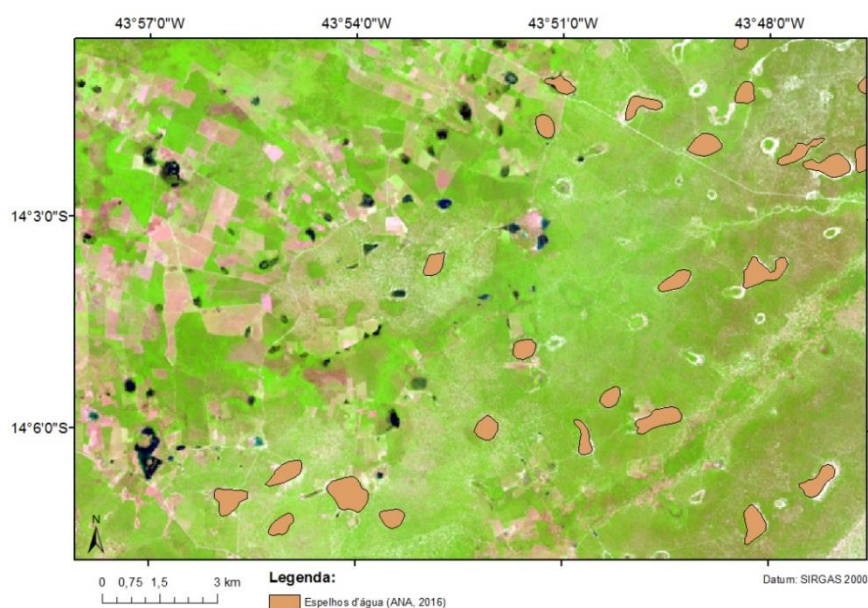
Fonte: O Autor, 2018.

Figura 45 - Comparação entre ANA (2016) e atual pesquisa - Exemplo 2.

(a) Extração de espelhos d'água segundo a atual pesquisa.



(b) Extração de espelhos d'água segundo ANA (2016).



Fonte: O Autor, 2018.

Diante dos resultados expostos, a extração do espelho d'água de pequenos reservatórios realizada nesta pesquisa mostrou eficácia, identificando reservatórios a partir de 1,0 ha. A maior quantidade de reservatórios extraídos continha área variando de 1,0 a 5,0 ha, algo em torno de 79% dos espelhos d'água. Uma maior densidade de pequenos reservatórios por área ocorreu nas bacias com menor disponibilidade hídrica (Q_{90}), comprovando que há uma cultura de armazenamento

em regiões com maior déficit hídrico. A comparação dos resultados obtidos nesta pesquisa com outro estudo confirmou a boa qualidade destes, principalmente na extração de espelhos d'água com área menor que 20 ha.

4.2 Capacidade de armazenamento de pequenos reservatórios

Os resultados a respeito da capacidade de acumulação de água dos pequenos reservatórios são expostos nesta seção. Também é apresentada a declividade do leito dos cursos hídricos que estão localizados os reservatórios, abordado na sequência.

4.2.1 Declividade do leito dos cursos hídricos

A declividade dos leitos dos cursos hídricos, nos quais os reservatórios estão inseridos, foi obtida a partir do produto do TOPODATA (INPE, 2018). Assim, foi possível consultar o mapa de declividade da área de estudo, sobretudo dos cursos hídricos. Um exemplo da declividade extraída para os centroides dos reservatórios pode ser observado na Tabela 21. Nesta, a declividade varia de 2,8% a 10,3%.

Adicionado este elemento às informações já dispostas na seção 4.1.4, foi possível utilizar os métodos existentes para estimativa do volume dos pequenos reservatórios.

Tabela 21 - Amostra da declividade no cnetróide dos reservatórios.

Nº Reserv.	Area (ha)	Decliv. (%)	Sub-bacia	Bacia Hidrog.
272	1,00	2,835	W649	Rãs
165	1,00	3,423	W1440	Rãs
964	1,00	2,640	W5400	Rãs
994	1,01	2,034	W5940	Casa Velha
1046	1,01	3,309	W5940	Casa Velha
1047	1,01	3,032	W5400	Rãs
487	1,01	1,996	W5400	Rãs
327	1,01	10,345	W1499	Pitubas
610	1,01	3,769	W5400	Rãs
399	1,01	3,052	W1350	Rãs
734	1,01	4,935	W1550	Pitubas

Fonte: O Autor, 2018.

4.2.2 Volume dos reservatórios

O cálculo do volume dos reservatórios foi realizado através de dois métodos. O primeiro considerou apenas a área do espelho d'água, enquanto o segundo considerou também a declividade do leito barrado. Os resultados apontaram que a divergência de resultado foi elevada na maioria dos casos, chegando o segundo método a ter resultado 5 vezes maior que o primeiro.

Analizando individualmente cada método, foi constatado que aquele que considera também a declividade dos leitos dos rios não apresentou coerência nos resultados, onde reservatórios com áreas muito menores que outros obtiveram um volume maior, resultado influenciado pela declividade utilizada, como pode ser notado na Tabela 22. Assim, concluiu-se que a extração da declividade através de um mapa apresenta um elevado nível de incerteza do seu valor, devido à escala dos dados de origem deste mapa, no caso SRTM com 30 metros de resolução (1 arco de segundo). Para o uso do segundo método recomenda-se neste trabalho que a declividade utilizada seja obtida *in loco* ou através de MDE de alta precisão.

Tabela 22 - Amostra dos volumes estimados dos reservatórios.

Nº Reserv.	Área (ha)	Decliv. (%)	Sub-bacia	Bacia hidrog.	Volume 1 Sx (m³)	Volume 2 Sx.DM (m³)	Difer. (%) (V1-V2)/V1
602	3,055	0,973	W4350	Carinhanha	52.960,71	24.335,52	+54
840	3,056	2,404	W5400	Rãs	52.987,18	60.126,58	-13
330	3,063	2,716	W1550	Pitubas	53.134,48	68.151,29	-28
628	3,064	1,697	W5400	Rãs	53.156,51	42.589,92	+20
109	3,082	1,423	W1350	Rãs	53.563,07	36.002,62	+33
251	5,671	2,376	W1550	Pitubas	114.158,75	136.766,47	-20
637	5,679	1,935	W650	Rãs	114.358,30	111.611,53	+02
293	5,733	3,274	W1350	Rãs	115.672,68	191.219,10	-65
503	5,749	3,946	W5400	Rãs	116.077,11	231.377,36	-99
1005	5,75	3,948	W5400	Rãs	116.099,33	231.545,07	-99

Fonte: O Autor, 2018.

Diante dos argumentos apresentados anteriormente, o volume dos reservatórios adotado neste trabalho corresponde aquele definido apenas de área do espelho d'água. Tais valores foram utilizados na sequência desta pesquisa.

4.2.3 Informações equivalentes por sub-bacias

Neste trabalho, os dados de área de espelho d'água e volume foram agrupados por sub-bacia. Ou seja, foram criadas informações equivalentes destas variáveis para representar o conjunto de reservatórios inseridos em determinada sub-bacia. Ocorreram casos de sub-bacia sem nenhum reservatório, principalmente na bacia hidrográfica do rio Carinhanha, na qual a densidade de reservatórios foi menor.

A Tabela 23 dispõe das informações equivalentes para todas as sub-bacias. Destaca-se a sub-bacia W1350 e W5400 com a maior quantidade de reservatórios, 177 e 374, respectivamente, ambas na bacia do rio das Rãs. Consequentemente, estas bacias apresentaram as maiores áreas de espelho d'água acumulada e volume acumulado. É importante destacar o volume acumulado destas sub-bacias, das quais 13 têm um volume maior do que 1 hm³, tendo assim uma grande capacidade de interceptar o escoamento superficial.

Tabela 23 - Informações de área e volume equivalentes por sub-bacia.

Sub-bacia	Bacia Hidrog.	AD (km ²)	Qtd. Reser.	A _{eq.} (ha)	V _{eq.} (hm ³)
W1350	Rãs	2.245,8	177	707,75	13,825
W1440	Rãs	930,6	29	240,81	5,242
W1499	Pitubas	1.326,3	54	225,33	4,424
W1500	Pitubas	88,4	-	-	-
W1550	Pitubas	1.164,2	133	603,73	12,050
W1590	Pitubas	95,4	4	16,97	0,336
W1640	Santana	391,9	3	4,33	0,056
W1650	Pitubas	752,6	12	67,34	1,448
W1700	Santana	1.078,2	7	82,20	1,778
W2440	Casa Velha	1.227,8	34	123,91	2,390
W2490	Carinhanha	159,4	2	7,58	0,139
W2639	Carinhanha	102,4	3	9,19	0,166
W2640	Carinhanha	64,9	5	13,71	0,243
W3390	Carinhanha	1.546,9	1	4,76	0,092
W3900	Carinhanha	1.965,1	4	15,35	0,298
W4349	Carinhanha	16,9	1	1,83	0,027
W4350	Carinhanha	931,8	22	71,43	1,301
W4440	Carinhanha	370,5	23	55,18	0,930
W4840	Carinhanha	1.207,9	-	-	-
W5190	Carinhanha	786,3	-	-	-
W5200	Carinhanha	829,7	3	4,30	0,056

Tabela 24 - Informações de área e volume equivalentes por sub-bacia (continuação).

Sub-bacia	Bacia Hidrog.	AD (km²)	Qtd. Reser.	A _{eq.} (ha)	V _{eq.} (hm³)
W530	Santana	96,0	1	1,42	0,018
W5400	Rãs	2.573,2	374	1280,27	24,308
W5440	Carinhanha	1.694,2	-	-	-
W5490	Carinhanha	281,9	3	6,27	0,098
W5499	Carinhanha	428,9	-	-	-
W5500	Carinhanha	177,7	3	4,56	0,062
W560	Rãs	493,3	9	27,15	0,476
W590	Rãs	290,6	9	32,02	0,609
W5940	Casa Velha	1.618,7	96	515,14	10,516
W5990	Carinhanha	386,9	-	-	-
W600	Rãs	260,7	3	4,38	0,058
W6000	Carinhanha	751,0	-	-	-
W6049	Carinhanha	4.168,0	2	7,18	0,135
W6050	Carinhanha	121,2	-	-	-
W649	Rãs	83,7	17	112,11	2,448
W650	Rãs	635,3	83	419,34	8,461
W710	Carinhanha	474,4	18	45,41	0,773
W719	Carinhanha	103,1	1	3,83	0,071
W720	Carinhanha	613,8	4	7,22	0,105
W7209	Pitubas	41,2	1	1,49	0,020
W7210	Pitubas	777,8	12	31,55	0,551
W7220	Pitubas	1.112,6	4	10,47	0,180

Fonte: O Autor, 2018.

Examinando tais informações por bacia hidrográfica (Tabela 24), é possível observar que a bacia do rio das Rãs é aquela com o maior volume equivalente, aproximadamente 55 hm³. A bacia do rio Pitubas dispôs de um volume de 19 hm³, Casa Velha de 13 hm³, Carinhanha de 4 hm³ e Santana de 2 hm³.

Tabela 24 - Informações equivalentes de área e volume por bacia hidrográfica.

Bacia	AD (km²)	Qtd Reser.	A _{eq.} (ha)	V _{eq.} (hm³)
Carinhanha	17.182,8	95	257,8	4,494
Casa Velha	2.846,5	130	639,1	12,907
Rãs	7.513,1	701	2.823,8	55,426
Santana	1.566,1	11	88,0	1,852
Pitubas	5.358,4	220	956,9	19,008

Fonte: O Autor, 2018.

Portanto, com as informações de volume e área máxima para cada reservatório e por sub-bacia, foi finalizada esta etapa do trabalho. Os dados obtidos foram utilizados na modelagem hidrológica, que seus resultados serão expostos na

sequência. Pôde-se observar que a capacidade de interceptação do escoamento na área de estudo é elevada para a maioria das sub-bacias, como a bacia do rio das Rãs e do riacho Pitubas. A primeira tem uma área de drenagem de 2.846,5 km² e pequenos reservatórios com a capacidade de armazenar 55 hm³. Já na bacia do riacho Pitubas a situação é similar, tem reservatórios que acumulam 19 hm³ numa área de drenagem de 5.358,4 km². Logo, tais interceptações podem influenciar diretamente na vazão que tais bacias incrementam no rio São Francisco.

4.3 Modelagem hidrológica

A modelagem foi desenvolvida para representar as características hidrológicas da região de estudo, sobretudo acerca dos componentes hidrológicos das bacias hidrográficas. Logo, os parâmetros de cada componente visaram representar, com a maior eficácia possível, a realidade das bacias hidrográficas e rios. Tal representação foi realizada seguindo os procedimentos da seção 3.5, cujos resultados são expostos na sequência.

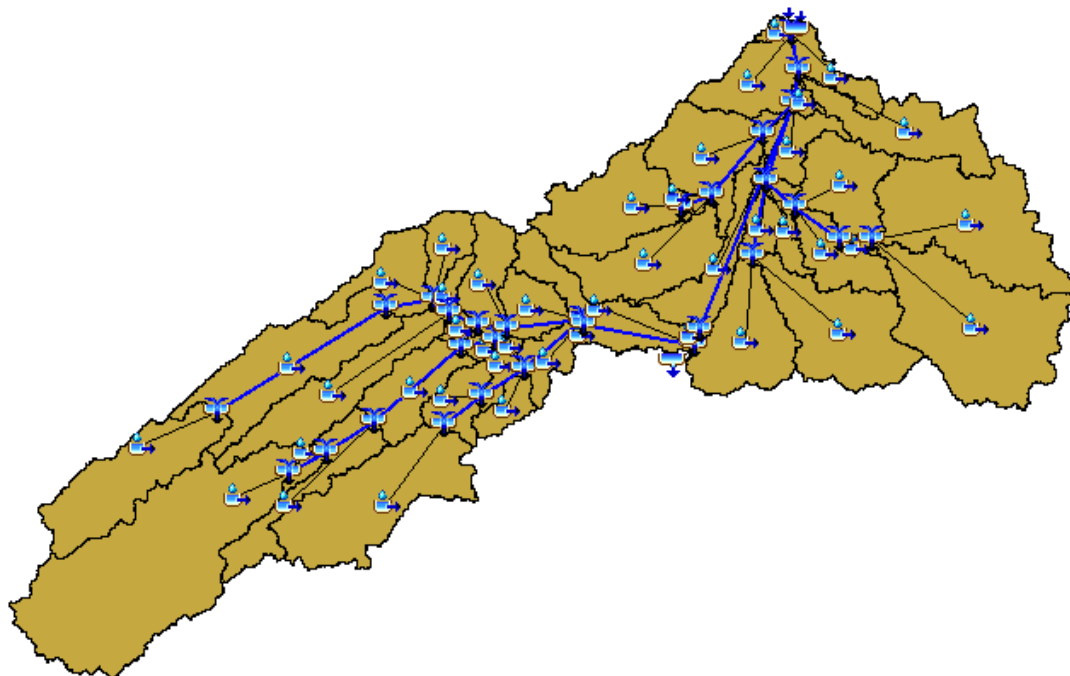
4.3.1 Modelo geoespacial

A modelagem geoespacial da área de estudo foi realizada em uma plataforma SIG, a que permitiu a representação da área de estudo e seus componentes. Assim, foram representadas as bacias hidrográficas e suas sub-bacias, as mesmas apresentadas anteriormente. Os principais parâmetros das sub-bacias e rios também foram delimitados, tais como área de drenagem, extensão do maior curso de rio, declividade do rio, declividade da sub-bacia, entre outros. As estações pluviométricas também foram inseridas no modelo geoespacial.

A importação do modelo geoespacial foi realizada no HEC-HMS. Os três componentes principais representados no modelo, até esta etapa, foram: sub-bacias, junções e trechos de rios. As sub-bacias foram responsáveis por gerar o escoamento (superficial e subterrâneo) que foram ligados a jusante às junções e rios. Os trechos de rios conduzem o escoamento obrigatoriamente às junções. Estes elementos foram dispostos no exutório de cada sub-bacia, para receber o escoamento de uma ou mais bacia e/ou de um ou mais rio, tendo uma ligação a

jusante para um trecho de rio ou outra junção. A representação da área de estudo no HEC-HMS pode ser visualizada na Figura 46.

Figura 46 - Representação da área de estudo no modelo HEC-HMS.



Fonte: O Autor, 2018.

Com a área de estudo modelada no HEC-HMS, foi possível realizar os ajustes dos parâmetros hidrológicos, cujos resultados são apresentados na seção seguinte.

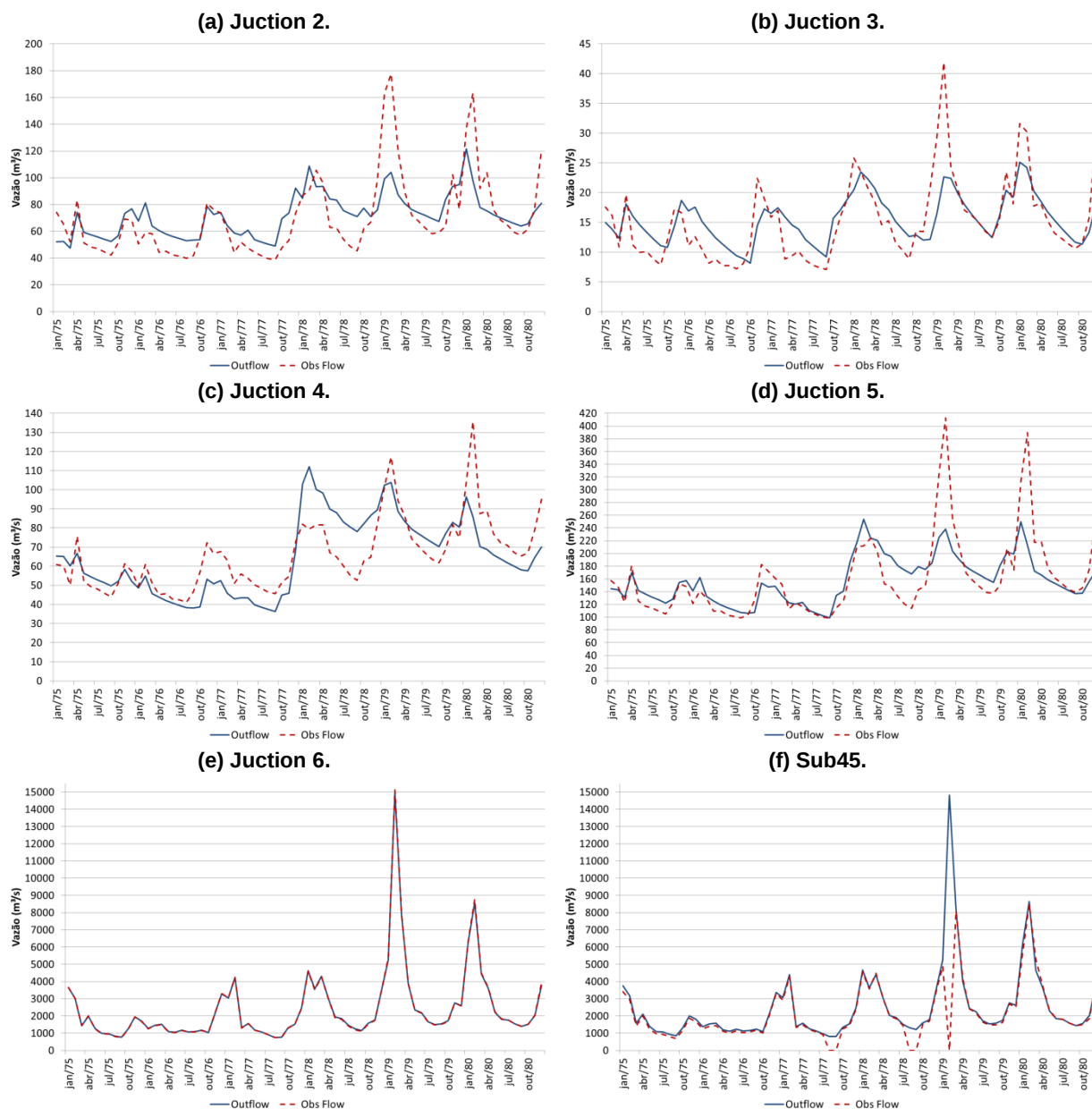
4.3.2 Ajuste dos parâmetros hidrológicos

O ajuste dos parâmetros hidrológicos aconteceu em duas etapas. A primeira correspondeu à calibração, cujo período de simulação foi de janeiro de 1975 a dezembro de 1980. A segunda etapa foi a validação, que foi realizada em dois momentos, de janeiro de 1982 a dezembro de 1986 e de janeiro de 1986 a dezembro de 1989.

Para a calibração, houve dificuldade em ajustar os parâmetros hidrológicos para que o resultado fosse considerado satisfatório e/ou aceitável, considerando os trabalhos de Moriasi *et al.* (2007) e Gottschalk e Motovilov (2000). Desta forma, os resultados obtidos para calibração estão apresentados na Figura 47. Nesta pode-se observar que ocorreram diferenças entre os hidrogramas observados (*obs flow*) e sintéticos (*outflow*) em quatro das seis junções. As únicas exceções ocorreram nas

junções que são influenciadas pela vazão pontual do rio São Francisco, inserida a partir da *Junction 6*.

Figura 47 - Calibração do modelo hidrológico (1975-1980).



Fonte: O Autor, 2018.

No processo de calibração foram alterados os parâmetros das dimensões *Loss* e *Baseflow*. As demais dimensões não influenciaram significativamente os resultados das séries sintéticas. As sub-bacias foram agrupadas de forma a integrar a área de influência de cada junção. Assim, o processo de calibração foi realizado para as sub-bacias de cada junção, onde os parâmetros das dimensões foram trabalhados para representar a realidade local. Foi possível observar que as sub-

bacias apresentaram uma significativa contribuição subterrânea para composição de suas vazões. Tal fato pode ser observado nos hidrogramas de calibração e validação, onde há uma permanência na vazão. Também foi possível observar que a taxa de impermeabilização da bacia é muito baixa, sendo menor que 6% em todas as bacias. Os parâmetros adotados na calibração são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Ajuste dos parâmetros após a calibração para as sub-bacias (junções).

Parâmetro	Subparâmetro	Inicial	Juction2	Juction3	Juction4	Juction5	Juction6	Sub45
Canopy	Initial Storage	50	50	50	50	50	50	50
	Max Storage	20	20	20	20	20	20	20
	Crop Coeficient	1	1	1	1	1	1	1
	Uptake Method	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple
Surface	Initial Storage (%)	50	50	50	50	50	50	50
	Max Storage (mm)	10	10	10	10	10	10	10
Loss	Soil	50	50	50	50	50	50	50
	Groundwater 1	50	50	100	50	50	50	50
	Groundwater 2	50	50	50	50	50	50	50
	Max Infiltration	5	5	5	5	5	5	5
	Impervious	5	5,5	1,5	3,4	1	1	1
	Soil Storage	150	200	200	200	200	200	200
	Tension Storage	40	40	45	40	40	40	40
	Soil Percolation	1	4	4	4	4	4	4
	GW 1 Storage	50	100	100	100	100	100	100
	GW 1 Percolation	3	1	1	1	1	1	1
	GW 1 Coefficient	100	100	100	100	100	100	100
	GW 2 Storage	0	0	0	0	0	0	0
	GW 2 Percolation	0	0	0	0	0	0	0
	GW 2 Coefficient	0	0	0	0	0	0	0
Transform Method	Graph type	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
	Lag time (min)	_*	_*	_*	_*	_*	_*	_*
Baseflow	Initial type	DPA**	DPA**	DPA**	DPA**	DPA**	DPA**	DPA**
	Initial Discharge (m3/s /km2)	0,008018	0,008419	0,006424	0,010999	0,005873	0,009016	0,004154
	Initial Discharge (m3/s)	-	-	-	-	-	-	-
	Recession Constant	0,75	0,999	0,997	0,999	0,999	0,999	0,999
	Threshold Type	RP***	RP***	RP***	RP***	RP***	RP***	RP***
	Threshold Flow (m3/s)	-	-	-	-	-	-	-
	Ratio to peak	0,05	0,3	0,6	0,35	0,12	0,05	0,05

*Valores estimados para cada sub-bacia.

**Vazão por área (*discharge per area*).

***Razão para o pico (*ratio to pek*)

Fonte: O Autor, 2018.

É importante ressaltar que as junções utilizadas na calibração e validação correspondem apenas à bacia hidrográfica do rio Carinhanha, uma vez que não havia dados fluviométricos disponíveis para as outras bacias. Deste modo, os parâmetros hidrológicos ajustados para o Carinhanha serão aplicados também para as demais bacias, como exceção da constante de recessão do escoamento

subterrâneo. Segundo CBHSF (2016), a vazão Q_{90} das bacias do rio Casa Velha, rio das Rãs e Riacho Santana é nula, assim não permanência da vazão. Assim, foi inferido neste trabalho que a contribuição do escoamento subterrâneo é mínima para a vazão dos respectivos cursos hídricos. Para a bacia do riacho Pitubas foi mantido a constante de recessão da bacia do rio Carinhanha, uma vez que CBHSF (2016) afirma que a vazão Q_{90} para esta bacia é da ordem de $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os hidrogramas sintéticos gerados para a validação do modelo são dispostos na sequência. Na sequência. Na Figura 48 é exibido aquele referente para o período entre 1982 e 1986 e na Fonte: O Autor, 2018.

Figura 49 o relativo à validação entre 1986 e 1989. Em ambos é possível observar que o hidrograma sintético obteve intervalos de coesão com o observado. Destaque negativo ficou com a validação da *Junction 4*, por apresentar claramente um *gap* entre os hidrogramas observados e sintético.

Os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe para as junções para a calibração e validação são e validação são apresentados na Tabela 26 e na Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 27. Os valores comprovam as observações realizadas sobre os hidrogramas. Apenas a calibração obteve resultado com satisfatório, segundo o grau de aceitação de Moriasi *et al.* (2007). Porém, utilizados os critérios de Gottschalk e Motovilov (2000), as junções 2, 3, 5 e 6 apresentaram resultados aceitáveis para a calibração. Vale ressaltar que as junções *Junction 6* e *Sub45* tiveram suas vazões influenciadas pela vazão do rio São Francisco, por tal motivo apresentaram resultados muito bom, na sua maioria. Em geral, os resultados das validações se mostraram inferiores ao da calibração, sobretudo a validação entre 1982 e 1986. A validação entre 1986 e 1989 apresentou resultado ligeiramente melhor em relação à primeira validação.

É importante ressaltar que o valor Não Satisfatório para a junção *Sub45* ocorreu devido às falhas das séries históricas de vazões observadas nesta seção, ocasionando ausência de coesão entre esta e a série sintética gerada na presente pesquisa.

Avaliando o ajuste com a Diferença de Volumes (Fonte: O Autor, 2018).

Tabela 28), observa-se uma boa aceitação dos resultados obtidos. Para a calibração, a maioria das junções apresentou grau de aceitação Muito Bom, a exceção foi a *Sub45* que apresentou grau Bom. A primeira validação foi aquela que

apresentou os graus de aceitação mais baixos, onde as junções 2, 3 e 5 tiveram sua aceitação com Satisfatório, as junções 6 e Sub45 com Muito Bom e apenas a junção 4 como Não Satisfatório. Para a outra validação, novamente a junção 4 apresentou grau de aceitação inferior as demais, onde as restantes tiveram um grau Muito Bom.

Tabela 26 - Valores do Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a calibração e validação e Grau de Aceitação Segundo Moriasi *et al.* (2007).

Junção	Calibração 1975-1980		Validação 1982-1986		Validação 1986-1989	
	NS	Grau Aceit.	NS	Grau Aceit.	NS	Grau Aceit.
Junction 2	0,547	Satisfatório	0,204	Não Satisf.	0,372	Não Satisf.
Junction 3	0,561	Satisfatório	0,342	Não Satisf.	0,333	Não Satisf.
Junction 4	0,413	Não Satisf.	-2,737	Não Satisf.	-0,374	Não Satisf.
Junction 5	0,574	Satisfatório	-0,022	Não Satisf.	0,427	Não Satisf.
Junction 6	1,000	Muito Bom	0,999	Muito Bom	0,999	Muito Bom
Sub45	-0,171	Não Satisf.	0,988	Muito Bom	0,983	Muito Bom

Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 27 - Valores do Coeficiente de Nash-Sutcliffe para a calibração e validação e Grau de Aceitação segundo Gottschalk e Motovilov (2000).

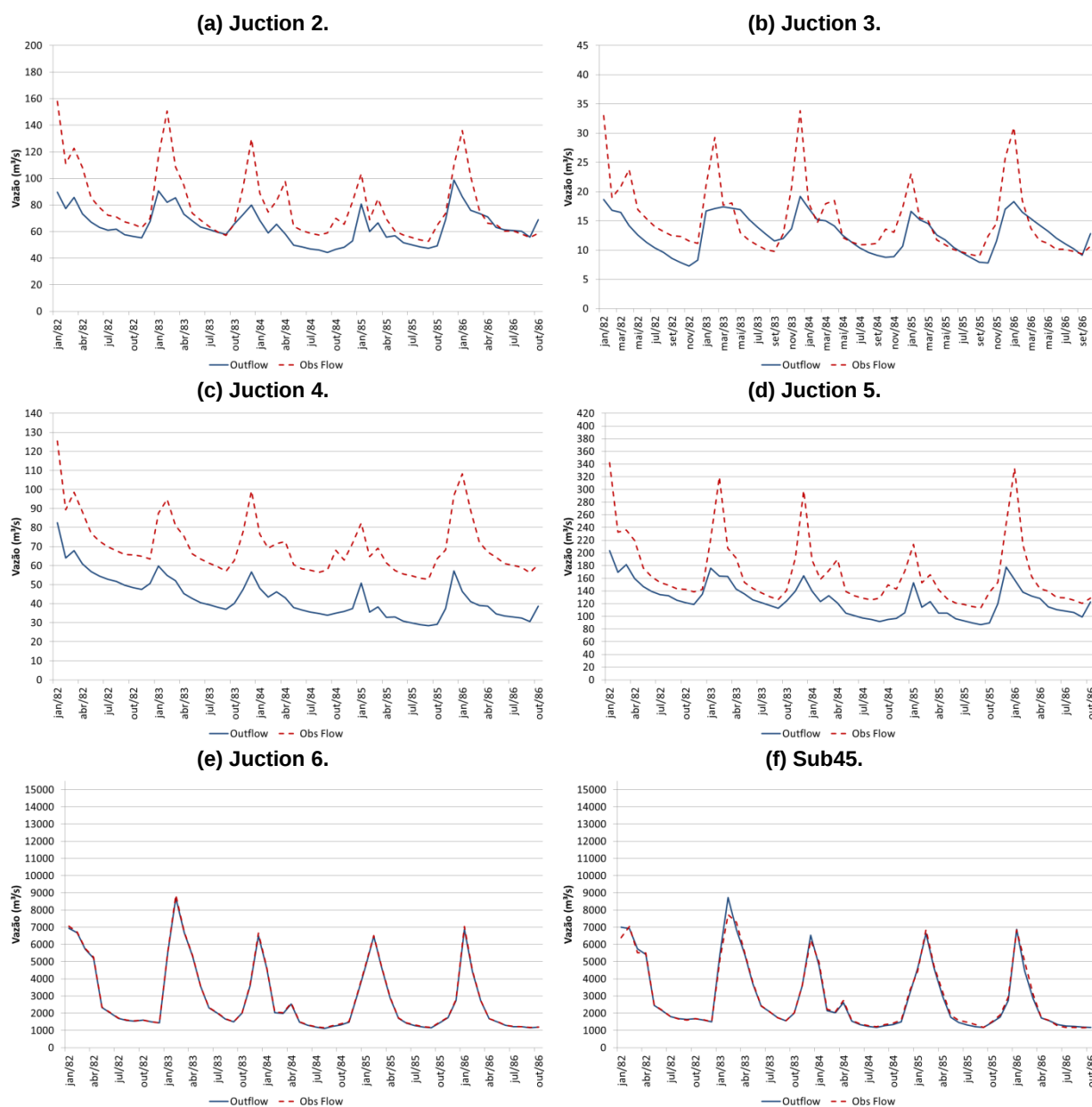
Junção	Calibração 1975-1980		Validação 1982-1986		Validação 1986-1989	
	NS	Grau Aceit.	NS	Grau Aceit.	NS	Grau Aceit.
Junction 2	0,547	Aceitável	0,204	Não Satisf.	0,372	Aceitável
Junction 3	0,561	Aceitável	0,342	Não Satisf.	0,333	Não Satisf.
Junction 4	0,413	Aceitável	-2,737	Não Satisf.	-0,374	Não Satisf.
Junction 5	0,574	Aceitável	-0,022	Não Satisf.	0,427	Aceitável
Junction 6	1,000	Bom	0,999	Bom	0,999	Bom
Sub45	-0,171	Não Satisf.	0,988	Bom	0,983	Bom

Fonte: O Autor, 2018.

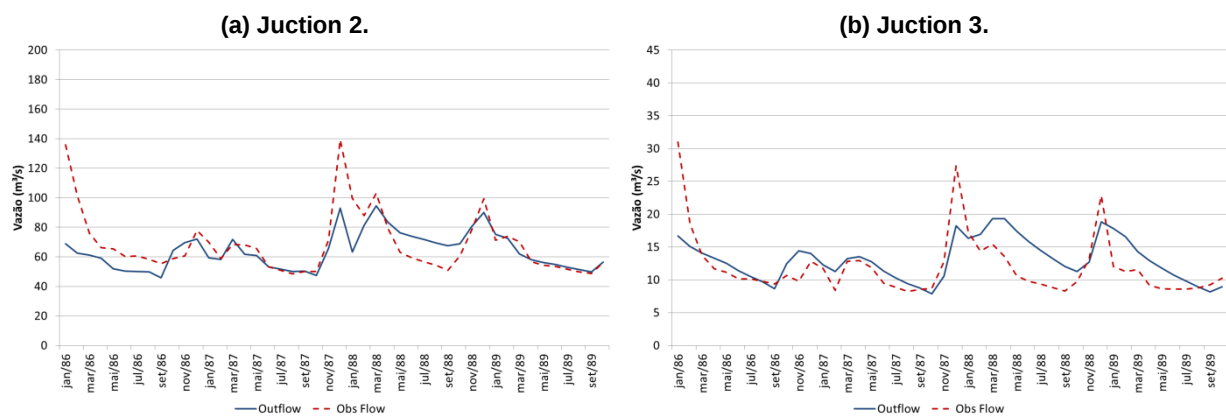
Tabela 28 - Valores da Diferença de Volumes para a calibração e validação e Grau de Aceitação Segundo Moriasi *et al.* (2007).

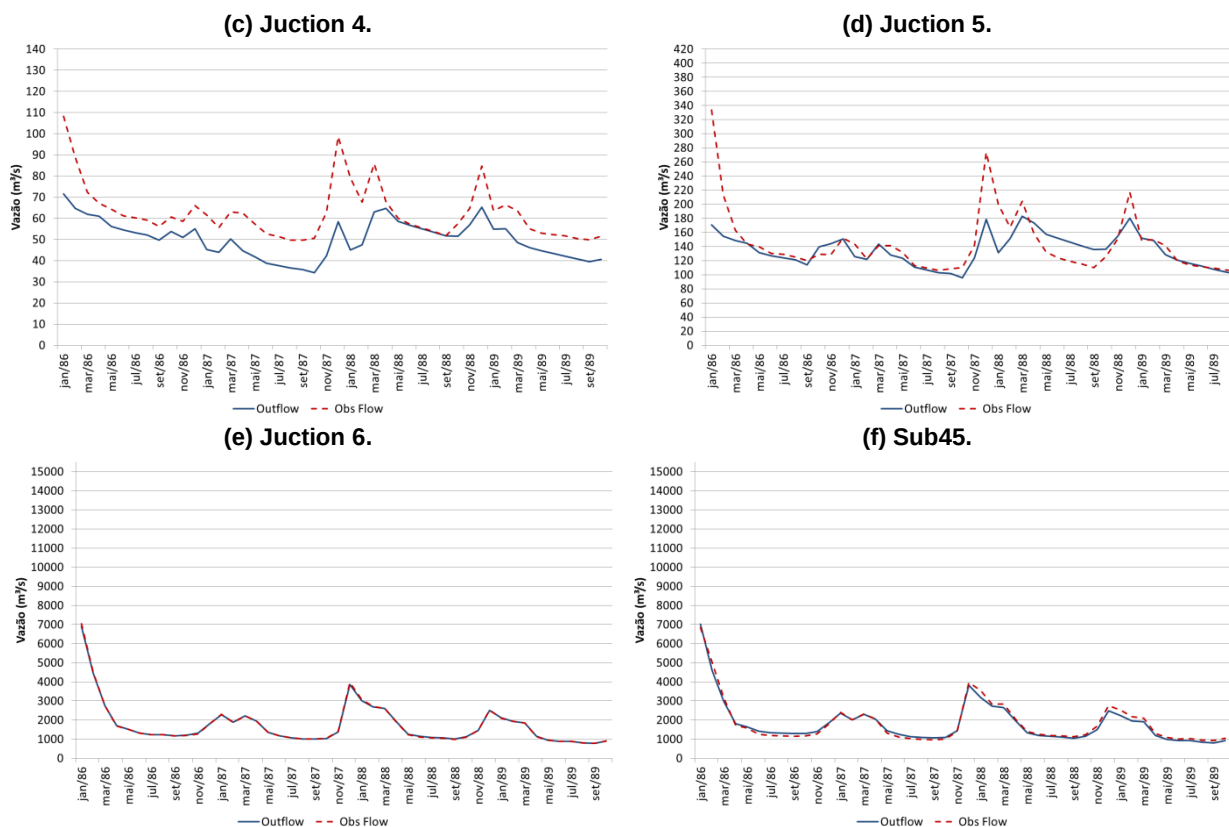
Junção	Calibração 1975-1980		Validação 1982-1986		Validação 1986-1989	
	ΔV	Grau Aceit.	ΔV	Grau Aceit.	ΔV	Grau Aceit.
Junction 2	-2,540	Muito Bom	19,265	Satisfatório	6,664	Muito Bom
Junction 3	-1,887	Muito Bom	15,774	Satisfatório	-8,767	Muito Bom
Junction 4	1,653	Muito Bom	38,684	Não Satisf.	19,482	Satisfatório
Junction 5	1,476	Muito Bom	24,917	Satisfatório	6,404	Muito Bom
Junction 6	-0,046	Muito Bom	1,250	Muito Bom	0,187	Muito Bom
Sub45	-15,709	Satisfatório	0,784	Muito Bom	2,257	Muito Bom

Fonte: O Autor, 2018.

Figura 48 - Validação do modelo hidrológico (1982-1986).

Fonte: O Autor, 2018.

Figura 49 - Validação do modelo hidrológico (1986-1989).



Fonte: O Autor, 2018.

Em termos finais, foi possível observar que apesar de algumas diferenças, o modelo conseguiu simular de forma até consistente, excetuando a junção 4. A dificuldade em aprimorar o modelo pode ser justificada pela qualidade dos dados obtidos, uma vez que é sabida a deficiência de obtenção de dados de qualidade em algumas regiões do país, sobretudo na década de 1980. Outro fator que poderá ser levado em consideração são as características da ferramenta utilizada para a modelagem (HEC-HMS), a qual pode não ser adequada para modelos interanuais de chuva-vazão, principalmente em bacias hidrográficas que apresentam representativa componente de vazão subterrânea. Para obter tais respostas, é necessário se utilizar outras ferramentas de modelagem hidrológica e aplicar os dados utilizados nesta pesquisa.

Portanto, o modelo se apresentou eficácia para uma análise qualitativa, sendo restrito para análise quantitativa para a região hidrográfica de estudo. Logo, a partir deste modelo foi possível indicar tendências na variação da vazão, onde tais mensurações podem estar superestimando ou subestimando os resultados.

4.3.3 Reservatórios equivalentes

Os reservatórios equivalentes foram inseridos no modelo de modo a representar os pequenos açudes identificados. Estes agregaram as informações dos reservatórios em cada sub-bacia, e foram localizados nos exutórios destas. Ocorreram casos de um reservatório associar as informações de mais de uma bacia, como exposto na Tabela 29. Nesta pode ser observado o reservatório equivalente de cada sub-bacia adotado nesta pesquisa.

Tabela 29 - Associação entre as sub-bacias e os reservatórios equivalentes correspondentes.

Sub-bacia	Bacia	Reserv.	Sub-bacia	Bacia	Reserv.	Sub-bacia	Bacia	Reserv.
W1350	Rãs	Res19	W4349	Carinhanha	Res16	W5940	Casa Velha	Res21
W1440	Rãs	Res22	W4350	Carinhanha	Res17	W5990	Carinhanha	Res11
W1499	Pitubas	Res24	W4440	Carinhanha	Res15	W600	Rãs	Res23
W1500	Pitubas	Res25	W4840	Carinhanha	Res12	W6000	Carinhanha	Res11
W1550	Pitubas	Res25	W5190	Carinhanha	Res07	W6049	Carinhanha	Res04
W1590	Pitubas	Res31	W5200	Carinhanha	Res06	W6050	Carinhanha	Res05
W1640	Santana	Res29	W530	Santana	Res28	W649	Rãs	Res20
W1650	Pitubas	Res30	W5400	Rãs	Res19	W650	Rãs	Res22
W1700	Santana	Res28	W5440	Carinhanha	Res10	W710	Carinhanha	Res15
W2440	Casa Velha	Res21	W5490	Carinhanha	Res03	W719	Carinhanha	Res13
W2490	Carinhanha	Res12	W5499	Carinhanha	Res02	W720	Carinhanha	Res14
W2639	Carinhanha	Res08	W5500	Carinhanha	Res03	W7209	Pitubas	Res18
W2640	Carinhanha	Res14	W560	Rãs	Res27	W7210	Pitubas	Res32
W3390	Carinhanha	Res09	W590	Rãs	Res23	W7220	Pitubas	Res26
W3900	Carinhanha	Res01						

Fonte: O Autor, 2018.

Com estas informações, foi possível determinar as principais características dos reservatórios equivalentes, sendo elas: área máxima do espelho d'água, capacidade máxima de armazenamento e altura máxima do reservatório. Os dois primeiros componentes foram obtidos através dos somatórios de tais componentes dos reservatórios contidos nas sub-bacias, ou seja, na área de bacia hidráulica de cada reservatório. Para estimativa da altura máxima, foi utilizado o método disposto na seção 3.5.6.

Assim, a Tabela 30 dispõe das características dos reservatórios equivalentes. Nesta é possível observar que houve reservatório com área do espelho d'água e volume em grandes dimensões e também pouco significativos. O reservatório Res19 foi aquele que obteve a maior área e volume, com valores de 1.998 ha e 38 hm³,

respectivamente. Ocorreram casos onde os reservatórios equivalentes não dispunham de área e volume, devido ao fato de não ter sido detectado reservatórios em sua bacia hidráulica.

Tabela 30 - Dados dos reservatórios equivalentes.

Reservatório	Bacia	Nº Reserv.	A_{EQ} (ha)	V_{EQ} (hm³)	h (m)
Res01	Carinhanha	4	15,35	0,298	5,90
Res02	Carinhanha	0	0,00	0,000	0,00
Res03	Carinhanha	6	10,83	0,160	4,50
Res04	Carinhanha	2	7,18	0,135	5,70
Res05	Carinhanha	0	0,00	0,000	0,00
Res06	Carinhanha	3	4,30	0,056	4,00
Res07	Carinhanha	0	0,00	0,000	0,00
Res08	Carinhanha	3	9,19	0,166	5,50
Res09	Carinhanha	1	4,76	0,092	5,90
Res10	Carinhanha	0	0,00	0,000	0,00
Res11	Carinhanha	0	0,00	0,000	0,00
Res12	Carinhanha	2	7,58	0,139	5,60
Res13	Carinhanha	1	3,83	0,071	5,60
Res14	Carinhanha	9	20,92	0,348	5,00
Res15	Carinhanha	41	100,58	1,702	5,10
Res16	Carinhanha	1	1,83	0,027	4,40
Res17	Carinhanha	22	71,43	1,301	5,50
Res18	Pitubas	1	1,49	0,020	4,00
Res19	Rãs	551	1.988,03	38,133	5,80
Res20	Rãs	17	112,11	2,448	6,60
Res21	Casa Velha	130	639,06	12,907	6,10
Res22	Rãs	112	660,15	13,702	6,30
Res23	Rãs	12	36,40	0,667	5,50
Res24	Pitubas	54	225,33	4,424	5,90
Res25	Pitubas	133	603,73	12,050	6,00
Res26	Pitubas	4	10,47	0,180	5,20
Res27	Rãs	9	27,15	0,476	5,30
Res28	Santana	8	83,62	1,796	6,50
Res29	Santana	3	4,33	0,056	4,00
Res30	Pitubas	12	67,34	1,448	6,50
Res31	Pitubas	4	16,97	0,336	6,00
Res32	Pitubas	12	31,55	0,551	5,30

Fonte: O Autor, 2018.

As alturas máximas dos reservatórios equivalentes obtiveram baixos valores, variando entre 4,0 e 6,6 m. A explicativa para tal fato se dá pela característica natural dos pequenos reservatórios, os quais apresentam pequena profundidade

para determinar área de espelho d'água. Logo, a área equivalente será elevada, reduzindo a profundidade do reservatório.

Deste modo, foram obtidas as informações equivalentes dos reservatórios, as quais foram inseridas no modelo hidrológico para a realização do prognóstico. Tal etapa terá suas considerações relatadas na sequência.

4.3.4 Prognóstico da influência dos pequenos reservatórios

O prognóstico desta pesquisa consistiu em simular o evento ocorrido em 2016, de modo que seja possível verificar a influência dos pequenos reservatórios da área de estudo. Os resultados mostraram que a influência ocorreu em maior magnitude nas sub-bacias onde a razão entre o volume equivalente e área de drenagem, chamada neste trabalho de Razão Volume-Área de Drenagem (RVA) teve maior valor.

Os reservatórios equivalentes que tiveram em sua área de drenagem as sub-bacias com maior RVA foram Res20, Res19, Res22, Res25 e Res21, as quais obtiveram RVA superior a 5,0 (Tabela 31). Tais reservatórios estão alocados nas bacias das Rãs, Pitubas e Santana. Através dos hidrogramas da vazão de entrada (*inflow*) e saída (*outflow*) dos reservatórios exibidos na Figura 50, foi possível constatar que houve uma interceptação da vazão, havendo casos em que o escoamento superficial foi impedido de ocorrer devido à acumulação do reservatório equivalente. No reservatório Res25 ocorreu uma amortização do escoamento.

Tabela 31 - Razão Volume-Área de Drenagem (RVA) para as sub-bacias.

Sub-bacia	Res _{eq}	Bacia	AD (km ²)	A _{eq} (ha)	V _{eq} (hm ³)	RVA (hm ³ /1.000km ²)
W649	Res20	Rãs	83,7	112,11	2,448	29,228
W650	Res22	Rãs	635,3	419,34	8,461	13,318
W1550	Res25	Pitubas	1.164,2	603,73	12,050	10,351
W5400	Res19	Rãs	2.573,2	1280,27	24,308	9,447
W5940	Res21	Casa Velha	1.618,7	515,14	10,516	6,497
W1350	Res19	Rãs	2.245,8	707,75	13,825	6,156
W1440	Res22	Rãs	930,6	240,81	5,242	5,633
W2640	Res14	Carinhanha	64,9	13,71	0,243	3,740
W1590	Res31	Pitubas	95,4	16,97	0,336	3,526
W1499	Res24	Pitubas	1.326,3	225,33	4,424	3,336
W4440	Res15	Carinhanha	370,5	55,18	0,930	2,510
W590	Res23	Rãs	290,6	32,02	0,609	2,095

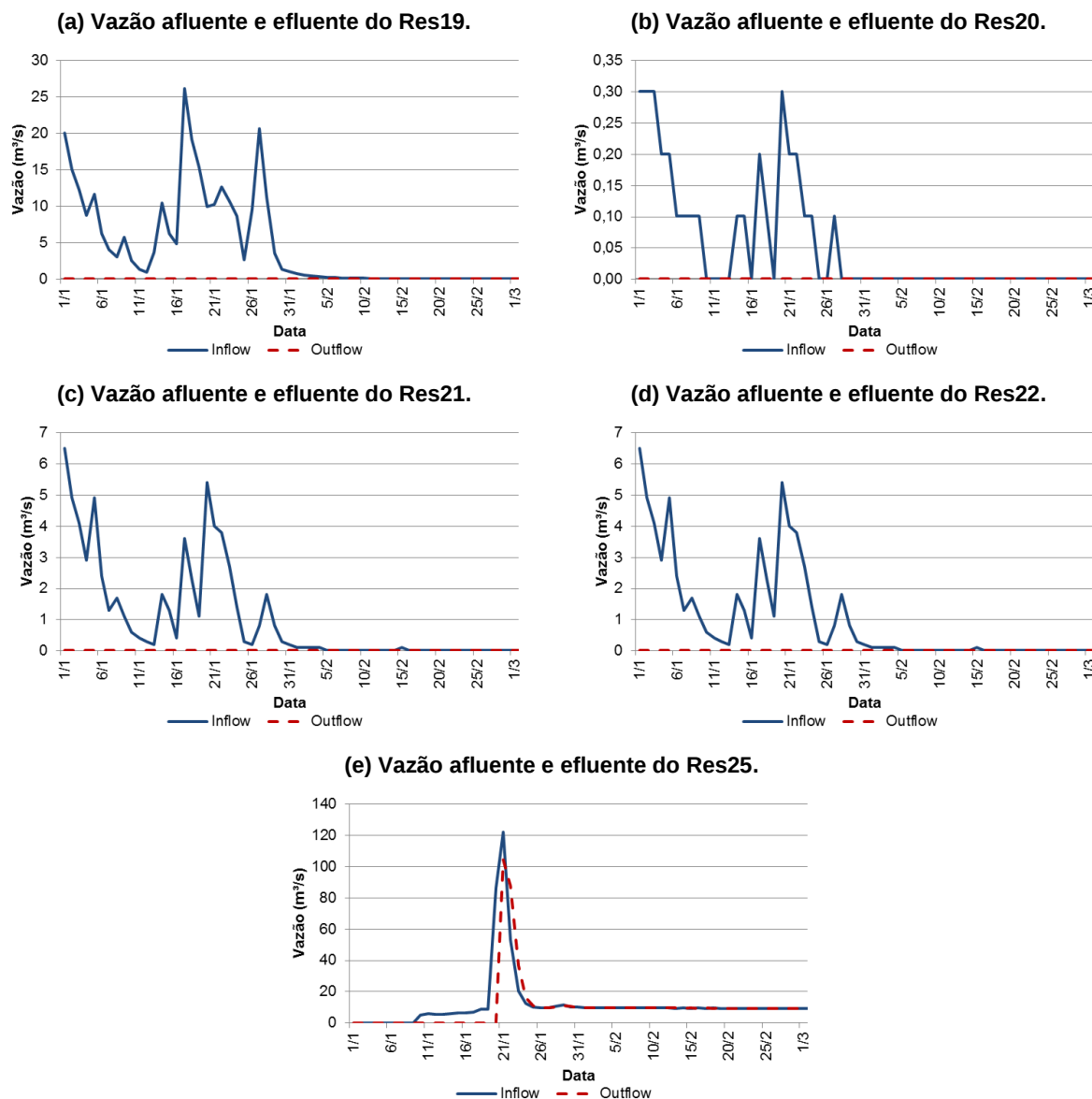
Tabela 32 - Razão Volume-Área de Drenagem (RVA) para as sub-bacias (continuação).

Sub-bacia	Res _{eq}	Bacia	AD (km ²)	A _{eq} (ha)	V _{eq} (hm ³)	RVA (hm ³ /1.000km ²)
W2440	Res21	Casa Velha	1.227,8	123,91	2,390	1,947
W1650	Res30	Pitubas	752,6	67,34	1,448	1,924
W1700	Res28	Santana	1.078,2	82,20	1,778	1,649
W710	Res15	Carinhanha	474,4	45,41	0,773	1,629
W2639	Res08	Carinhanha	102,4	9,19	0,166	1,619
W4349	Res16	Carinhanha	16,9	1,83	0,027	1,577
W4350	Res17	Carinhanha	931,8	71,43	1,301	1,396
W560	Res27	Rãs	493,3	27,15	0,476	0,966
W2490	Res12	Carinhanha	159,4	7,58	0,139	0,873
W7210	Res32	Pitubas	777,8	31,55	0,551	0,708
W719	Res13	Carinhanha	103,1	3,83	0,071	0,685
W7209	Res18	Pitubas	41,2	1,49	0,020	0,480
W5490	Res03	Carinhanha	281,9	6,27	0,098	0,349
W5500	Res03	Carinhanha	177,7	4,56	0,062	0,348
W600	Res23	Rãs	260,7	4,38	0,058	0,223
W530	Res28	Santana	96,0	1,42	0,018	0,190
W720	Res14	Carinhanha	613,8	7,22	0,105	0,171
W7220	Res26	Pitubas	1.112,6	10,47	0,180	0,161
W3900	Res01	Carinhanha	1.965,1	15,35	0,298	0,152
W1640	Res29	Santana	391,9	4,33	0,056	0,144
W5200	Res06	Carinhanha	829,7	4,30	0,056	0,068
W3390	Res09	Carinhanha	1.546,9	4,76	0,092	0,060
W6049	Res04	Carinhanha	4.168,0	7,18	0,135	0,032
W1500	Res25	Pitubas	88,4	-	-	-
W4840	Res12	Carinhanha	1.207,9	-	-	-
W5190	Res07	Carinhanha	786,3	-	-	-
W5440	Res10	Carinhanha	1.694,2	-	-	-
W5499	Res02	Carinhanha	428,9	-	-	-
W5990	Res11	Carinhanha	386,9	-	-	-
W6000	Res11	Carinhanha	751,0	-	-	-
W6050	Res05	Carinhanha	121,2	-	-	-

Fonte: O Autor, 2018.

Outro prognóstico gerado foi comparando os escoamentos das bacias sem e com a presença dos reservatórios equivalentes, também para o cenário de 2016. Neste cenário foi observada a vazão no exutório de cada bacia hidrográfica considerada neste estudo, as quais estão expostas na Figura 51. Em todas as bacias foram observadas redução do volume escoado e amortização do escoamento, com a redução e retardamento de picos.

Figura 50 - Vazões afluentes e defluentes dos reservatórios equivalentes que apresentaram área de drenagem com elevado RVA.

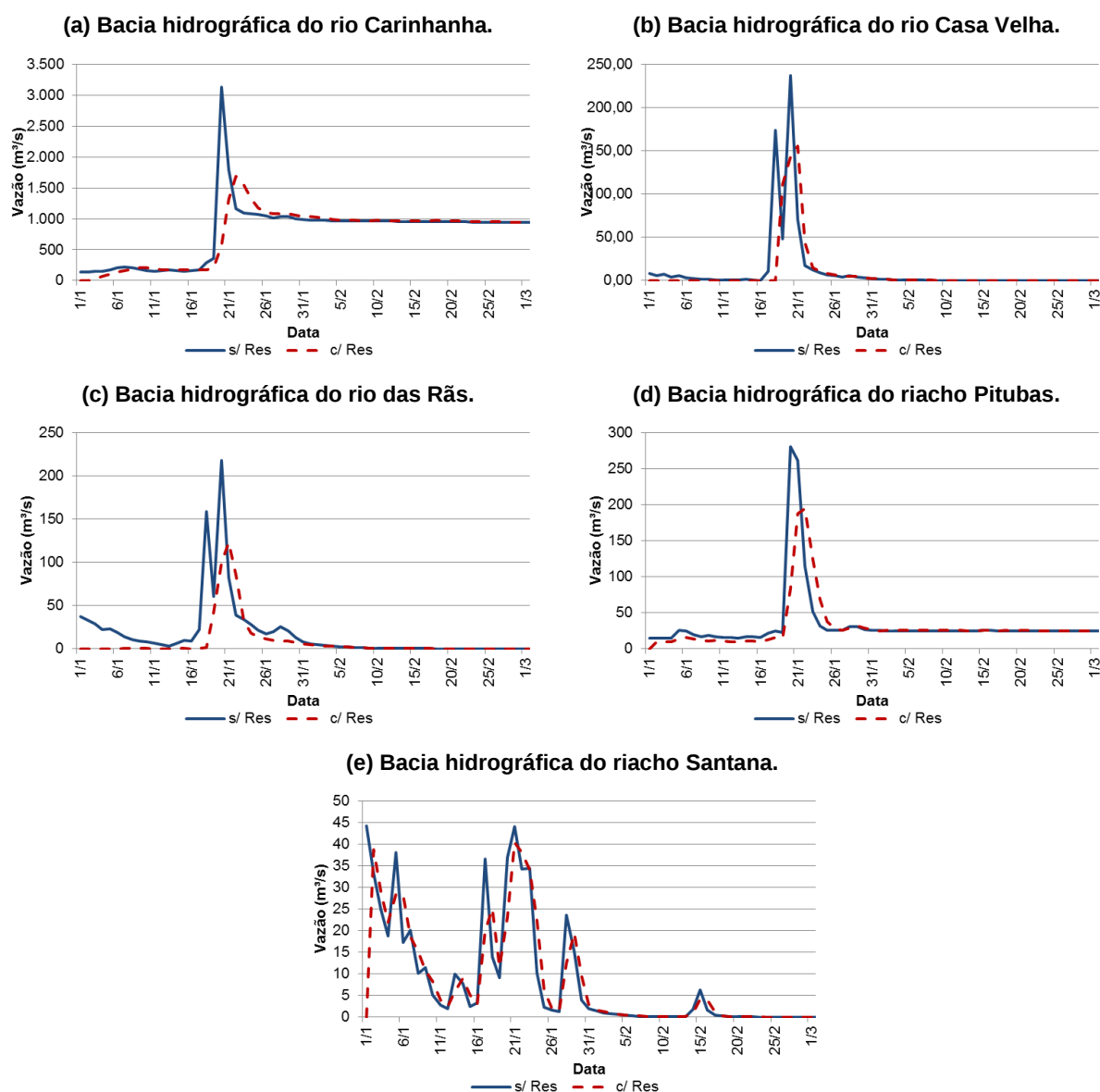


Fonte: O Autor, 2018.

Para quantificar o escoamento interceptado pelos reservatórios equivalentes, que representam os pequenos reservatórios, foi realizado o somatório da vazão nos cenários com (Q_{CR}) e sem reservatório (Q_{SR}), verificando a percentual da Q_{SR} que foi armazenado nos reservatórios (Q_{INT}), conforme exposto na Tabela 32. Assim, foi possível verificar que as bacias que apresentaram maior RVA obtiveram também maior interceptação da vazão (Q_{INT}). A bacia do rio das Rãs obteve o maior RVA entre as bacias, a qual também alcançou a maior percentual de interceptação, em torno de 52% da vazão que ocorreu no cenário sem os reservatórios equivalentes.

Portanto, este trabalho comprovou que quanto maior a relação entre o volume dos pequenos reservatórios e a área de drenagem da bacia, maior foi a interceptação do escoamento nas bacias hidrográficas. Assim, regiões que apresentaram pouca disponibilidade hídrica obtiveram uma maior quantidade de pequenos reservatórios, e, conseqüentemente, maior índice RVA e interceptação do escoamento superficial.

Figura 51 - Comparação entre as vazões geradas nas bacias hidrográficas com e sem a interceptação dos reservatórios equivalentes.



Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 32 - Percentual da vazão interceptada pelos reservatórios equivalentes durante o período de prognóstico.

Bacia Hidrog.	RVA (hm³/km²)	ΣQsr	ΣQcr	Qint	Qint (%)
Carinhanha	0,262	101.837,1	100.828,1	1.009,0	1,0%
Casa Velha	4,534	664,3	523,0	141,3	21,3%
Rãs	7,377	1.047,4	504,1	543,3	51,9%
Pitubas	1,183	3.469,1	3.279,3	189,8	5,5%
Santana	3,547	539,2	517,0	22,2	4,1%
Total	-	107.557,1	105.651,5	1.905,6	1,8%

Fonte: O Autor, 2018.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A crescente implantação de reservatórios de médio e pequeno porte no semiárido nordestino possibilitou o armazenamento de água para mitigar a recorrente escassez que afeta essa região. Tal prática vem sendo valorizada pela população, tornando-a praticamente parte da cultura desta região. Porém, a construção demasiada de pequenos açudes, sem critério técnico ou de planejamento, dificultou a gestão dos recursos hídricos nestas regiões, de forma que não há dados técnicos a respeito das barragens e também dos possíveis impactos que estas causam nos componentes hidrológicos da bacia.

Nesta última temática, a implantação de pequenos reservatórios ocasiona um aumento da perda de água na bacia por evaporação, principalmente em regiões semiáridas onde os índices de insolação são elevados. Outro componente hidrológico afetado com a construção destas estruturas é o escoamento superficial, o qual tem parcela significativa interceptada pelos reservatórios, reduzindo a vazão incremental dos principais rios e reservatórios de uma bacia hidrográfica. Esta pesquisa se propôs a analisar tais fatores.

De início foram aplicadas técnicas de sensoriamento remoto com a finalidade de identificar e quantificar os pequenos reservatórios na área de estudo. Tal fator atingido por êxito, uma vez que os processos aplicados foram capazes de identificar 1.157 pequenos açudes nas cinco bacias hidrográficas, apresentando melhor eficácia de que outros estudos, assim como relevante eficiência. A combinação NDWI que utilizou as bandas espectrais verde e SWIR foi aquela que apresentou maior realce dos corpos hídricos, os quais foram extraídos através da classificação pelo método Maxver-ICM. Tais espelhos d'água tiveram sua área variando entre 1,0 e 58,4 ha. A maioria dos espelhos d'água teve área variando entre 1,0 e 5,0 ha, com o total de 920 (79%) unidades.

A bacia hidrográfica do rio das Rãs concentrou a maior parte dos espelhos d'água, totalizando 701 reservatórios e com densidade de 93 reservatórios a cada 1.000 km². Já a bacia do rio Carinhanha apresentou 95 espelhos d'água e uma densidade de 6 reservatórios a cada 1.000 km². Assim, as regiões com menor disponibilidade hídrica tiveram maior quantidade de reservatórios, havendo uma

relação entre a baixa oferta de água e a valorização da construção de pequenas barragens.

A determinação do volume através da área do espelho d'água apresentou melhores resultados do que considerando a área e a declividade dos leitos dos rios, ambas através das equações propostas por Molle (1994). A imprecisão da estimativa da declividade através de técnicas de SIG limitou a utilização desta variável. Seus resultados apresentaram incoerências, nas quais reservatórios com áreas muito menores que outros apresentaram volumes superiores. Por estes motivos, a estimativa do volume dos pequenos açudes somente pela área do espelho d'água apresentou melhores resultados. O somatório dos volumes destes reservatórios apresentou valores significativos em algumas bacias, como nas bacias Rãs e Pitubas, com um volume equivalente de 55 e 19 hm³, respectivamente. Logo, a capacidade de interceptação máxima obtiveram valores relevantes.

O modelo hidrológico desenvolvido para área de estudo apresentou eficácia qualitativa para representar os componentes hidrológicos. Para a calibração, os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe variaram entre -0,171 e 0,574 para as sub-bacias sem influência da vazão do rio São Francisco, tendo seu grau de aceitação dito como não satisfatórios e aceitável, seguindo os critérios de Moriasi *et al.* (2007) e Gottschalk e Motovilov (2000), respectivamente. Resultados semelhantes ocorreram na validação, cujos valores do NS variaram entre -2,737 e 0,427, sendo classificados novamente como não aceitável e aceitável. Porém, a avaliação da variação de volume teve seus valores variando entre -15,709% e 1,653% para a calibração, tendo a maioria um grau de aceitação muito bom, segundo Moriasi *et al.* (2007). Na validação, apenas um conjunto de sub-bacias obteve resultado não satisfatório, as demais tiveram aceitação variando de satisfatório a muito bom.

Na análise da interceptação do escoamento, os reservatórios equivalentes que apresentaram o maior volume armazenaram considerável parte do escoamento gerado no evento de 2016, principalmente os localizados na bacia do rio das Rãs. Na análise comparativa dos cenários com e sem os pequenos reservatórios, as simulações demonstraram que quanto maior a razão volume por área de drenagem (RVA), maior a influencia dos pequenos reservatórios no escoamento superficial. Novamente a bacia do rio das Rãs obteve destaque, a qual obteve índice RVA de 7,4 hm³/1.000km², interceptando algo em torno de 52% do escoamento gerado na

bacia. A bacia do rio Casa Velha também mereceu destaque, uma vez que 21% do escoamento superficial foram interceptados nos pequenos açudes, obtendo um RVA de $4,5 \text{ hm}^3/1.000 \text{ km}^2$.

Assim, as bacias hidrográficas que apresentaram maior RVA e maior quantidade de reservatórios foram aquelas que dispõem das menores disponibilidades hídricas, ocasionando uma maior influência no escoamento superficial. Assim, foi detectada uma relação entre a disponibilidade hídrica e a presença de pequenos reservatórios, sendo estas inversamente proporcionais. É importante ressaltar também que a presença dos pequenos reservatórios ocasiona um maior aproveitamento dos recursos hídricos nas bacias, ofertando água para abastecimento humano e para as atividades econômicas.

Portanto, de métodos simplificados podem trazer ganhos significativos para a gestão dos recursos hídricos, de modo a fornecer informações sobre os componentes hidrológicos que atuam numa região. Tal prática deve ser incentivada e aperfeiçoada, buscando a melhor qualidade dos resultados encontrados.

Como sugestões de trabalhos futuros, a metodologia utilizada poderia ser aperfeiçoada para aplicação em outras regiões com elevado número de espelhos d'água, como os estados do Ceará, Paraíba e Pernambuco. Assim, serão geradas informações importantes para o diagnóstico e planejamento dos recursos hídricos, garantido a maior efetividade das ações propostas para o aumento da disponibilidade hídrica das bacias. A utilização de outro modelo hidrológico deve ser encorajada, de modo a se procurar melhores ajustes dos parâmetros hidrológicos.

A aplicação de diferentes técnicas de sensoriamento remoto para o realce de corpos d'água pode ser comparada com as obtidas nesta pesquisa, sobretudo sobre os métodos de extração e validação dos resultados.

Aprimorar os resultados para a razão volume e área de drenagem (RVA) pode ser outro campo de pesquisa a ser explorado. Aplicar tal índice em diferentes localidades, sobre diferentes realidades, poderá gerar um acervo importante para definir categorias a partir dos seus valores. Tais categorias poderiam alertar sobre a alta densidade de pequenos reservatórios e suas influências nos escoamentos superficiais das bacias, impactando a formação de vazão dos principais cursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. F. S.; SILVA JUNIOR, M. A.; ALCOFORADO, R. M. G.; AZEVEDO, J. R. G. Análise das precipitações totais anuais no alto e médio São Francisco e sua correlação com vazão natural. In: **Anais I Simpósio da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Petrolina-Juazeiro: CBHSF, 2016. 8p.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Massas d'Água (Espelhos d'Água)**. Brasília, 2016: Metadados da ANA. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>>. Acesso em: 13 set. 2016.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Portal Hidroweb**. Brasília, 2017: Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

ANA/GEF/PNUMA/OEA. **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco - Subprojeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2004-2013)**. Brasília: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004. 128p.

AQUAVEO. **WMS: Storage Capacity Curves**. Disponível em: <https://www.xmswiki.com/wiki/WMS:Storage_Capacity_Curves>. Acesso em: 02. maio 2018.

ARAÚJO, E. M.; ARAÚJO, E. M.; ARAÚJO, R. B.; LÊDO, E. R. F.; SILVA, M. G. Estimativa do volume dos recursos hídricos superficiais ao nível de uma bacia regional. In: **IV Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação**. Fortaleza: INOVAGRI, 2012. Disponível em: <<http://www.inovagri.org.br/meeting2012/wp-content/uploads/2012/06/Protocolo420.pdf>>. Acesso em: 11 mar. 2018.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de Hidráulica**. 9.ed. São Paulo: Blucher, 2015. 632p.

AZEVEDO, T. C. Utilização de imagens CBERS-2 para atualização da base cartográfica de recursos hídricos do estado do Rio Grande do Norte. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis: INPE, 2007. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2007/01.31.19.10/doc/@sumario.htm>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

BARSI, J.A.; LEE, K.; KVARAN, G.; MARKHAM, B.L.; PEDELTY, J.A. *The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager*. **Remote Sens.** 2014. p. 10232-10251.

BIELENKI JÚNIOR, C.; HAUSCHILD, R. M. P. R.; GODINHO, J. M.; SCHERER-WARREN, M.; QUIRINO, W. S. Mapeamento de Reservatórios no Nordeste usando imagens CBERS II. In: **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis: INPE, 2007. p. 785-790.

BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS – Brasil. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2015, João Pessoa. Anais eletrônicos. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0727.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2017.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2004. Disponível em: <<http://mtcm12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>> Acesso em: 01 fev. 2017.

CARVALHO, M. S. B. S.; MARTINS, E. S. P. R.; SOARES, A. M. L; CHAVES, L. C. G.; OLIVEIRA, F. A. J.; PERINI, D. S. MENESCAL, R. A., SCHERER-WARREN, M. Levantamento dos espelhos d'água acima de 20ha em todo o território brasileiro através de seonsoriameto remoto. In: **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal: INPE, 2009. p. 1967-1974.

CBHSF, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Resumo Executivo do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2015**. Alagoas: CBHSF, 2016. Disponível em: <<http://cbhsaofrancisco.org.br/planoderecursoshidricos/relatorios>>. Acesso em: 04 jun. 2017.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: UFRGS, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/238774430_Simulacao_Hidrologica_de_Grandes_Bacias>. Acesso em: 12 abr. 2018.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2015. 336p.

CONTERATO, T. M.; KUCHINSKI, V. SCHIMIDT, M. H.; GASTALDINI, M. C. C.; PICCILLI, D. G. A. **Estudo de vazões máximas da bacia do Alto da Colina utilizando o modelo HEC-HMS**. Brasília: ABRH, 2015. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/sbrh/detalhes-96_estudo-das-vazoes-maximas-da-bacia-do-alto-da-colinautilizando-o-modelo-hec-hms>. Acesso em: 24 jan. 2017.

D'ORNELLAS, M. C. **Algorithmic patterns for morphological image processing**. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam, 2001. 190p.

D'AGOSTINO, D. R.; TRISORIO, L. G.; LAMADDALENA, N.; RAGAB, R. Assessing the results of scenarios of climate and land use changes on the hydrology of an Italian catchment: modelling study. **Hydrological Processes**, v.24, n.19, p.2693-2704, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/hyp.7765>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

DASTORANI, M. T.; KHODAPARAST, R.; TALEBI, A.; VAFAKHAH, M.; DASHTI, J. Determination of the ability of HEC-HMS model components in rainfall-run-off simulation. **Research Journal of Environment Science** 5 (10), 2011. p. 790-797.

DERDOUR, A.; BOUANANI, A.; BABAHAMED, K. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: Case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW Algeria). **Journal of Water and Land Development**, 2018, No. 36 (I-III). p. 45-55.

FELIX, V. S.; PAZ, A. R. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, 2016. p. 556-569.

FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Maapeamento dos espelhos d'água do Brasil**. Fortaleza: FUNCEME, 2008. 108p.

GAO, B.C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v.58, p. 257 - 266. 1996.

GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. S.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. 258p.

GOMES, A. R.; FREITAS, C. C.; SANT'ANNA, S. J. S.; DUTRA, L. V. Avaliação da aplicação de classificadores pontuais e por regiões para imagem JERS-1 em ambiente SPRING. In: Anais **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia**, Abr. 2005. p. 4421-4427,

GONZALEZ, R. C.; WOOD, R.E. Digital Image Processing. Reading, Massachusetts: **Addison-Wesley Company**, 1992.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrologic modelling - a scandinavian experience. *International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century - Report from the World'* **Japan Society of Hydrology and Water Resources**. Tokyo, 2000. p. 48-45.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 abr. 2018.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>>. Acesso em: 13 out. 2017.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA - Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Divisão de Geração de Imagens**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em: 12 Jan. 2017.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de José Carlos Ephifanio (coord.). São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604p

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. *Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index*. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. 75, No. 11, 2009. p. 1307-1317.

LACAU, J.P.; TORRE, Y.M.; VIGNOLLES, C.; NDIONE, J.A. LAFAYE, M. *Lafaye. Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal*. **Remote Sensing of Environment**, 106(1), 2007. p. 66–74.

LEITE, E. F.; ROSA, R. Análise do uso, ocupação e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Rio Formiga, Tocantins. **Revista Eletrônica de Geografia**. v.4, n.12, 2012. p. 90-106.

LIEBE, J. **Estimation of water storage capacity and evaporation losses of small reservoirs in the Upper East Region of Ghana**. Diploma Thesis. Bonn: Geography Department - Bonn University, 2002. 113p.

LIEBE, J.; VAN DE GIESEN, N.; ANDREINI, M. *Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment - A case study in the Upper East Region of Ghana*. **Physics and Chemistry of the Earth**, 30(6-7), 2005. 7p.

LOTUFO, R.; FALCÃO, A. *The ordered queue and the optimality of the watershed approaches*, in J. Goutsias and L. Vincent and D. Bloomberg, editors, *Mathematical Morphology and its Application to Image and Signal Processing*. Kluwer Academic Publishers, **Dordrecht. Computational Imaging and Vision**, v. 12, 2000. p. 341-350.

MACEDO, R. L. **Estudo hidrológico da bacia do rio Negrinho – SC utilizando o HEC-HMS**. Trabalho de Conclusão de Curso. Florianópolis: UFSC, 2010. 50p.

MARTINS, E. S. P. R.; MENESCAL, R. A.; WARREN, M. S.; SOUZA CARVALHO, S. B.; MELO, M. S.; PERINI, D. S.; OLIVEIRA, F. de A. J. Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. in: Anais do **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis: INPE, 2007. p. 969-976.

MCFEETERS, S. K. *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.7, 1996. p 1425-1432.

MELCHING, C. S.; YEN, B. C.; WENZEL JR, H. G. *A reliability estimation in modeling watershed runoff with uncertainties*. **Water Resources Research**, vol. 26, n.10, 1990. p. 2275-2286. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR026i010p02275>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2013. 576p.

MOLLE, F. **Geometria dos Pequenos Açudes**. Recife: SUDENE-DPG/PRN/HME, 1994. 139p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 241p.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, 2007. p. 885-900.

NAMIKAWA, L. M. Imagens Landsat 8 para monitoramento de volume de água em reservatórios: estudo de caso nas barragens Jaguari e Jacareí do Sistema Cantareira. In: Anais **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa: INPE, 2015. 8p.

OLIVEIRA, L. M. M.; MOTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B.B.; MOURA, A. E. S. S.; GUSMÃO, A. C. V. L.; SALGUEIRO, J. H. P. B. Índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do rio Tapacurá - PE. In: Anais do **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Bento Gonçalves: ABRH, 2013. 8p

OUMA, Y.O.; TATEISHI, R. *A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: An empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data*. **International Journal of Remote Sensing**, 27(15), 2016. p. 3153–3181.

PACHECO, R. C.; SANTOS, D. F. M. Proposta de mapeamento das lagoas da Reserva Florestal Padre Josimo Tavares, Conceição do Araguaia - PA. In: **XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia**. Gramado: SBC, 2014. 10p.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.6, 2007. p. 615–622.

POLIDORIO, A. M., IMAI, N. N. E TOMMASELLI, A. M. G. Índice indicador de corpos d'água para imagens multiespectrais. In: **I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. 9, 2004. Recife. Disponível em: <[https://www3.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriament o%20Remoto/Artigos/f027.pdf](https://www3.ufpe.br/cgtg/ISIMGEO/CD/html/Fotogrametria%20e%20Sensoriament%20Remoto/Artigos/f027.pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2017.

POLIDORIO, A. M., IMAI, N. N., TOMMASELLI, A. M. G. E GALO, M. L. T. Correção radiométrica de imagens multiespectrais CBERS e Landsat ETM usando atributos de reflectância e de cor. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Goiânia: INPE, 2005. p. 4249-4257

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Una em Pernambuco: simulação hidrológica-hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 20 no.2. Porto Alegre, 2015. p. 394-403.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. Berlin: Springer Verlag, 1993. 340p.

ROCHA, C H B. **Geoprocessamento Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed autor, 2000. 220p.

ROCHA, E. C. O.; CANDEIAS, A. L. B. Contornos de corpos de água utilizando imagem Landsat 8 (OLI) a partir de índices físicos para auxiliar na análise de áreas de preservação ambiental em Teresina - PI. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. João Pessoa: INPE, 2015. 8p.

ROGERS, A. S.; KEARNEY, M. S. *Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices*. **International Journal of Remote Sensing**, 25(12), 2004. p. 2317–2335.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. Prog. Rep. RSC 1978-1. **Remote Sensing Cent.**, Texas A&M Univ., College Station, 1973.

SANTOS, F. A.; SILANS, A. M. B. P.; PORTO, R. Q.; ALMEIDA, C. N. Estimativa e análise do volume dos pequenos açudes através de imagens de satélite e

levantamento de campo na Bacia Hidrográfica do açude Sumé. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande: ABRH, 2009. 14p

SANTOS, K. A. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: bacia do rio Mundaú**. Dissertação de Mestrado. Recife: UFPE, 2013. 107p.

SANTOS, J. B. **Modelagem hidrológica HEC-HMS da bacia hidrográfica do Ribeirão Lavapés, Botucatu-SP**. Tese de Doutorado. Botucatu: UNESP, 2017. 78p.

SAWUNYAMA, A. **Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo river basin using geographical information systems (gis) and remotely sensed surface areas: a case of Mzingwane catchment**. Diploma thesis. Mount Pleasant: University of Zimbabwe, 2005. 78p.

SHOURIAN, M.; MOUSAVI, M. S. J.; TAHERSHAMSI, A. *Basin-wide Water Resources Planning by Integrating PSO Algorithm and MODSIM*. **Water Resources Management**, v. 22, n. 10, 2007. p. 1347-1366.

SILVA, H. P.; SILVA, M. D. R.; SOUZA, E. R.; RISSO, A. Utilização de imagens CBERS na avaliação do volume de água armazenada no açude Cachoeira, no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil. In: **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis: INPE, 2007. p. 1167-1173.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.3, 2008. p. 258–265.

SOUZA, R. M.; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. T. M. Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial – caso de estudo bacia do córrego Samambaia. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, vol. 5, nº 2, 2012. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/reec/article/view/20176>>. Acesso em: 18 dez. 2016.

SWAIN, P.H.; DAVIS, S.N. **Remote Sessing: The quantitative approach**. New York: McGraw-Hill, 1978. 457p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2013. 943p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 1998. 669p.

USACE, United States Army Corps of Engineers. **HEC-DSSVue Version 2.0 - User's Manual**. 2009. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hecdssvue/documentation.aspx>>. Acesso em: 04 set. 2017.

USACE, United States Army Corps of Engineers. **HEC-GeoHMS Version 10.1 - User's Manual**. 2013. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/downloads.aspx>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

USACE, United States Army Corps of Engineers. **HEC-HMS Version 4.2 - User's Manual**. 2016. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>>. Acesso em: 13 set. 2017.

USGS, United States Geological Survey. **How do Landsat 8 band combinations differ from Landsat 7 or Landsat 5 satellite data?**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/how-do-landsat-8-band-combinations-differ-landsat-7-or-landsat-5-satellite-data>>. Acesso em: 5 set. 2017.

USGS, United States Geological Survey. **What are the band designations for the Landsat satellites?**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites>>. Acesso em: 5 set. 2017.

USGS, United States Geological Survey. **Landsat 8**. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/landsat-8>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

VESCOVI, J., M. **Aplicação de dois modelos hidrológicos em uma pequena bacia rural do município de Joinville (SC)**. Trabalho de Conclusão de Curso. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2011. 84p.

VINCENT, L.; SOILLE, P. *Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations*. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**. n.13, 1991. p.583 – 598.

XU, H. *Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery*. **International Journal of Remote Sensing**, 27(14), 2006. p. 3025–3033.