



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

GADADHARA DE FIGUEIREDO FERRAZ

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO IMPACTO DE ENCHENTES
NA BACIA DO RIO SIRINHAÉM E AVALIAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE
PROPOSTO**

Recife
2019

GADADHARA DE FIGUEIREDO FERRAZ

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO IMPACTO DE
ENCHENTES NA BACIA DO RIO SIRINHAÉM E AVALIAÇÃO DE SISTEMA
DE CONTROLE PROPOSTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Profº. Dr. José Almir Cirilo.

Recife

2019

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

- F381s Ferraz, Gadadhara de Figueiredo.
Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto / Gadadhara de Figueiredo Ferraz. - 2019.
117 folhas, il., tabs., abr. e sigl.
- Orientador: Prof^o. Dr. José Almir Cirilo.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. HEC-HAS. 3. CAWM V. 4. Controle de cheias. I. Cirilo, José Almir Cirilo (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-186

GADADHARA DE FIGUEIREDO FERRAZ

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA DO IMPACTO DE
ENCHENTES NA BACIA DO RIO SIRINHAÉM E AVALIAÇÃO DE SISTEMA
DE CONTROLE PROPOSTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 27/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. José Almir Cirilo (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 Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, que me ilumina todos os dias e me dá força para continuar a cada obstáculo.

À minha família que sempre me apoiou durante a jornada acadêmica, em especial ao meu pai, Tarciso de Arruda Ferraz, e a minha avó, Maria Socorro de Arruda Ferraz, que me ensinaram o que é o amor e a nunca desistir daquilo que a gente almeja.

Ao meu orientador, pelos dias dedicados ao meu trabalho, por acreditar em mim e continuar me incentivando, mesmo quando pensei que não conseguiria. Obrigada pelo apoio, pela oportunidade e pelo reconhecimento. Desse trabalho, retiro não apenas conhecimentos técnicos, mas sabedoria pessoal e ética profissional.

Aos colegas que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial Livia Fragoso, José Bandim e Mayara Arruda.

Aos meus queridos amigos que estiveram do meu lado ao longo de todo este percurso me incentivando a acreditar que conseguiria chegar ao fim.

À TPF Engenharia pela experiência proporcionada ao longo do meu percurso como engenheira e aos colaboradores que me auxiliaram e trocaram informações benéficas ao desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

A ocorrência de chuvas intensas em determinadas regiões do estado de Pernambuco pode gerar enchentes catastróficas, causando problemas para a população local e para a economia regional, demandando a atenção dos gestores quanto à tomada de decisão para controle de enchentes. Desde 2004 estudos e projetos têm sido concebidos para o controle de cheias por meio da construção de barragens nos rios Una, Sirinhaém e Jaboatão. Na bacia do rio Sirinhaém foi iniciada a barragem Barra de Guabiraba, porém encontra-se com obras paralisadas. Estão previstas cinco barragens para controle de cheias e usos múltiplos, ainda sem projetos de engenharia. Diante do exposto, neste trabalho buscou-se aplicar uma nova ferramenta de modelagem hidrológica, CAWM V, juntamente com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, para avaliar a magnitude de possíveis inundações nas cidades da bacia considerando dois cenários: o atual, sem controle, e o que ocorreria se as barragens estivessem construídas. As simulações mostraram a redução da vazão de pico e da magnitude das inundações, bem como a possibilidade de oferta hídrica significativa que a construção das barragens trará para os usos múltiplos dos recursos hídricos na região. No entanto, observou-se que o percentual de redução das áreas inundáveis com a construção das barragens é baixo, o que requer que a capacidade e a disposição das mesmas sejam revistas para que haja efetividade na redução das inundações.

Palavras-chave: HEC-HAS. CAWM V. Controle de cheias.

ABSTRACT

The occurrence of heavy rains in certain regions of the state of Pernambuco can generate a catastrophic impact, causing many problems for the local population and regional economy, which requires the attention of managers to the flood control decision making. Since 2004, studies and projects have been designed to control floods through the construction of dams on the Una, Sirinhaém and Jaboatão Rivers. In the Sirinhaém river basin, the Barra de Guabiraba dam was started, but it is in standstill of construction. Five more dams to flood control and multiple uses are planned in the Sirinhaém river basin, with no engineering projects yet. Given the above, this work aimed to apply a new hydrological modelling tool, called CAWM V, along with the hydrodynamic model HEC-RAS, to evaluate the magnitude of possible floods in the cities of the basin considering two scenarios: the current one, without control, and what would happen if the dams were built. The cities in question are Barra de Guabiraba, Cortês, Gameleira and Sirinhaém. The flood periods for the years 2000, 2001, 2004, 2010, 2011 and 2017 were evaluated. The simulations showed the reduction of the peak flow and magnitude of the floods, as well as the possibility of a significant water supply that the construction of the dams will bring for multiple uses of water resources in the region. However, it has been observed that the percentage of reduction of floodable areas with the construction of the dams is low, which requires that their capacity and arrangement be reviewed for effective reduction of floods.

Keywords: HEC-HAS. CAWM V. Flood Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Gráfico das inundações globais entre 1950 e 2010.....	21
Figura 2 -	Registro de inundações globais entre 1970 e 2011.....	21
Figura 3 -	Imagens de Satélite geradas pelo Lamepe.....	24
Figura 4 -	Blocos de mapeamento do Estado de Pernambuco.....	32
Figura 5 -	Representação do comportamento espectral de diferentes alvos em função do comprimento de onda.....	37
Figura 6 -	Blocos de mapeamento do Estado de Pernambuco.....	40
Figura 7 -	Quadriculas disponíveis em agosto de 2015.....	42
Figura 8 -	Localização da bacia do rio Sirinhaém.....	45
Figura 9 -	Hidrografia da bacia do rio Sirinhaém.....	46
Figura 10 -	Variação da precipitação na bacia do rio Sirinhaém.....	47
Figura 11 -	Classificação climática de Koppen na bacia do rio Sirinhaém.....	48
Figura 12 -	Mapa de solos da bacia do rio Sirinhaém.....	51
Figura 13 -	Localização das barragens da bacia do rio Sirinhaém.....	54
Figura 14 -	Localização das cidades analisadas na bacia do rio Sirinhaém.....	54
Figura 15 -	Localização das estações pluviométricas.....	55
Figura 16 -	Polígono de Thiessen na bacia do rio Sirinhaém.....	57
Figura 17 -	Localização das estações fluviométricas.....	59
Figura 18 -	Esquema do modelo CAWM IV.....	60
Figura 19 -	Esquema do modelo CAWM V.....	65
Figura 20 -	Áreas incrementais e das barragens.....	70
Figura 21 -	Localização do trecho de rio na cidade de Barra de Guabiraba.....	71
Figura 22 -	Localização do trecho de rio na cidade de Cortês.....	72
Figura 23 -	Localização do trecho de rio na cidade de Gameleira.....	72
Figura 24 -	Localização do trecho de rio na cidade de Sirinhaém.....	73
Figura 25 -	Limites das sub-bacias.....	76

Figura 26 -	Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 - Cucaú (2000)	79
Figura 27 -	Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 - Cucaú (2001)	79
Figura 28 -	Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 - Cucaú (2004)	80
Figura 29 -	Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 - Cucaú (2010)	80
Figura 30 -	Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 - Cucaú (2011)	81
Figura 31 -	Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 - Cucaú (2017)	81
Figura 32 -	Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 - Cucaú.....	82
Figura 33 -	Hidrograma de vazões para a sub-bacia B01 e B02.....	84
Figura 34 -	Hidrograma de vazões para a sub-bacia B04 e B05.....	85
Figura 35 -	Hidrograma de vazões para a sub-bacia B06.....	86
Figura 36 -	Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2000)	88
Figura 37 -	Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2001)	88
Figura 38 -	Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2004)	89
Figura 39 -	Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2010)	89
Figura 40 -	Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2011)	89
Figura 41 -	Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2017)	89
Figura 42 -	Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba - Cenário 1 e 2 (2000)	90
Figura 43 -	Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba - Cenário 1 e 2 (2001)	90
Figura 44 -	Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba - Cenário 1 e 2 (2004)	91
Figura 45 -	Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba - Cenário 1 e 2 (2010)	91
Figura 46 -	Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba - Cenário 1 e 2 (2011)	92
Figura 47 -	Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba - Cenário 1 e 2 (2017)	92
Figura 48 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2000)	93
Figura 49 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2001)	94
Figura 50 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2004)	94

Figura 51 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2010)	94
Figura 52 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2011)	95
Figura 53 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2017)	95
Figura 54 -	Mancha de inundação para a cidade de Cortês - Cenário 1 e 2 (2000)	96
Figura 55 -	Mancha de inundação para a cidade de Cortês - Cenário 1 e 2 (2001)	96
Figura 56 -	Mancha de inundação para a cidade de Cortês - Cenário 1 e 2 (2004)	97
Figura 57 -	Mancha de inundação para a cidade de Cortês - Cenário 1 e 2 (2010)	97
Figura 58 -	Mancha de inundação para a cidade de Cortês - Cenário 1 e 2 (2011)	98
Figura 59 -	Mancha de inundação para a cidade de Cortês - Cenário 1 e 2 (2017)	98
Figura 60 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2000)	100
Figura 61 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2001)	100
Figura 62 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2004)	100
Figura 63 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2010)	101
Figura 64 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2011)	101
Figura 65 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2017)	101
Figura 66 -	Mancha de inundação para a cidade de Gameleira - Cenário 1 e 2 (2000)	102
Figura 67 -	Mancha de inundação para a cidade de Gameleira - Cenário 1 e 2 (2001)	102
Figura 68 -	Mancha de inundação para a cidade de Gameleira - Cenário 1 e 2 (2004)	103
Figura 69 -	Mancha de inundação para a cidade de Gameleira - Cenário 1 e 2 (2010)	103
Figura 70 -	Mancha de inundação para a cidade de Gameleira - Cenário 1 e 2 (2011)	104
Figura 71 -	Mancha de inundação para a cidade de Gameleira - Cenário 1 e 2 (2017)	104
Figura 72 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2000)	105
Figura 73 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2001)	106
Figura 74 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2004)	106
Figura 75 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2010)	106

Figura 76 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2011)	107
Figura 77 -	Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2017)	107
Figura 78 -	Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém - Cenário 1 e 2 (2000)	107
Figura 79 -	Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém - Cenário 1 e 2 (2001)	108
Figura 80 -	Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém - Cenário 1 e 2 (2004)	108
Figura 81 -	Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém - Cenário 1 e 2 (2010)	109
Figura 82 -	Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém - Cenário 1 e 2 (2011)	109
Figura 83 -	Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém - Cenário 1 e 2 (2017)	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Barragens em construção para contenção de enchentes nas bacias do rio Una e Sirinhaém.....	33
Tabela 2 -	Listagem dos Reservatórios Estudados	34
Tabela 3 -	Classificação de vegetação, uso e ocupação do solo para bacia do Sirinhaém.....	52
Tabela 4 -	Barragens concebidas/iniciadas na bacia do Sirinhaém	53
Tabela 5 -	Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica	56
Tabela 6 -	Postos utilizados para cálculo da chuva média através do polígono de Thiessen.....	57
Tabela 7 -	Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém	58
Tabela 8 -	Postos pluviométricos e meteorológicos utilizados na operação das barragens	68
Tabela 9 -	Parâmetros usados nas sub-bacias geradas pelas barragens	77
Tabela 10 -	Coeficiente de Nash e Desvio de Volume	77
Tabela 11 -	Coeficiente de Nash e Desvio de Volume para os eventos de 2000, 2001, 2004, 2010, 2011 e 2017	78
Tabela 12 -	Vazões regularizadas pelas barragens	87
Tabela 13 -	Área inundada pelos eventos em Barra de Guabiraba	93
Tabela 14 -	Área inundada pelos eventos em Cortês	99
Tabela 15 -	Área inundada pelos eventos em Gameleira	105
Tabela 16 -	Área inundada pelos eventos em Sirinhaém	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAC	AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA
CAWM	CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL
CBMPE	CORPO DE BOMBEIROS MILITARES DE PERNAMBUCO
CEPED	CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES
CN	CURVE NUMBER
CODECIPE	COORDENADORIA DE DEFESA CIVIL
Compesa	COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO
CONDEPE/FIDEM	AGÊNCIA ESTADUAL DE PLANEJAMENTO E PESQUISAS
ENOS	EL NIÑO OSCILAÇÃO SUL
ENS	COEFICIENTE DE NASH-SUTCLIFFE
FAMAC	FUNDO ESPECIAL DE AMPARO AOS MUNICÍPIOS ATINGIDOS PELAS CHUVAS
GDEM	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO GLOBAL
ICMS	CIRCULAÇÃO DE MERCADORIAS E PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS
IDH	ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO HUMANO
INPE	INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
ITEP/OS	ASSOCIAÇÃO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO
MDT	MODELO DIGITAL DO TERRENO
METI	MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY
NASA	NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION
PARH	PLANO DE APROVEITAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS
PE3D	PROGRAMA PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL
RMR	REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE
SERH	SECRETARIA EXECUTIVA DE RECURSOS HÍDRICOS
SRTM	SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION

UFSC

UGP-Barragens

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

UNIDADE GESTORA DE PROJETOS BARRAGENS DA
MATA SUL

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	17
1.2	OBJETIVOS GERAIS.....	17
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
	GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E O	19
2.1	DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO.....	
2.2	CHUVAS INTENSAS E UM PANORAMA DOS PREJUÍZOS ASSOCIADOS ÀS ENCHENTES.....	20
2.3	ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS PARA FORMAÇÃO DAS CHUVAS	22
2.4	OCORRÊNCIA DE CHEIAS EM PERNAMBUCO.....	24
2.5	AÇÕES PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DE ENCHENTES EM PERNAMBUCO	30
2.5.1	Reconstrução da infraestrutura urbana	30
2.5.2	Previsão de Eventos Críticos e Prevenção de Catástrofes Naturais - Sala de Situação	31
2.5.3	Construção de barragens para controle de cheias	32
2.5.4	Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos (PARH) .	34
2.6	GEOTECNOLOGIAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS DE RECURSOS HÍDRICOS	35
2.6.1	Sensoriamento remoto e imagens de satélites	36
2.6.2	Aerofotogrametria e restituição estereoscópica	37
2.6.3	Bases altimétricas globais	38
2.6.4	Perfilamento a laser e a tecnologia LiDAR	39
2.7	PROGRAMA PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL – PE3D	40
3	METODOLOGIA	44
3.1	ÁREA DE ESTUDO	44
3.1.1	Localização e extensão da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém	44
3.1.2	Hidrografia e uso da água	45
3.1.3	Clima e Precipitações	46
3.1.4	Geologia e relevo	48
3.1.5	Solos	49
3.1.6	Vegetação e uso do solo	52
3.2	BARRAGENS	52
3.3	CENÁRIOS	54
3.4	DADOS HIDROLÓGICOS	55
3.4.1	Pluviometria	55
3.4.2	Fluviometria	58
3.5	MODELAGEM HIDROLÓGICA - CAWM – CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL	59
3.6	OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS	66

3.6.1	Dados de entrada	67
3.6.2	Balço hídrico	68
3.7	DADOS CARTOGRÁFICOS	70
3.8	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E PRÉ-PROCESSAMENTO DAS SEÇÕES	70
3.9	MODELAGEM HIDRODINÂMICA UNIDIMENSIONAL DA BACIA DO RIO SIRINHAÉM	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1	RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO PARA O MODELO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO SIRINHAÉM	76
4.2	VAZÕES REGULARIZADAS PELAS BARRAGENS	87
4.3	MODELAGEM HIDRODINÂMICA UNIDIMENSIONAL EM ÁREAS URBANAS	87
4.3.1	Barra de Guabiraba	88
4.3.2	Cortês	93
4.3.3	Gameleira	99
4.3.4	Sirinhaém	105
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	111
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS	16

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento imprescindível para a humanidade, seja sob os aspectos social ou econômico, e ocupa a maior parte da terra. Entretanto, de toda sua extensão, apenas 3% deste recurso é potável e 1% é utilizável pelo ser humano, visto que, na distribuição de água no planeta terra, apenas esta última parcela está contida em rios, lagos, águas subterrâneas e da chuva (VICTORINO, 2007).

Tucci (1997) afirma que “a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório” (TUCCI, 1997, p. 40), desse modo, as precipitações incidem sobre o solo até atingir o máximo das taxas de infiltração e, se o fenômeno continuar, começa a surgir os crescentes escoamentos superficiais. Esse comportamento pode gerar inundações e, em seguida, a transposição de sedimentos no rio, a erosão e a destruição da vegetação local e até as cidades. Segundo o autor, o grau de inundação e os problemas resultantes dependem da ocupação da várzea, seja para habitação, recreação, uso agrícola, industrial ou comercial.

O Brasil possui uma densa rede hidrográfica garantindo assim uma grande disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas, uma vez que a área territorial do país possui grandes dimensões. Com clima predominante tropical úmido, são identificados ao longo do seu território diversos fenômenos naturais relacionados aos recursos hídricos.

A região Nordeste possui clima predominante semiárido, sendo responsável por eventos de escassez hídrica. Porém, à medida que se aproxima do litoral, o clima passa a ser tropical úmido, com maior ocorrência de chuvas, como é o caso da região da Mata Sul pernambucana, onde está localizada a bacia do rio Sirinhaém. A grande quantidade de chuvas nas regiões pode vir a causar enchentes gerando grandes catástrofes para municípios localizados às margens de rios.

Desde 1632 são registradas ocorrências de chuvas no estado que causam grandes desastres às populações, ganhando destaque os anos de 2000, 2001, 2004, 2010, 2011 e 2017. Especificamente na bacia do rio Sirinhaém, objeto

deste trabalho de pesquisa, constatou-se que, após as enchentes de 2010, Barra de Guabiraba e Palmeirinha ficaram com três quartos de sua rede de unidades básicas de saúde comprometidas. A reconstrução/readequação dessas unidades depende da aquisição ou regularização dos terrenos em áreas seguras. Em Cortês as perdas e danos foram estimados em R\$ 56 milhões e representam 3% do total dos municípios afetados. Em termos de estabelecimentos de ensino, Gameleira apresentou 40 escolas destruídas ou danificadas, onde mais da metade das escolas atingidas eram localizadas em áreas rurais, podendo indicar uma maior dificuldade de realocação dos alunos (BANCO MUNDIAL, 2012).

Diante dos graves acontecimentos de enchentes no estado de Pernambuco, faz-se necessário voltar à atenção para tomadas de decisão que venham a mitigar ou minimizar as ocorrências. Portanto, é necessário que sejam desenvolvidos estudos e projetos relacionados à engenharia de recursos hídricos.

1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

Este trabalho buscou analisar os eventos de cheias na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém simulando dois cenários: o cenário atual, sem a operação de barragens de contenção de cheias, e um cenário futuro com a operação de barragens de contenção de cheias, as quais foram identificadas no Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos (PARH). Para isso faz-se necessário o uso de modelos matemáticos e simulações a partir de diferentes fontes de dados, considerando diversos cenários que podem vir a ser analisados por gestores de recursos hídricos.

Diante dos desafios associados aos recorrentes eventos de chuvas intensas que atuam sobre a região Nordeste e das catástrofes associadas a estes eventos, a realização de um trabalho deste porte se justifica, uma vez que irá demonstrar o efeito da construção de uma barragem de controle de cheias como a redução dos riscos em que a população está sujeita com tais eventos.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho foi analisar o comportamento dos eventos de cheias ocorridos na região da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém para dois cenários

distintos: o primeiro sem operações de controle de cheias, e o segundo com a construção de reservatórios que possibilitem o controle. Desta forma será possível avaliar a proposta de construções de barragens para contenção de cheias concebidas pelo órgão gestor de recursos hídricos do estado de Pernambuco.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos estão apresentados a seguir:

- Simulação hidrológica das vazões do rio Sirinhaém para os pontos de interesse;
- Utilização da base cartográfica do mapeamento do Pernambuco Tridimensional nas simulações hidrodinâmicas;
- Simulação hidrodinâmica dos eventos de cheias dos anos de 2000, 2001, 2004, 2010, 2011 e 2017;
- Avaliação das barragens de controle de cheias e usos múltiplos, sugeridas pelo corpo técnico gestor de recursos hídricos do estado de Pernambuco.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados os conceitos considerados importantes para a compreensão do trabalho de pesquisa desenvolvido.

2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E O DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO

A gestão hídrica passa a ser fundamental para evitar o descontrole no uso das águas, visto que o consumo para suprimento industrial, agrícola e urbano tem perdas superiores a 30%. Além disso, volumes de águas de rios, lagos e oceanos têm sido danificados por serem utilizados como transportadores de águas residuais industriais e urbanas. Outra forma de desperdício é o uso de águas de primeira classe para fins industriais ou agrícolas quando o uso de águas de qualidade inferior poderia ser satisfatório (YASSUDA, 1993).

Nesse sentido, em 08 de janeiro de 1997 foi sancionada a Lei nº 9.433 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos com objetivo de assegurar a todas as gerações a disponibilidade de águas em condições de uso; utilizar racional e integralmente os recursos hídricos e prever possíveis eventos hidrológicos críticos de origem natural ou do uso inadequado. Junto a isso, deve-se adequar a gestão hídrica de uma região de acordo com suas diversidades físicas, bióticas, demográficas, econômicas, sociais e culturais. Ou seja, no que concerne às bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro, localizadas em sua quase totalidade na região semiárida, deve ser levado em consideração a disponibilidade e o uso das águas na economia local com o objetivo de implantar infraestruturas capazes de abastecer a região no consumo humano, animal e industrial.

Durante muitos anos a gestão das bacias hidrográficas foi realizada com pouco planejamento, sem a preocupação com o meio ambiente e com a sociedade, apenas visando o lucro (TUCCI, 1997). Com o crescimento demográfico e a crescente exploração das águas, os recursos naturais têm se deteriorado e, conseqüentemente, foram repensadas maneiras estruturais para minimizar os danos naturais e sociais, como o controle de cheias e da escassez hídrica.

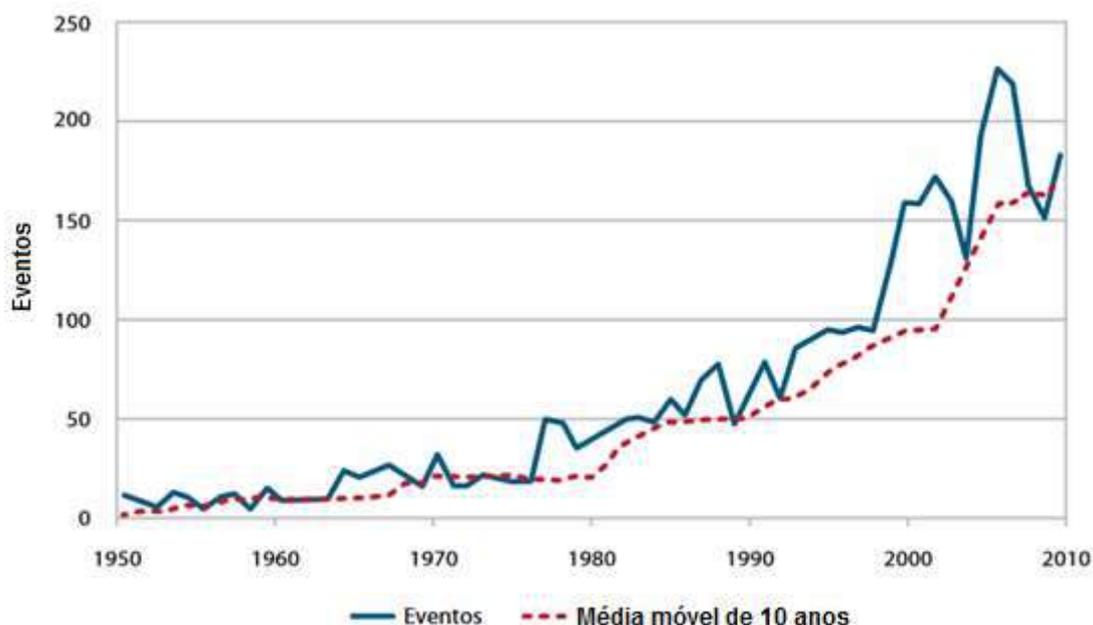
2.2 CHUVAS INTENSAS E UM PANORAMA DOS PREJUÍZOS ASSOCIADOS ÀS ENCHENTES

A variabilidade climática pode gerar eventos extremos, como o aumento ou diminuição de friagens, ondas de calor ou frio, chuvas intensas e veranicos. Na América Latina, foram registrados alguns casos incomuns: inundação nos Pampas Argentinos (2000 e 2002), seca na Amazônia (2005), granizo na Bolívia (2002) e em Buenos Aires (2006), o furacão Catarina no Atlântico Sul (2005) a seca no norte da Argentina (2008) e a que ainda afeta o Nordeste do Brasil em sua região semiárida, desde 2011. Sabe-se que, nos últimos 50 anos, a temperatura superficial da América do Sul subiu 0,75° C, enquanto as temperaturas mínimas tem aumentado 1° C, além de sofrer com o aumento de ondas de calor e diminuição na frequência de noites frias (MARENGO, 2009).

Na América do Sul, as chuvas intensas são responsáveis pelos deslizamentos de terra e inundações que resultam nos grandes números de mortes nas cidades, principalmente nas regiões mais pobres, pois aqueles que são desfavorecidos, normalmente, se concentram nas áreas de risco. Marengo (2009) defendeu que esses fenômenos são responsáveis pelos impactos nas atividades humanas, como a agricultura, saúde, desenvolvimento urbano e na gestão dos recursos hídricos, pois a economia dessa região é baseada nos recursos naturais motivados pelo clima. Ao analisar Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do Brasil, é percebido que as regiões vulneráveis às variabilidades climáticas são aquelas com IDH mais baixo e crescente desigualdade social, como o Norte e o Nordeste. Em geral, as mudanças climáticas podem ser os principais motivos para a emigração massiva devido ao desespero do povo que sempre busca melhores condições de vida.

Em esfera global, Jha, Block & Lamond (2012) apresentaram em seus estudos que, com a crescente devastação e ação do homem sobre a natureza, o índice pluviométrico aumentou e, conseqüentemente, as inundações. A Figura 1 a seguir apresenta o gráfico que representa as cheias globais entre 1950 e 2010 e o crescimento acentuado entre 1990 e 2010.

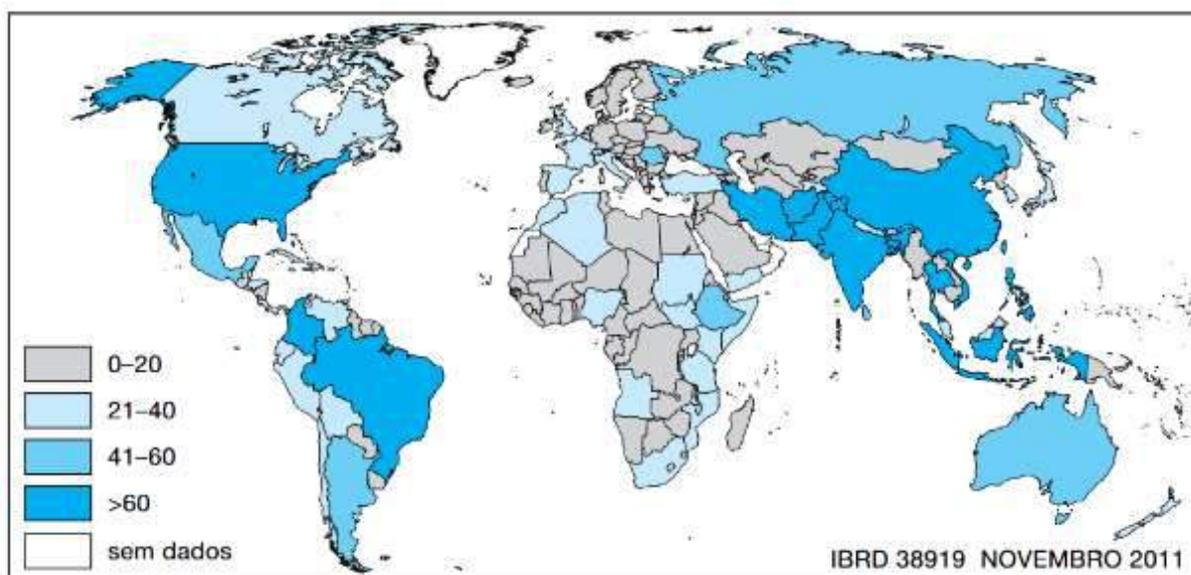
Figura 1 – Gráfico das inundações globais entre 1950 e 2010.



Fonte: Jha, Block & Lamond (2012)

Dentre os países com maior índice de chuvas intensas entre 1970 e 2011, destacam-se os Estados Unidos, o Brasil e a Colômbia, conforme pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Registro de inundações globais entre 1970 e 2011.



Fonte: EM-DAT, (2011) – Université Catholique de Louvain apud Jha, Block & Lamond (2012).

No Brasil, o Relatório de Danos Materiais e Prejuízos decorrentes de Desastres Naturais no Brasil no período de 1995 e 2014, realizado pelo Centro de Estudos

e Pesquisas sobre Desastres (CEPED) da Universidade Federal de Santa Catarina, indica que o principal agente de danos e prejuízos totais é climatológico e, em segundo lugar, o fator hidrológico. Em relação aos danos hidrológicos, o país teve o prejuízo de R\$ 72.332.318.263 em 9.002 registros. No Nordeste, o prejuízo foi de R\$ 14.348.909.780 em 1.963 registros, tendo maior pico de gastos em 2004 e 2009. Dentre os estados que requisitaram maior verba estão Pernambuco (22,8%), Bahia (20,0%), Ceará (15,5%) e Maranhão (13,1%). Na análise mensal, se percebe maior prejuízo entre abril e junho (CEPED, 2016).

Sendo assim, percebe-se que o Brasil é um dos países com maior índice de inundações associadas à variabilidade climática (JHA, BLOCK & LAMOND, 2011). Também pode ser observado que o Nordeste é uma das principais regiões a sofrer as consequências desses fenômenos, seja pelo excesso ou pela falta d'água, o que reflete o prejuízo econômico do país, principalmente, em Pernambuco.

2.3 ASPECTOS CLIMATOLÓGICOS PARA FORMAÇÃO DAS CHUVAS

O clima de uma região pode ser definido através das médias aritméticas de temperatura, pluviosidade, umidade relativa e relevo. Porém é necessário conhecer a dinâmica atmosférica da região, uma vez que os mesmos podem ser influenciados por mecanismos controladores de tempo e clima em escalas temporais e espaciais (SCHMIDT, 2014).

A região Nordeste possui diversos sistemas atmosféricos associados com os regimes de chuva atuantes, destacando-se o fenômeno El Niño, La Niña e Oscilação Sul (ENOS), no Oceano Pacífico, e o Padrão de Dipolo no Oceano Atlântico. Também são encontrados outros sistemas secundários, tais quais as Massas de Ar Tropical Atlântica, Zona de Convergência Intertropical, Frente de Ar Polar Atlântica, Zona de Convergência do Atlântico Sul, Vórtices Ciclônicos e Ar Superior, Ondas de Leste, Linhas de Instabilidade e as Brisas Marinhas e Terrestres (SANTOS, 2013).

O fenômeno El Niño é caracterizado pelo aumento anormal da temperatura das águas superficiais na porção central e leste do Oceano Pacífico, especificamente próximo a costa do Peru na América do Sul. Esta variação de temperatura é de 1°C a 6°C sobre a média térmica e acontece normalmente nos meses de

dezembro. Esta relacionada com a mudança das pressões lere e oeste, ocasionando secas, enchentes, tempestades e até furacões (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007). Diferente do que ocorre no El Niño, o fenômeno La Niña resfria as águas superficiais, originando chuvas no Nordeste o Brasil (SOUZA *et al.*, 1997).

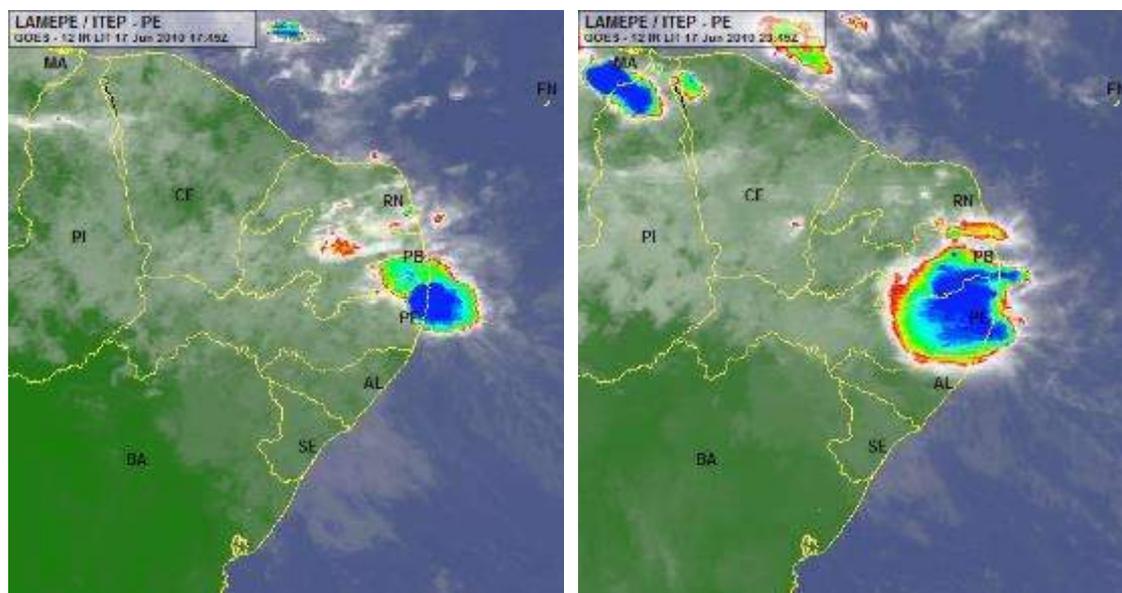
Outro fenômeno influenciador da precipitação no Nordeste é o Dipolo Atlântico, o qual modifica a temperatura do Oceano Atlântico na faixa tropical (ARAGÃO, 1998). Esta mudança de calor reflete a circulação sul da atmosfera, dificultando ou facilitando o desenvolvimento e nuvens levando a diminuição ou aumento da precipitação sobre a região (SANTOS, 2013).

As Ondas de Leste são um típico sistema meteorológico do Nordeste brasileiro, definidos como agrupamentos de nuvens que se movem no Atlântico de leste a oeste até atingirem a costa oriental da região Nordeste, ocasionando precipitações ao longo do litoral durante o período de maio a agosto. Esse fenômeno influencia principalmente as regiões costeiras, não avançando muito para o interior do continente (SANTOS, 2013).

A Figura 3 apresenta o monitoramento do evento de chuva corrido em junho de 2010. Pode-se observar a formação de nuvens no Atlântico Norte e avançando em direção ao litoral do nordeste, atingindo o litoral pernambucano e de Alagoas com chuvas bastante acentuadas.

Figura 3- Imagens de Satélite geradas pelo Lamepe.

a) 17 de junho de 2010 às 17h 45min GMT b) 17 de junho de 2010 às 23h 45min GMT



Fonte: Alves (2017).

Tendo em vista a variação das condições atmosféricas e suas influências no regime de chuvas, a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) possui em seu quadro técnico meteorologistas que acompanham imagens de satélite 24h por dia, atentos a emitirem alertas quando necessário e acionarem a Defesa Civil.

2.4 OCORRÊNCIA DE CHEIAS EM PERNAMBUCO

De acordo com os pressupostos teóricos de Tucci (1997), a variação de chuvas durante o ano é um fenômeno comum que influencia na vazão dos rios e que pode gerar inundações de acordo com o aumento do nível das águas nas calhas. Para o autor, as cheias ocorrem quando o fluido ultrapassa o leito de escoamento e ocupa áreas que antes eram vegetações, moradias, estradas, ruas, indústrias ou comércio.

Em Pernambuco, os órgãos responsáveis pelos registros desses acontecimentos são a Secretaria Executiva de Recursos Hídricos (SERH), a Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), a Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas (CONDEPE-FIDEM), a Coordenadoria de Defesa Civil (CODECIPE), o Corpo de Bombeiros Militares de Pernambuco (CBMPE).

- **28 de janeiro de 1632:** Primeiro registro de transbordamento do rio Capibaribe destruindo casas e vivandeiros à margem do rio;
- **1638:** foi construída a primeira barragem no leito do rio Capibaribe, sob ordens de Maurício de Nassau, com o objetivo de evitar as constantes inundações, esta foi chamada de dique de Afogados e possuía mais de dois quilômetros de largura;
- **Junho de 1842:** Primeira inundação de grande proporção do rio Capibaribe que foi registrada e destruiu casas, pontes e trens que saíram dos trilhos;
- **1854:** Maior enchente do século XIX foram 72 horas de chuvas intensas que atingiram todos os bairros do Recife e resultaram na queda da muralha da Rua da Aurora, na destruição de parte do Cais da Casa de Detenção, na ausência de comunicação da cidade com o interior e no choque dos navios que estavam no porto;
- **1869:** Outra grande enchente atinge a cidade do Recife, destrói a ponte da Torre, Barbalho e Remédios; nesse momento, o imperador D. Pedro II chama o engenheiro Rafael Arcanjo Galvão para analisar o problema;
- **16 de julho de 1870:** É realizado um projeto de construção de barragens nos principais afluentes do rio Capibaribe, elaborado pelo bacharel em matemática e ciências físicas José Tibúrcio Pereira de Magalhães, diretor de Obras e Serviços Públicos do Estado. As cheias continuam nos anos seguintes, em 1884, 1894 e 1899; neste último, no município de Vitória de Santo Antão, desaba o segundo encontro da ponte do rio Itapicuru;
- **1914:** O século XX inicia com outra enchente no Recife, deixando vários mortos;
- **14 de abril de 1920:** Outra catástrofe deixa o Recife isolado do resto das cidades, visto que postes e pontes foram derrubados, linhas telefônicas interrompidas e os trens paralisados. Alguns bairros como Caxangá, Cordeiro, Várzea e Iputinga ficaram totalmente isolados do resto da cidade;
- **1924:** Enchente atinge os bairros da Ilha do Leite, Santo Amaro, Afogados, Dois Irmãos, Apipucos, Torre, Zumbi e Cordeiro. O prédio do

serviço de saúde e assistência desaba e as obras do quartel do Derby sofrem grandes prejuízos após nova enchente;

- **1960:** Nova enchente atinge o Recife e, em 1961, o mesmo fenômeno deixa desabrigadas duas mil pessoas;
- **1965:** Enchente atinge os bairros da Caxangá, Iputinga, Zumbi e Bongi e, nas áreas mais próximas ao rio Capibaribe, a água chegou a atingir o telhado das casas;
- **1966:** Recife sofre danos ainda maiores, as águas atingiram mais de dois metros de altura nas áreas mais baixas e toda a Av. Caxangá foi inundada, cerca de dez mil casas foram destruídas e trinta mil sofreram danos, assim como, 175 pessoas morreram e mais de dez mil ficaram desabrigadas. Nesse contexto, o rio subiu de nível em 9,2 metros e o presidente da república Marechal Humberto de Alencar Castelo Branco veio ao Recife verificar o caso;
- **1967:** A Sudene apresenta um relatório que traz um projeto de implementação de barragens nos principais afluentes do Rio Capibaribe, mesma solução encontrada pelo engenheiro José Tibúrcio há mais de um século. Adiante, a década de 70 segue com grandes cheias consecutivas;
- **1970:** Toda a cidade de Recife e Olinda ficou inundada com uma precipitação de 336 mm em 16 horas, ou seja, intensidade de 65 mm/hora; as águas atingem também a zona da Mata Sul e o Agreste do Estado, por conta do transbordamento dos rios Una, Ipojuca, Formoso, Tapacurá, Pirapama, Gurjaú, Amaraji e outros. Na cidade do Cabo quatro dos seus cinco hospitais foram inundados e várias indústrias pararam suas atividades. Ao final do evento, 500 mil pessoas foram atingidas, 150 morreram e 1266 casas foram destruídas;
- **1971:** Se inicia a construção da barragem de Tapacurá, concluída em 1973. Desse modo, a então Secretaria de Obras do governo do Estado anuncia que a Barragem de Tapacurá era solução definitiva para dois graves problemas que afetavam o Recife: abastecimento de água da população e "o fim" das enchentes no Recife;
- **1974:** Recife, São Lourenço da Mata e o município de Mucaparana sofrem mais uma vez com inundações. Nesse caso, a Comissão de Defesa Civil

conseguiu retirar a tempo a população das áreas ribeirinhas e apenas uma ponte em São Lourenço da Mata foi parcialmente destruída e vinte pessoas morreram em Macaparana;

- **17 e 18 de julho de 1975:** Ocorreu a maior enchente já registrada em Pernambuco, que atingiu 50% de toda a área urbana do Recife e mais vinte e cinco municípios cortados pelo Rio Capibaribe. Ao final, foram contabilizadas 107 mortes e 350 mil pessoas desabrigadas. Na capital e no interior, 1000 km de ferrovias foram destruídos, pontes desabaram e casas foram arrastadas pelas águas. No Recife, 40% dos postos de gasolina, 31 bairros, 370 ruas e praças e quase todos os hospitais ficaram submersos, assim como foi cortado 70% do sistema de energia elétrica. Em consequência, o país ficou em alerta e em zelo pelo estado de Pernambuco. O então governador Moura Cavalcanti decretou estado de calamidade pública na capital e em nove municípios do interior e o presidente da República, em cadeia nacional de televisão, anunciou medidas para socorrer as cidades pernambucanas atingidas. O prejuízo desse evento foi calculado em 1,5 bilhões de cruzeiros (2,8 bilhões de Reais em valores atuais);
- **21 de julho de 1975:** Surge boato de que a barragem de Tapacurá havia estourado, e assim o caos tomou conta da cidade em apenas duas horas. Mais de 100 pessoas foram atendidas na emergência, a multidão corria de um lado para o outro, os carros ultrapassavam os sinais, as casas comerciais e a agência central dos Correios foram fechadas e, no Hospital Barão de Lucena, várias pessoas se jogaram do primeiro andar. Para resolver o problema, a polícia foi colocada à frente e estava habilitada a prender quem continuasse a espalhar tal boato;
- **Maio de 1977:** O rio Capibaribe sofre nova enchente e dezesseis bairros do Recife, Olinda e outras quinze cidades do interior do estado sofrem com as inundações. Apesar da evacuação das áreas ribeirinhas 24 horas antes, quinze mil pessoas foram desabrigadas. Nesse caso, São Lourenço da Mata foi o município com maiores danos e, em Limoeiro, houve desabamento de ponte.

- **1988:** Foi construída a Barragem de Carpina, com 950 metros de comprimento, 42 metros de altura e capacidade de armazenar 270 milhões de m³ de água.
- **2000:** Apesar de serem anunciadas 40 dias antes do ocorrido pelos serviços de meteorologia, as autoridades não deram a importância devida e as enchentes resultaram em vinte e dois mortos, 100 feridos e mais de 60 mil pessoas desabrigadas. Assim, a precipitação atingiu 300 milímetros em apenas três dias e na Região Metropolitana do Recife aconteceram 102 deslizamentos de barreiras, enquanto em Belém de Maria 450 casas foram arrastadas, o centro de Palmares ficou completamente imerso e, em Barreiros, a água atingiu o teto do hospital da cidade. Foram trinta e três municípios seriamente atingidos, no qual dezesseis estavam em estado de emergência e dezessete em estado de calamidade pública, algumas das regiões foram Rio Formoso, Gameleira, Belém de Maria, Goiana, Cupira e São José da Coroa Grande. Para custear os prejuízos gerados pela chuva, o presidente da República, Fernando Henrique Cardoso, autorizou o gasto de 30% dos R\$ 129 milhões dos recursos emergenciais necessários para recuperação das áreas atingidas;
- **2004:** Chuvas fortes ocorreram entre janeiro e fevereiro, cujo efeito foram destroços de pontes e estradas, açudes rompidos, casas desabadas, populações inteiras ilhadas, treze municípios em estado de calamidade pública e 76 em estado de emergência. No sertão do São Francisco, Petrolina ficou vários dias isolados, pois as águas levaram a estrada de acesso à cidade e todos os açudes e barragens do Sertão e Agreste transbordaram, inclusive a Barragem de Jucazinho, em Surubim. Segundo o governo do estado de Pernambuco, os prejuízos foram totalizados em R\$ 54 milhões;
- **2005:** Chuvas ocorreram entre maio e junho, provocando enchentes em 25 cidades do Agreste, Zona da Mata e Litoral pernambucanos, gerando 36 mortes e mais de 30 mil pessoas desabrigadas. Contabilizaram-se cerca de sete mil casas parcialmente ou totalmente destruídas, 40 pontes, 11 rodovias estaduais atingidas (sete delas ficaram interditadas) e ruas

centrais, hospitais, escolas e casas comerciais de várias cidades inundadas. É importante citar um dos prejuízos sociais: mais de 30 mil estudantes da rede estadual de ensino ficaram vários dias sem aulas, visto que, em todas as cidades atingidas, 93 escolas foram danificadas e outras 11 foram transformadas em abrigos para os desabrigados. Dentre as cidades mais prejudicadas estão Moreno, Vitória de Santo Antão, Jaboatão, Nazaré da Mata, Pombos, Ribeirão, Cabo e Escada;

- **2010:** O maior evento de cheia da bacia do Rio Una foi registrado, deixando inúmeras cidades de Pernambuco e Alagoas devastadas. A região recebeu uma precipitação de 180 mm, isto é, 70% do esperado para todo o mês de junho em apenas uma madrugada, resultando em 284.632 pessoas afetadas (181.018 em Alagoas e 103.612 em Pernambuco), 102.420 indivíduos desalojados (47.897 em Alagoas e 55.643 em Pernambuco) e 79 mortes (34 em Alagoas e 20 em Pernambuco).

Em Pernambuco, contabilizou-se do desastre 14.136 habitações destruídas ou danificadas, 4.478 quilômetros de estradas, 142 pontes e 85 postos de saúde prejudicados, além de dois hospitais estaduais completamente destroçados e quatro hospitais municipais comprometidos. O governo decretou estado de emergência para 27 municípios: Agrestina, Altinho, Amaraji, Belém de Maria, Bezerras, Bom Conselho, Bonito, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Chã Grande, Escada, Gameleira, Gravatá, Ipojuca, Jaboatão dos Guararapes, Joaquim Nabuco, Moreno, Nazaré da Mata, Palmeirina, Pombos, Quipapá, Ribeirão, São Joaquim do Monte, Sirinhaém, Tamandaré, Vicência e Xexéu; e estado de calamidade em 12: Barreiros, Palmares, Correntes, Cortês, Jaqueira, São Benedito do Sul, Vitória de Santo Antão, Barra de Guabiraba, Água Preta, Catende, Maraiá e Primavera;

- **2011:** Nova catástrofe atinge Pernambuco desde a capital até às cidades interioranas. Dados da Defesa Civil afirmam que 55 cidades foram inundadas, 26 municípios decretaram situação de emergência e nove em calamidade pública. Em Barreiros, o rio Carimã subiu mais de dois metros e deixou cerca de 150 famílias desalojadas; além disso, 20% da

população ficou isolada e o fornecimento de água foi interrompido, pois não havia acesso para carros-pipa. Outra consequência foi o deslizamento de muitas barreiras, como a do quilômetro 62 da BR-232, em Pombos, e a da PE-60, em Ipojuca. Em Rio Formoso, os moradores foram abrigados nas escolas públicas e os hospitais e maternidades foram atingidos, assim, os pacientes tiveram que ser transferidos para o hospital de Sirinhaém.

A população volta ao medo em 2017 quando, segundo o governo de Pernambuco, novas enchentes provocaram o desalojamento ou desabrigo de 46.131 pessoas, cerca de cinco mil casas foram danificadas e 276 casas foram destruídas. Também foram danificados seis hospitais, 60 postos de saúde, 112 escolas municipais, 50 rodovias e 276 pontes. Diversas cidades ficaram sem fornecimento de energia, como Água Preta, Sirinhaém, Gameleira, Belém de Maria e Palmares. Em Cortês, município da Mata Sul, o Rio Sirinhaém destruiu a barreira de contenção construída na Barra da Gameleira e as águas invadiram as cidades, prejudicando a vida dos moradores e interceptando a PE-48.

2.5 AÇÕES PARA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DE ENCHENTES EM PERNAMBUCO

Diante dos graves desastres por inundações ocorridas em junho de 2010, atingindo dezenas de municípios da Mata Sul e da Região Metropolitana, o Governo de Pernambuco, através da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) firmou Contrato de Gestão com a Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP/OS).

Como medidas de mitigação de riscos, foram levantados investimentos para reconstrução da infraestrutura urbana, sistemas de prevenção de eventos críticos de catástrofes naturais, ampliação de calhas de rios e construção de barragens para controle de cheias.

2.5.1 Reconstrução da infraestrutura urbana

Após as enchentes de 2010 foi organizada pelo governo do estado de Pernambuco uma Operação de Reconstrução dos municípios atingidos, sendo disponibilizadas equipes das várias secretárias, coordenadas pela CODECIPE,

para viabilizar abrigos, alimentação, água e assistência médica à população atingida (BERNARDES, 2011).

Para dar celeridade às obras de infraestrutura e reconstrução das cidades foi aberta a conta do Fundo Especial de Amparo aos Municípios Atingidos pelas Chuvas (FAMAC). O instrumento foi criado por meio de Lei aprovada pela Assembleia Legislativa de Pernambuco e sancionada no dia 21 de junho, pelo governador Paulo Câmara. Os valores recebidos foram aplicados na assistência às populações afetadas, através de fornecimento de bens, de prestação de serviços, de execução de obras ou de entregas de unidades habitacionais. Os recursos do FAMAC foram provenientes de doações, auxílios, subvenções e outras contribuições de pessoas físicas ou jurídicas, bem como de entidades e organizações, públicas ou privadas, nacionais ou estrangeiras.

Entre os anos de 2010 e 2017 foram entregues 12.131 casas, construído o novo Hospital Regional de Palmares e Hospitais Municipais de Água Preta, Cortês, Barreiros e Jaqueira, recuperação ou construção de 71 pontes, recuperação de 185 vias urbanas e 28 muros de arrimo em diversos municípios atingidos pelas cheias, recuperação de 63,13 km de rodovias e 203 estradas vicinais, recuperação e reconstrução de 123 bueiros e 11 passagens molhadas, dragagem do rio Una, revitalização da Orla de Palmares e retirada de comerciantes das margens do rio, criação da Rede de Monitoramento Hidrometeorológico e aquisição de RADAR e sensores por meio da APAC, reconstrução de 29 escolas atingidas em 2010 na região da Mata Sul, e aquisição de 23 botes e 15 caminhonetes para os Bombeiros.

Em parceria com o a Caixa Econômica Federal, o governo Federal instituiu o Programa Cartão Reforma, o qual fornece subsídios para a reforma, ampliação ou conclusão da casa, para as famílias de baixa renda que se enquadrem nos critérios de concessão.

2.5.2 Previsão de Eventos Críticos e Prevenção de Catástrofes Naturais - Sala de Situação

Diante da ocorrência de sucessivos eventos críticos e a necessidade de acompanhamento em tempo real dos eventos hidrometeorológicos extremos, de forma sistemática, fornecendo respostas com mais agilidade e precisão, foi

criada a Sala de Situação da APAC, com o apoio da Agência Nacional de Águas (ANA). Esta busca dispor de um ambiente onde seja possível acompanhar as tendências hidrometeorológica em todo o estado de Pernambuco em tempo real, de tal forma que seja possível tomar as devidas decisões em tempo hábil. Através da Sala de Situação são elaborados os boletins meteorológicos e hidrológicos (rios e reservatórios) diariamente e elaborados os avisos hidrológicos e meteorológicos a respeito da possibilidade de eventos hidrometeorológicos extremos.

2.5.3 Construção de barragens para controle de cheias

O Sistema Integrado de Contenção de Cheias na Mata Sul tem o objetivo de controlar as enchentes em áreas das bacias hidrográficas dos rios Una e Sirinhaém (PERNAMBUCO, 2011). Uma delas está localizada no curso do rio Sirinhaém, conforme pode ser observado na Figura 4 a seguir.

Figura 4 – Blocos de mapeamento do Estado de Pernambuco.



Fonte: PERNAMBUCO (2011).

O investimento previsto para a construção do cinturão de barragens foi da ordem de R\$ 750 milhões. A Tabela 1 apresenta as informações de capacidade de armazenamento e total de investimento para cada barragem de controle de cheias, a partir das estimativas realizadas pela Secretaria de Recursos Hídricos em 2016 (PERNAMBUCO, 2016).

Tabela 1 – Barragens em construção para contenção de enchentes nas bacias do rio Una e Sirinhaém.

Barragem	Município	Capacidade (m ³)	Investimento Estimado (R\$)
Barra de Guabiraba	Barra de Guabiraba	16.000.000	82.000.000,00
Gatos	Lagoa dos Gatos	6.300.000	60.000.000,00
Igarapeba	São Benedito do Sul	42.500.000	159.000.000,00
Panelas	Cupira	17.000.000	85.000.000,00
Serro Azul	Palmares	303.000.000	365.000.000,00

Fonte: Adaptado de Pernambuco (2016).

Em janeiro de 2012 foram iniciadas as obras de construção da barragem Serro Azul localizada na bacia hidrográfica do rio Una, uma das cinco que foram projetadas pelo governo de Pernambuco para contenção de cheias na Mata Sul pernambucana e interior de Alagoas, através do Plano de Contenção de Enchentes.

As obras da Barragem de Serro Azul foram concluídas em dezembro de 2016. As obras das barragens de Panelas, na cidade de Cupira; Gatos, em Lagoa dos Gatos; Barra de Guabiraba, no município de mesmo nome, e Igarapeba, em São Benedito do Sul, foram paralisadas e ainda não há previsão de retorno. Quanto ao andamento das obras do cinturão para evitar novas enchentes, barragem de Panelas (Cupira) encontra-se com 47% das suas obras concluídas e foi projetada com capacidade de 17 milhões de metros cúbicos, a barragem de Gatos (Lagoa dos Gatos), encontra-se com 25% das obras concluídas, prevê a capacidade de armazenamento de 6,6 milhões de metros cúbicos, a barragem Barra de Guabiraba (Barra de Guabiraba), também se encontra com 25% as obras concluídas, com capacidade de armazenamento projetada de 19 milhões de metros cúbicos, e a barragem Igarapeba (São Benedito do Sul), encontra-se com 37% das obras concluídas, e prevê a capacidade de armazenamento de 70 milhões de metros cúbicos

Para a barragem de Barra de Guabiraba previu-se inicialmente um investimento federal de R\$ 61,43 milhões, 100% provenientes de recurso federal, e o convênio foi assinado em dezembro de 2012. A união repassou R\$ 17 milhões e o estado aportou R\$ 15,12 milhões. O orçamento da obra foi avaliado em cerca de R\$ 99 milhões, além de gastos com desapropriações, projetos, ações ambientais. Os

recursos complementares para a continuidade da obra até o presente não foram repassados.

2.5.4 Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos (PARH)

O Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos da Região Metropolitana do Recife, Zona da Mata e Agreste Pernambucano (PARH) prevê um universo de 39 reservatórios ao longo de nove bacias hidrográficas, dos quais 25 são reservatórios existentes, quatro projetados e 10 identificados. Além destes, o plano contempla dois sistemas adutores de grande porte, sendo um para atendimento urbano da Região Metropolitana de Recife (RMR) e outro para atendimento do agreste, além de sistemas menores já existentes (PERNAMBUCO, 2005).

Para a região do Agreste estava prevista a implantação de três novas barragens (Inhumas II, Mundaú II e Batateiras). As duas primeiras foram executadas para abastecimento no Agreste Meridional. Na área do conjunto formado pela Região Metropolitana de Recife (RMR), Mata Sul e MRVSA, foi prevista a implantação de onze barragens: uma na GL-2 (Grupo de Bacias Litorâneas 2), duas no Ipojuca, cinco na bacia do Sirinhaém e três na bacia do Una (PERNAMBUCO, 2005). A Tabela 2 apresenta a listagem dos reservatórios identificados/estudados.

Tabela 2 – Listagem dos Reservatórios Estudados.

Reservatório	Bacia	Capacidade (m ³)	Situação
Carpina	Capibaribe	270.000.000	Existente
Eng. Gercino Pontes		13.600.000	Existente
Goitá		52.000.000	Existente
Jucazinho		327.000.000	Existente
Machado		14.637.362	Existente
Poço Fundo		27.750.000	Existente
Tapacurá		94.000.000	Existente
Várzea do Una		11.570.000	Existente
Botafogo	GL-1	27.690.000	Existente
Bitá	GL-2	2.770.000	Existente
Duas Unas		23.550.000	Existente
Sicupema		3.200.000	Existente
Pirapama		60.937.000	Existente

Reservatório	Bacia	Capacidade (m³)	Situação
Utinga		10.270.000	Existente
Gurjaú*		3.200.000	Existente
Águas Claras		654.801	Existente
Moreno		2.684.000	Fase de Projeto
Palmeirinha	Goiana	6.050.000	Existente
Sirigi		17.237.500	Existente
Guararema		18.000.000	Existente
Arcoverde	Ipanema	16.800.000	Existente
Belo Jardim	Ipojuca	22.060.000	Existente
Eng. Severino Guerra		17.780.000	Existente
Pão de Açúcar		54.690.000	Existente
Eng. Crauassu		36.984.539	Identificado
Eng. Maranhão		52.925.350	Fase de Projeto
Prata	Una	40.000.000	Existente
Pau Ferro		12.174.950	Existente
Batateira		69.301.029	Identificado
Belém de Maria		87.187.500	Identificado
Maraial		125.312.334	Identificado
Sítio Manaus		192.650.000	Identificado
Sibiró	Sirinhaém	42.113.383	Identificado
Tapiruçu		31.770.050	Identificado
Camargibe		81.390.314	Identificado
Cucaú		200.090.700	Identificado
Gameleira		145.515.532	Identificado
Inhumas II	Mundaú	37.650.000	Fase de Projeto
Mundaú II		22.300.000	Fase de Projeto

* Barragem de Nível

Fonte: PERNAMBUCO (2005).

2.6 GEOTECNOLOGIAS PARA ELABORAÇÃO DE ESTUDOS E PROJETOS DE RECURSOS HÍDRICOS

As geotecnologias podem ser entendidas como novos processos ligados às geociências, trazendo avanços significativos no desenvolvimento de pesquisas, em ações de planejamento, em processos de gestão, manejo e em outros aspectos relacionados à estrutura do espaço geográfico. Tais considerações são importantes à medida que profissionais de diversas áreas atuam diretamente com questões espaciais (FITZ, 2008).

Estudos ambientais relacionados à área de recursos hídricos exigem resultados de alta precisão, porém existe uma dificuldade na obtenção de parâmetros físicos para representação do ambiente, devido a complexidade em executar medições em campo para grandes áreas. Sendo assim, as técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento são amplamente indicadas e aplicadas na área de recursos hídricos, a partir da utilização de satélites espaciais, sensores aerofotogramétricos instalados em aeronaves, radares e técnicas de perfilhamento a laser (MENDES & CIRILO, 2013).

2.6.1 Sensoriamento remoto e imagens de satélites

De acordo com Fitz (2008) o sensoriamento remoto é a “técnica que utiliza sensores para a captação e registro à distância, sem o contato direto da energia refletida ou absorvida pela superfície terrestre”. Tais registros são passíveis de serem armazenados, manipulados e analisados por meio de softwares específicos.

Pode-se considerar o sensor instalado em duas situações: 1) em uma aeronave em altitude preconcebida; 2) em um satélite artificial lançado em órbita terrestre. No primeiro caso podem-se obter fotografias aéreas convencionais ou digitais e imagens de radar. No segundo caso também se pode obter imagens de radar e/ou digitais em bandas específicas (FITZ, 2008).

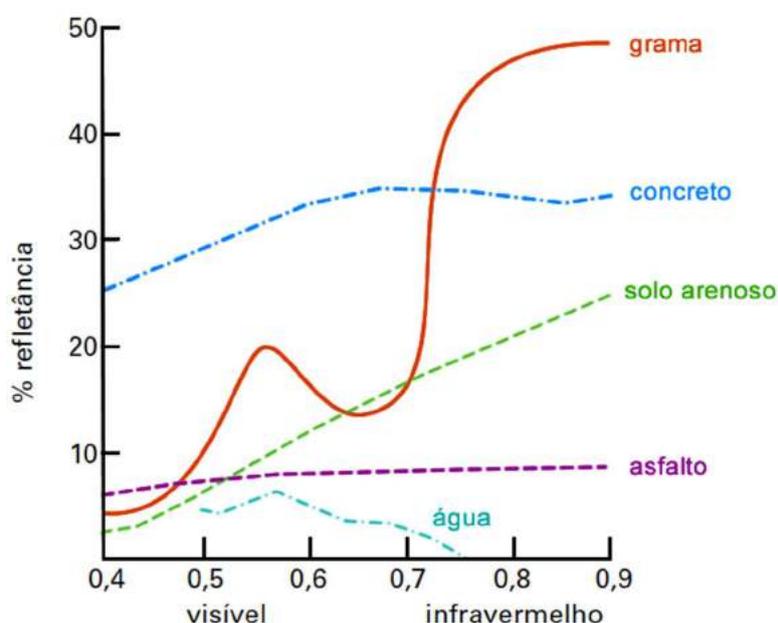
O sensoriamento remoto originou-se na década de 60 a partir do desenvolvimento da área espacial ao longo desses anos, ficando conhecida como a década da corrida espacial. Os satélites meteorológicos foram os primeiros a serem lançados, e através deles o sensoriamento remoto deu seus primeiros passos (MENESES *et al*, 2012).

As aplicações da Ciência de Sensoriamento Remoto via satélite abrangem o monitoramento dinâmico dos usos de solo e evoluções de biodiversidade, recursos naturais, precipitação, clima, manejo dos recursos hídricos da superfície, exploração de recursos hídricos no subsolo, inventário e monitoramento das coberturas vegetais e pastagens, monitoramento da produção primária das florestas, monitoramento de eventos catastróficos, como geadas, enchentes, secas, doenças e pragas das culturas, monitoramento dos

focos de queimadas, mapeamento topográfico, monitoramento da degradação e erosão de solos, estudos e mudanças climáticas, entre outros (LIU, 2015).

Os sensores utilizados para imageamento captam a energia emitida e refletida por um alvo de acordo com as faixas espectrais de diferentes comprimentos de onda. A refletância do alvo possui comportamento distinto em função da faixa espectral de comprimento de onda específico, conforme Figura 5. A definição de padrões de refletância permite a identificação, classificação e monitoramento dos elementos do meio ambiente.

Figura 5 – Representação do comportamento espectral de diferentes alvos em função do comprimento de onda.



Fonte: D'Arco (2009).

2.6.2 Aerofotogrametria e restituição estereoscópica

Na aerofotogrametria as imagens são tiradas por sensores acoplados em uma aeronave especialmente adaptada. O levantamento aerofotogramétrico deve ser planejado, estabelecendo as direções das linhas de voos. Devem existir faixas de superposição entre as fotos adjacentes de forma que não se perca nenhuma informação e obtenção de dados altimétricos. Os voos devem ser planejados de tal forma que as fotos tenham, entre duas faixas de voo paralelas, um recobrimento lateral de cerca de 20% e 30%, a fim de que eventuais problemas de identificação de uma imagem possam ser cobertos por uma imagem vizinha (FITZ, 2008).

A partir da aerofotogrametria é possível obter com precisão a restituição de elementos do meio ambiente e do espaço urbano como rios, vegetação, sistema viário, parcelamento urbano e até informações de altimetria para obtenção de um Modelo Digital de Terreno (MDT) (SLAMA, THEURER & HENRIKSEN, 1980).

O MDT pode ser obtido manualmente, a partir da coleta de pontos com o uso da estereoscopia em aparelhos restituidores ou estações digitais. Os pontos são obtidos através da leitura de coordenadas em perfis consecutivos ou pela geração de uma grade regular de pontos extraídos por curvas de nível, pontos cotados e linhas estruturais, obtidos por captação fotogramétrica (BRANDALIZE, 2004).

Quando comparadas aos satélites, as fotografias aéreas possuem algumas vantagens, como uma maior flexibilidade em variar a escala das fotografias em função da demanda de um projeto específico, maior disponibilidade em obter imagens em condições meteorológicas de ausência de nuvens, além de menores interferências devido a massas de ar, as quais podem vir a causar distorções em imagens de satélite (ALVES, 2017).

2.6.3 Bases altimétricas globais

Em fevereiro de 2000 foi estabelecido um projeto de cooperação entre diversas instituições, incluindo a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), com o objetivo de definir uma base altimétrica global confiável. Foi realizada uma missão com 10 dias de duração, coletando dados topográficos de alta resolução da superfície terrestre entre as latitudes -54° e 60° ao norte e ao sul. A metodologia utilizada para coleta de dados foi interferometria radar por única passagem, que é um sistema de imageamento do radar *Shuttle* com espaçamento de 60 metros entre as imagens obtidas (RIVIX, 2000).

A base de dados disponibilizada inicialmente para regiões fora dos Estados Unidos foi a SRTM-90, com pontos cotados espaçados em 90 m entre si. Para aquele país os dados levantados se referiam a pontos espaçados 30 m entre si. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realizou um procedimento de preenchimento de falhas e interpolação dando origem ao TOPODATA – base de dados espaciais de todo o território brasileiro equivalente à base de dados SRTM com pontos coletados espaçados a 30 m entre si (VALERIANO, 2008).

No presente todos os dados com espaçamento de 30m são disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (www.usgs.gov).

Em outubro de 2011 foi anunciado pelo *Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)* do Japão e a NASA, a liberação do Radiômetro Espacial Avançado de Emissão Térmica e Reflexão – ASTER, segunda versão. Esta gerou a segunda versão do Modelo Digital de Elevação Global (GDEM) a partir de imagens de par estéreas coletadas numa cobertura que abrange as latitudes 83° norte a 83° sul, englobando 99% da massa terrestre (NASA, 2011).

Os dados do ASTER GDEM com resolução espacial de 30 m estão disponibilizados gratuitamente para usuários de todo o mundo no Centro de Arquivos Distribuídos (LP DAAC) e *J-spacesystems*. Porém os usuários são alertados quanto a anomalias dos dados que impedem a efetividade do uso em determinadas situações, não se responsabilizando assim, a NASA e o METI, por quaisquer dados resultantes da utilização dos dados (NASA, 2011).

2.6.4 Perfilamento a laser e a tecnologia LiDAR

O Sistema de Perfilamento a Laser (*ALS – Airborne LASER Scanning*) adquire dados digitais de elevação do terreno com precisão equivalente ao GPS de forma mais eficaz e rápida, quando comparada aos levantamentos convencionais (BRANDALIZE, 2004).

O sistema de laser scanner, LiDAR (*Light Detection and Raging*) é um Sistema de sensoriamento remoto ativo que vem sendo gradativamente incorporado ao processo de mapeamento para representação dos terrenos e suas elevações (SILVA, 2014).

Um laser é disparado em direção a superfície o qual reflete em seguida, em direção ao sensor. O sensor, por sua vez, mede a intensidade do sinal de retorno e o tempo percorrido desde a emissão do laser até o retorno (CENTENO & MITSHITA, 2009).

A varredura é realizada no sentido transversal à direção do voo, com um ângulo de abertura suficiente para abranger a largura da faixa a ser escaneada (BRANDALIZE, 2004).

Uma das muitas aplicações do *laser scanner* aerotransportado é o mapeamento urbano, pois fornece informações altimétricas detalhadas que permitem detectar mudanças de relevo ou ocupação do solo. Também é capaz de estimar a elevação de objetos acima da superfície, podendo assim ser utilizado para monitoramento da vegetação (MIQUELES & CENTENO, 2005).

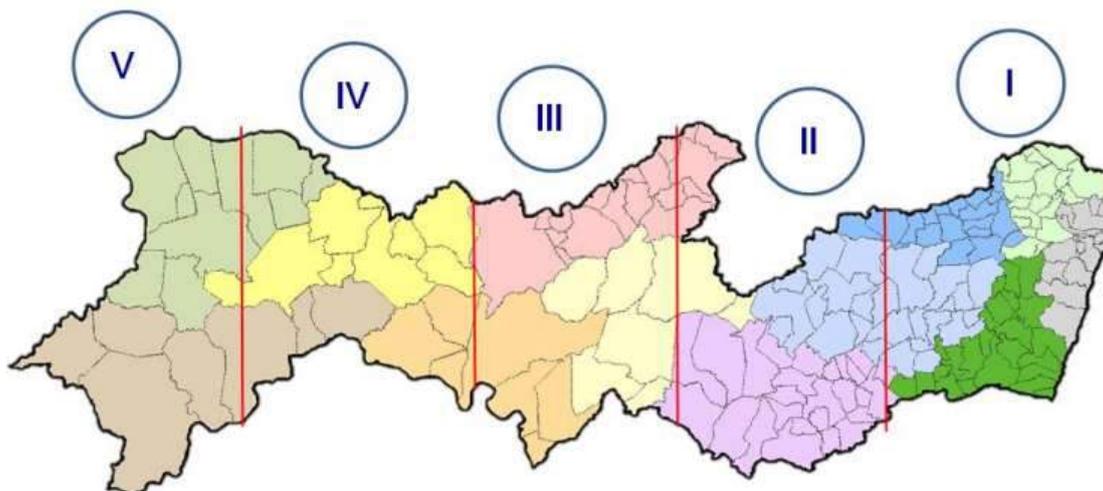
2.7 PROGRAMA PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL – PE3D

Diante das enchentes que atingiram os municípios da Mata Sul do estado de Pernambuco entre 2010 e 2011, iniciou-se a elaboração dos projetos de barragens de contenção de cheias e desenvolvimento do sistema de prevenção e alerta de inundação da bacia do rio Una. Para isso foram realizados serviços de mapeamento através de uma varredura a laser do terreno. Este mapeamento foi realizado pela Secretaria de recursos Hídricos e Energéticos - SHRE (PERNAMBUCO, 2016).

O Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) foi concluído em 2016, dentro do Programa de Sustentabilidade Hídrica de Pernambuco (PSHPE), financiado pelo Banco Mundial, o qual tem como objetivo ampliar o acesso da população à água potável e esgotamento sanitário (PERNAMBUCO, 2016).

Os serviços contratados contam com o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território do estado. Foram mapeados 98.149 km², subdivididos em 12.962 folhas articuladas agrupadas em cinco blocos, como pode ser visto na Figura 6. Para cada articulação será fornecido um conjunto de produtos gerados por meio de recobrimento aerofotogramétrico na escala 1:5.000 e da varredura a laser através da tecnologia LiDAR (CIRILO *et al*, 2015).

Figura 6 – Blocos de mapeamento do Estado de Pernambuco.



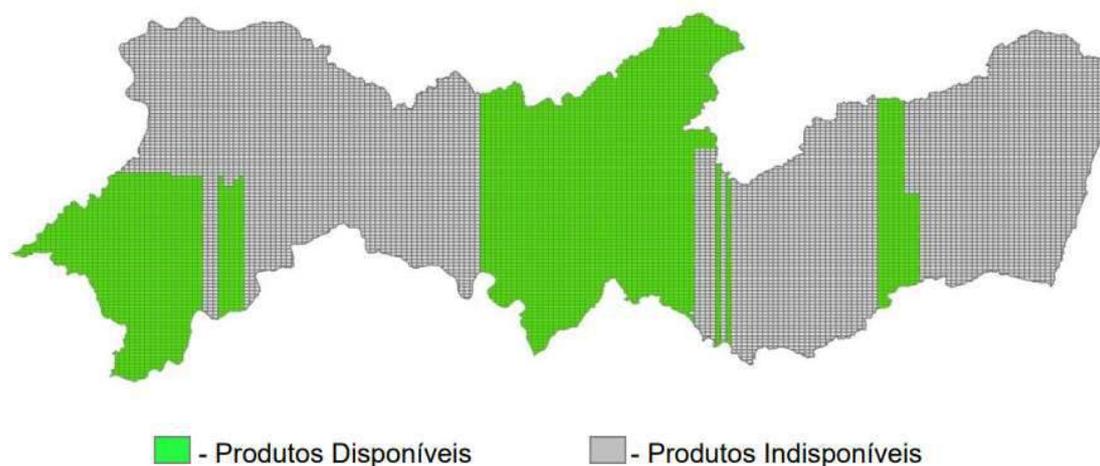
Fonte: Cirilo et al. (2014).

A partir do recobrimento aerofotogramétrico estão sendo geradas ortofotos na escala 1:5.000 com resolução espacial de 50 cm, fotoíndices e seus respectivos metadados. Já para o perfilhamento a laser estão sendo geradas imagens de intensidade hipsométrica, modelos digitais de elevação e de terreno nos formatos de arquivo de texto e Geotiff. São coletados um ponto a cada 2 m², sendo assim, ao concluir o trabalho de perfilhamento terão sido cotados aproximadamente 50 bilhões de pontos no território pernambucano. (CIRILO *et al*, 2014)

O conjunto de dados está sendo apresentado exclusivamente em meio digital e todo o conteúdo será disponibilizado integralmente para download através do endereço eletrônico www.pe3d.pe.gov.br. Os dados serão disponibilizados na medida em que sejam consistidos.

A Figura 7 apresenta as áreas onde já existem produtos validados e prontos para uso. O levantamento a laser de toda a área continental do estado, no entanto, foi concluído e parte dele utilizado neste trabalho.

Figura 7 – Quadriculas disponíveis em agosto de 2015.



Fonte: CIRILO (2015).

Ao todo 26 sedes municipais foram contempladas com o recobrimento aerofotogramétrico mais detalhado, abrangendo uma área de 870 km². Foram geradas ortofotos na escala de 1:1.000, Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos de Elevação (MDE) e Imagens Hipsométricas. Somando-se a trabalho na mesma escala desenvolvido pela COMPESA, têm-se hoje 41 sedes municipais com levantamento compatível com a escala 1:1000. Todos os produtos encontram-se georreferenciados nos sistema de coordenadas projetadas SIRGAS 2000, nos fusos 24S ou 25S.

Para cada quadricula do PE3D serão disponibilizados: Ortofotos digitais articuladas em formato GeoTIFF; Modelo Digital de Elevação em formato XYZI - MDE (ASCII); Modelo Digital de Elevação – MDE (RASTER) obtido através do MDE (ASCII), em formato GeoTIFF; Modelo Digital de Terreno em formato XYZ – MDT (ASCII); Modelo Digital de Terreno (MDT RASTER) obtido através do MDT ASCII, em formato GeoTIFF; Imagem de composição das informações hipsométricas e intensidade de retorno do pulso laser com resolução espacial de 1 m (MDE COMPOSIÇÃO), em formato GeoTIFF.

O PE3D vem sendo trabalhado para se tornar uma importante ferramenta de gestão e planejamento territorial no estado de Pernambuco. A partir desses dados já foram desenvolvidas aplicações para monitoramento e prevenção dos efeitos de enchentes e busca-se aplicações em outras áreas de conhecimento, como monitoramento de riscos geotécnicos e ações de controle de erosão, projetos de redes de água, esgoto, linhas de transmissão, estradas,

planejamento urbano, ações de controle e recuperação ambiental, implantação de empreendimentos agrícolas e industriais, entre outros (CIRILO *et al*, 2015).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são abordadas as metodologias e caracterizações da área de estudo considerada no trabalho de pesquisa desenvolvido.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia que foi objeto das aplicações aqui descritas é a do rio Sirinhaém, uma das mais significativas reservas hídricas do estado de Pernambuco.

3.1.1 Localização e extensão da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém

A bacia do rio Sirinhaém está localizada entre as latitudes sul 08°16'06" e 08°44'50" e as longitudes oeste 35°01'00" e 35°47'58". Limita-se ao norte com a bacia do rio Ipojuca e o grupo de bacias de pequenos rios litorâneos 3 (GL3), ao sul com a bacia do rio Una e o grupo de bacias de pequenos rios litorâneos 4 (GL4), a leste com o Oceano Atlântico e os grupos de bacia GL3 e GL4, e a oeste com a bacia do rio Una (APAC, 2019).

A bacia do rio Sirinhaém abrange 19 municípios, com uma área de 2.090,64 km², o equivalente a 2,13% da área do estado de Pernambuco. Desses municípios, apenas dois estão totalmente inseridos na bacia, Cortês e Gameleira, 7 possuem sede na bacia (Amaraji, Barra de Guabiraba, Camocim de São Félix, Gameleira, Joaquim Nabuco, Sairé e Sirinhaém) e os 10 restantes encontram-se parcialmente inseridos na bacia (Água Preta, Bezerros, Bonito, Escada, Gravatá, Primavera, São Joaquim do Monte, Tamandaré, Ipojuca e Rio Formoso) (APAC, 2019).

Figura 8 – Localização da bacia do rio Sirinhaém.

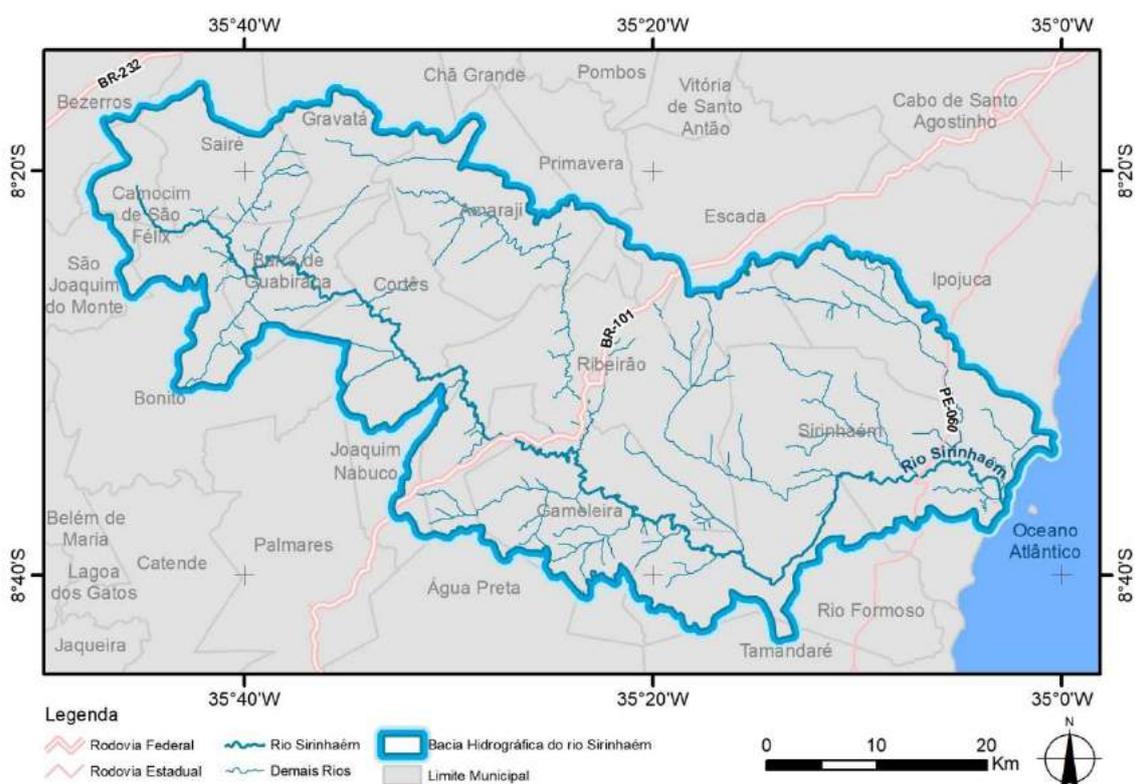


Fonte: A autora (2019).

3.1.2 Hidrografia e uso da água

O rio Sirinhaém é o principal curso d'água da bacia, com aproximadamente 158 km de extensão, tem sua nascente no município de Camocim de São Félix. Ao longo do seu percurso, com sentido noroeste-sudeste, atravessa os municípios de Cortês e Gameleira. Os principais afluentes do rio Sirinhaém são: na margem esquerda os riachos Sangue e os rios Amaraji, Camaragibe, Tapiuruçu e Sibiró; e, na margem direita, os riachos Seco, Tanque de Piabas e Várzea Alegre, Córrego Sabiá e Rio Cuiambuca. O afluente mais importante é o rio Amaraji, o qual nasce no município de Gravata e percorre aproximadamente 65 km até desaguar no rio Sirinhaém (APAC, 2019).

Figura 9 – Hidrografia da bacia do rio Sirinhaém.

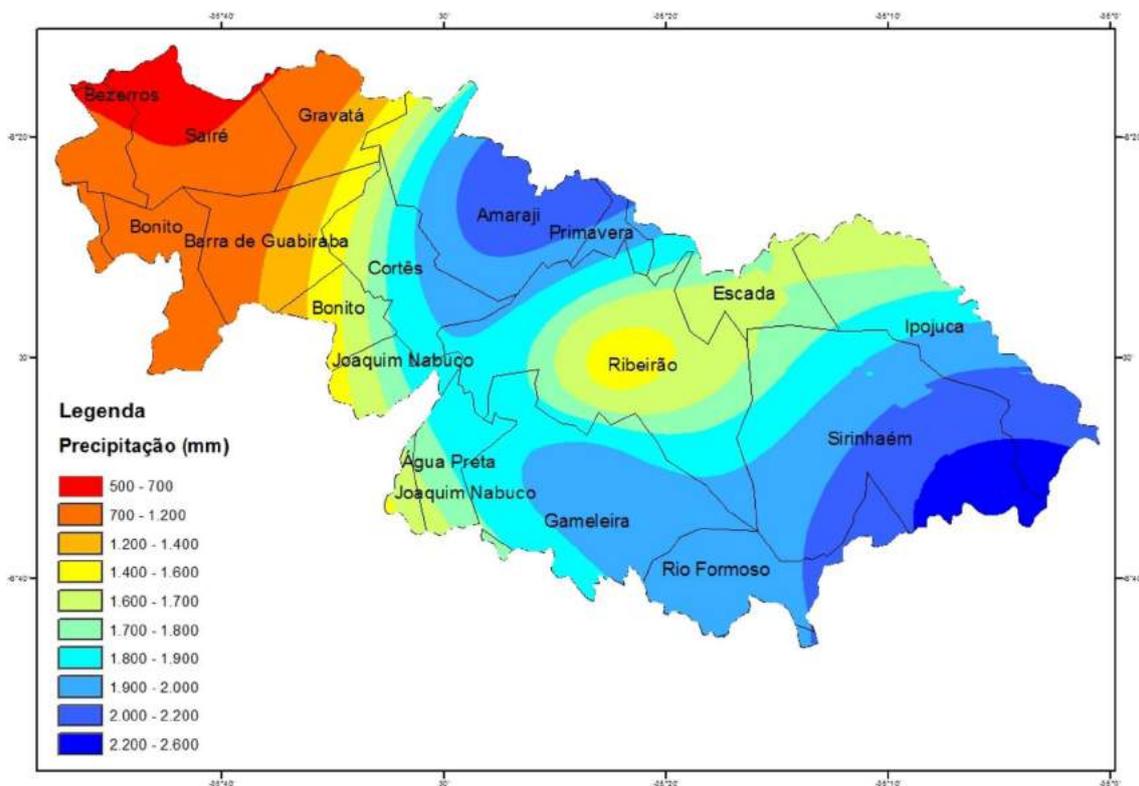


Fonte: A Autora (2019).

3.1.3 Clima e Precipitações

A bacia do rio Sirinhaém apresenta grande irregularidade na precipitação anual, com valores climatológicos de precipitação total anual oscilando, em média, entre 550 mm no setor oeste da bacia até 2.300 mm no setor leste. Os menores valores observados de precipitação correspondem a 680 mm, em Sairé, e 806 mm em Bonito, e os maiores valores de precipitação ocorrem em Sirinhaém (2.307 mm) e Rio Formoso (2.200 mm) (ITEP, 2011).

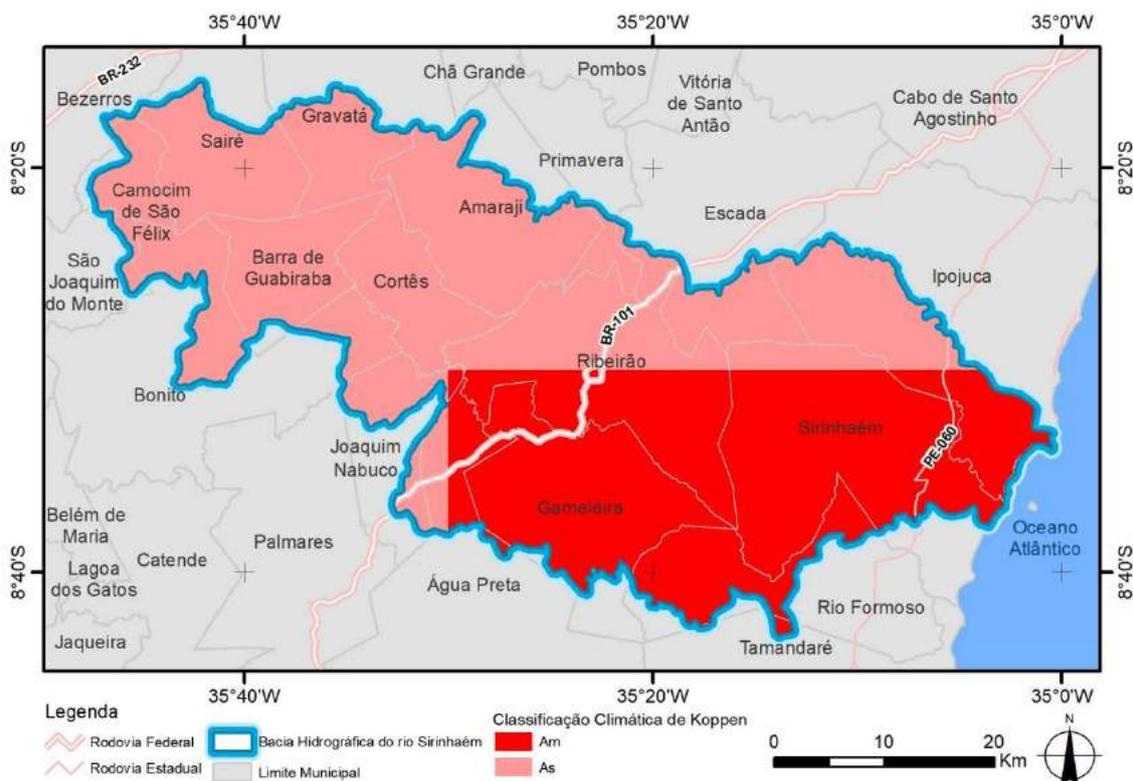
Figura 10 – Variação da precipitação na bacia do rio Sirinhaém.



Fonte: ITEP/OS (2011).

De acordo com a classificação climática de Köppen (1936) a bacia hidrográfica do rio Sirinhaém enquadra-se nos climas *As* e *Am*, conforme Figura 11. Sendo *Am* presente no litoral e *As* no interior da bacia. O clima *Am* apresenta clima de monção, caracterizado como de regiões tropicais onde o regime de pluviosidade e alternância entre períodos secos e chuvosos é governado pela monção. O clima *As* é caracterizado como clima tropical com estação seca, com temperaturas médias mensais superiores a 18 °C, com um dos meses do ano com precipitação inferior a 60 mm (SÁ JUNIOR, 2009).

Figura 11 – Classificação climática de Köppen na bacia do rio Sirinhaém.



Fonte: A Autora (2019).

3.1.4 Geologia e relevo

A área da bacia do rio Sirinhaém é composta em sua totalidade, cerca de 90%, por rochas cristalinas e cristalofílicas do Pré-Cambriano Indiviso, representada pelo Complexo Migmatítico-Granitóide - pCmi que ocorre no Maciço Mediano Pernambuco-Alagoas (PERNAMBUCO, 1998).

No contexto do Complexo Migmatítico-Granitóide predominam os granitos e granodioritos com contatos indistintos entre si. Os migmatitos, dos tipos estromático, nebulítico, epibolítico e polimigmatito se restringem aos municípios de Gameleira, Ribeirão, Amaraji e Cortês. São compostos predominantemente por granodiorítica com paleossoma anfibolítico e neossoma quartzo-feldspático, sendo frequentemente granitizados com inclusão de corpos graníticos de difícil distinção (PERNAMBUCO, 1998).

Os corpos migmatíticos são bastante orientados na direção NE-SW e eixos antiformes e sinformes com idêntica orientação. São mais evidenciadas as estruturas dúcteis do que as rúpteis (PERNAMBUCO, 1998).

Poucos falhamentos são marcantes nessa área, podendo ser assinaladas as falhas transcorrentes dexas de Sirinhaém e Gameleira, com direção NW-SE, além de outras de movimentos indistintos, com direção NE-SW que ocorrem em Camocim de São Félix e Cortês (PERNAMBUCO, 1998).

Os 7% restantes são cobertos por aluviões recentes, os quais recobrem rochas da unidade cretácica, a formação Cabo, representada por sedimentos conglomeráticos, arcoseanos e siltico-argilosos, além de vulcanitos na forma de sills ou derrames, de composição básica – traquito a basalto. Estas ocorrências representam a terminação sul da Bacia Sedimentar do Cabo. Ainda são encontradas ocorrências de argila e titânio, porém não representam importância econômica (PERNAMBUCO, 1998).

3.1.5 Solos

São encontrados com amplo domínio na faixa costeira solos do tipo Podzólicos e Latossolos. Além destes ocorrem solos Aluviais, Areias Quartzosas Marinhas, Solos Indiscriminados de Mangue e Regossolos. São classificados como agricultáveis os Podzólicos (PE15 e PE17), os Aluviais (A2) e os Regossolos (REe2). Os Podzólicos (PV3 e PV6), os Latossolos (LVd6) e Areias Quartzosas Marinhas (AMd) são considerados apropriados para pastagem. Os Latossolos (LVd3) e os solos Indiscriminados de Mangue (SM) são reservados ao refúgio silvestre e recomposição da flora e fauna (PERNAMBUCO, 1998).

Existem grandes áreas de Latossolos e Podzólicos cultivados com cana de açúcar, porém com baixa produtividade e presença de processos erosivos (PERNAMBUCO, 1998).

Os Podzólicos (PE15) são solos de tipo B textural, com baixa e média fertilidade natural, ácidos, com boa capacidade de retenção hídrica devido a sua textura argilosa embora aproveite parcialmente as chuvas, chegando a gerar escoamentos representativos em chuvas mais fortes, sobretudo devido ao relevo ondulado. Seu uso para fins agrícolas é limitado devido ao seu relevo. Podem ser utilizados em culturas diversificadas de curto e longo ciclo, desde que corrigidas as deficiências de fertilidade natural, para obtenção de melhores produtividades através de práticas simples de conservação de solos (PERNAMBUCO, 1998).

Os Podzólicos PV3 e PV6 e os Latossolos LVd6 apresentam relevo fortemente ondulado, sendo assim um risco a erosão. São solos relativamente profundos, ácidos de baixa fertilidade natural, elevada capacidade de retenção hídrica e baixa capacidade de infiltração nas curvas mais intensas, gerando escoamentos superficiais representativos, contribuindo para a formação de processos erosivos. Para evitar o surgimento de erosões deve-se utilizar práticas de conservação do solo. Indica-se a utilização deste solo para pastagens, tendo na meia encosta cinturões de espécies florestais, forrageiras ou não, que servirão para atenuar os processos erosivos (PERNAMBUCO, 1998).

Os Solos Aluviais (Ae2) podem ser ligeiramente ácidos até ligeiramente alcalinos. Possui drenagem moderada a imperfeita devido às diferenciações texturais presentes em horizontes com maior teor de argila, apresentando assim certo risco à salinização. Esta variação textural com predominância de argila na profundidade influencia a permeabilidade, tornando-a reduzida. Ocorrem normalmente em faixas estreitas e longitudinais às margens dos rios. Não deve ser utilizado em épocas de secas, podendo causar riscos de perda de safras. As maiores acumulações de água localizam-se distante das áreas deste solo, sendo não recomendável a irrigação, uma vez que estão sujeitos à erosão e salinização quando irrigados sem adequada rede de drenagem. Para cultivo nesses solos destacam-se: milho, feijão, capineiras para corte e cana-de-açúcar (PERNAMBUCO, 1998).

As Areias Quartzosas Marinhas Distróficas (AMd) são solos excessivamente arenosos e drenados, muito ácidos e com baixa fertilidade natural. Ocorrem na baixada litorânea próxima à orla marítima. Absorvem bem as chuvas nos primeiros períodos, porém nos períodos chuvosos há elevação do lençol freático nas áreas mais baixas. Possuem baixa retenção de umidade e nutrientes e podem sofrer erosão eólica nas áreas expostas às brisas marítimas. Também são indicadas para áreas de pastagens, com plantio de coqueiros e mangueiras (PERNAMBUCO, 1998).

Os Latossolos LVd3 apresentam textura argilosa e relevo montanhoso. Possuem alto potencial de escoamento superficial e altos riscos de erosão. São solos profundos, ácidos e de baixa fertilidade natural e fortes limitações ao uso

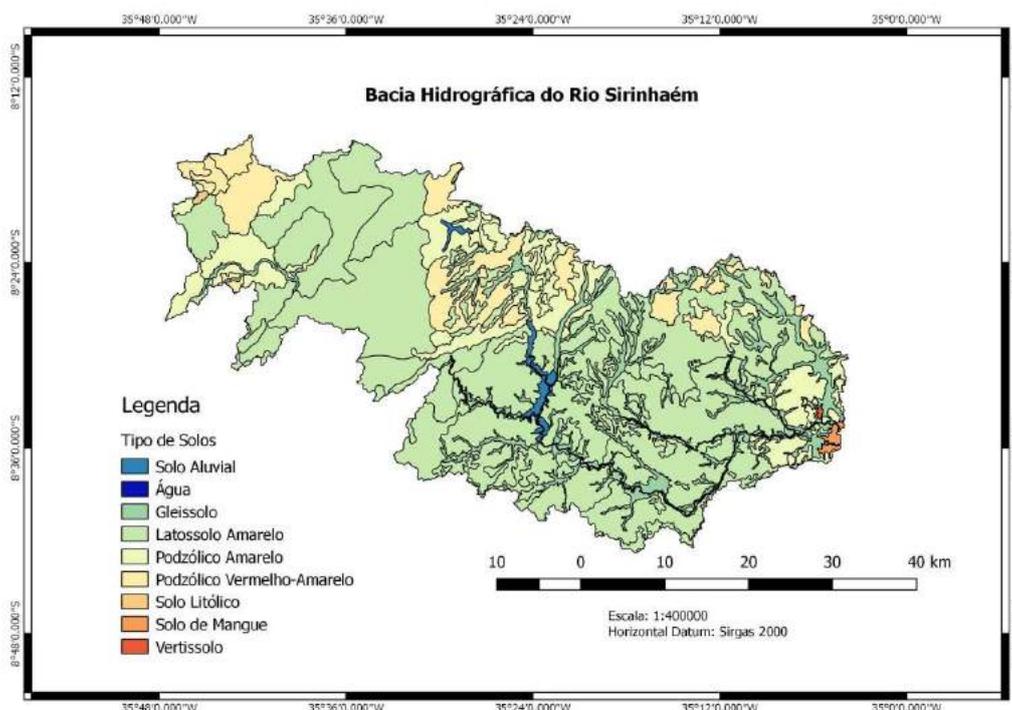
econômico. São indicados para preservação da flora e fauna (PERNAMBUCO, 1998).

Os Solos Indiscriminados de Mangue (SM) são solos halomórficos, alagados próximos às orlas marítimas devido a influência da água e movimento das marés. São gleyzados, pouco desenvolvidos, com elevado teor de sair e sedimentos finos. São ricos em animais de mangue, sendo indicado para preservação da fauna e flora e não para agricultura (PERNAMBUCO, 1998).

Os Regossolos (REe2) são mediamente desenvolvidos, apresentam textura arenosa, capazes de armazenar chuva gerando baixo escoamento. São suscetíveis a erosão e podem ser utilizados na agricultura em áreas de relevo com ondulação suave e nas pastagens em áreas com relevo ondulado (PERNAMBUCO, 1998).

A Figura 12 apresenta a classificação dos solos na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém. Esse mapeamento foi essencial para obtenção de parâmetro do modelo hidrológico utilizado neste trabalho, conforme discutido em seção posterior.

Figura 12 – Mapa de solos da bacia do rio Sirinhaém.



Fonte: Bandin (2019).

3.1.6 Vegetação e uso do solo

Na maior parte da área da bacia observa-se a ocorrência de vegetação de cana-de-açúcar, correspondente a cerca de 70% da área, seguindo por mata atlântica (10,75%) e solo exposto (5,98%), conforme pode ser observado na figura a seguir (PERNAMBUCO, 1998).

A Tabela 3 apresenta a classificação do uso e ocupação do solo de acordo com o Plano Estadual de recursos Hídricos (PERH) do estado de Pernambuco.

Tabela 3 – Classificação de vegetação, uso e ocupação do solo para bacia do Sirinhaém

Classe	Área (km²)	Percentual (%)
Açude	1,29	0,06
Solo exposto	123,85	5,98
Mangue	12,23	0,59
Oceano	2,68	0,13
Veg. Arbust. Arbó. Fechada	4,37	0,21
Mata atlântica	222,58	10,75
Antropismo	8,27	0,40
Cana	1425,04	68,87
Área urbana	3,72	0,18
Área urbana	12,75	0,20
Uso não identificado:		
<i>NUVEM</i>	141,49	6,48
<i>SOMBRA</i>	124,08	5,99
TOTAL	2069,60	100,00

Fonte: Adaptado PERNAMBUCO (1998).

3.2 BARRAGENS

Foram identificadas cinco barragens propostas pelo PARH e a barragem de Barra de Guabiraba:

- B01 – Barra de Guabiraba;
- B02 – Gameleira;
- B03 – Cucaú;
- B04 – Camaragibe;
- B05 – Tapiruçu;
- B06 – Sibiró.

A barragem B01 – Barra de Guabiraba localiza-se no município de Barra de Guabiraba, o qual possui uma área de 114 km² e abrange uma população de 13.900 habitantes, correspondente a 0,16% do total do estado. A barragem, será executada em CCR com cota de coroamento igual a 509 m. O projeto da barragem indicou um volume de acumulação de 19 milhões de m³, indicando uma área de 1.324.269 m² de espelho d'água correspondente à capacidade. O barramento controlará uma área de drenagem de 235,98 km² na bacia do rio Sirinhaém.

Não há informações de dimensionamento das barragens apresentadas no PARH, apenas o volume de acumulação. Através da curva cota x área x volume de cada barragem, levantada neste trabalho para a locação prevista das barragens, foi possível estimar as características físicas dos barramentos, utilizando como parâmetro o volume fornecido pelo PARH. A Tabela 4 apresenta as áreas de drenagem e volumes de acumulação das barragens e sub-bacias por elas geradas.

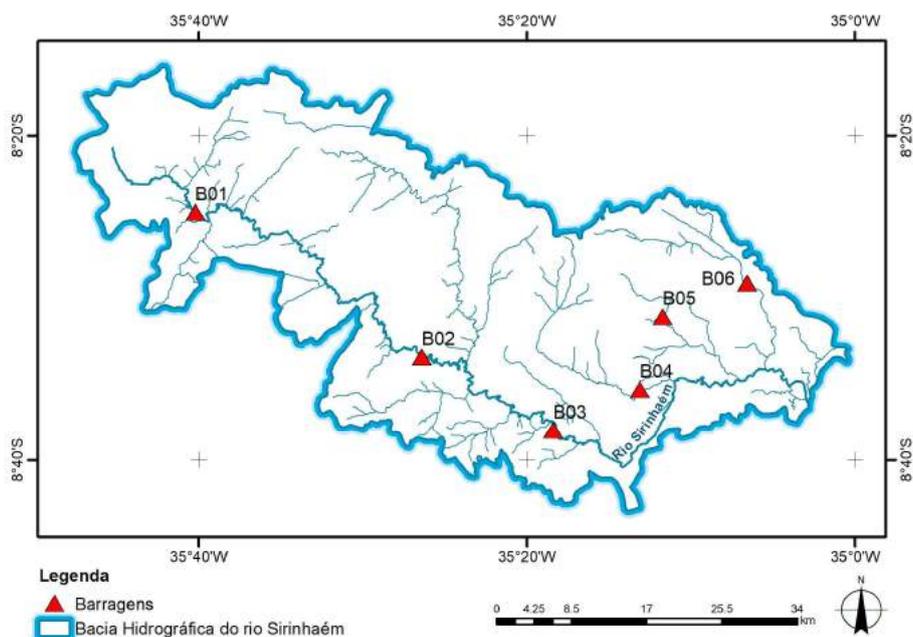
Tabela 4 – Barragens concebidas/iniciadas na bacia do Sirinhaém

Barragem	Município	Área de Drenagem (km²)	Volume de acumulação (milhões m³)
B01 - Barra de Guabiraba	Barra de Guabiraba	235.98	19
B02 - Gameleira	Gameleira	362.92	145.52
B03 - Cucaú	Rio Formoso	712.11	200.09
B04 - Camaragibe	Sirinhaém	154.14	81.39
B05 - Tapiruçu	Sirinhaém	73.88	31.77
B06 - Sibiró	Ipojuca	100.41	42.11

Fonte: A autora (2019).

A Figura 13 apresenta a localização das barragens estudadas para a bacia do rio Sirinhaém e as sub-bacias cujo escoamento será controlado por cada uma, as quais serão utilizadas no estudo hidrológico e hidrodinâmico.

Figura 13 – Localização das barragens da bacia do rio Sirinhaém.

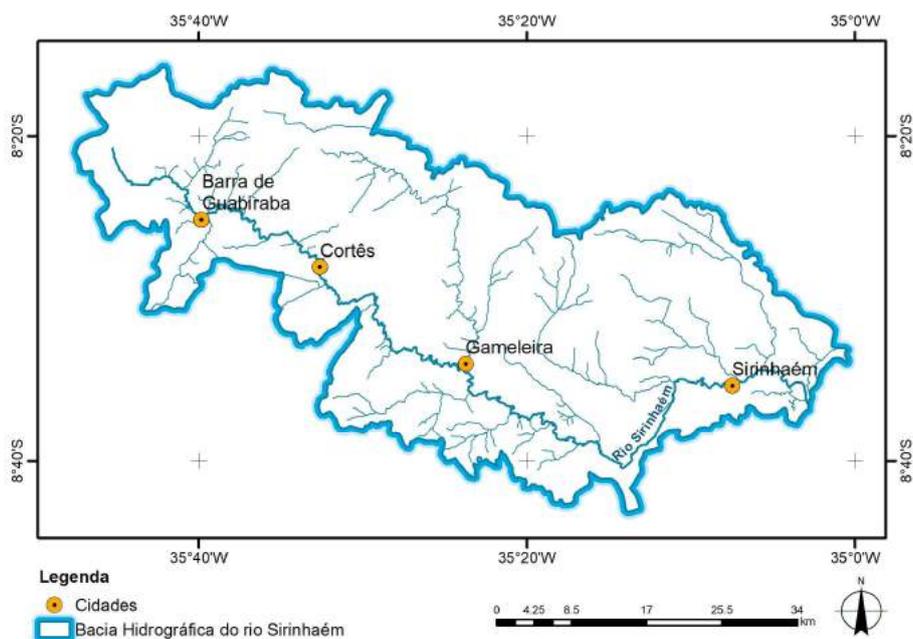


Fonte: A Autora (2019).

3.3 CENÁRIOS

A fim de simular as manchas de inundação provocadas pelas cheias dos anos 2000, 2004, 2010, 2011 e 2017, foram selecionadas quatro cidades ao longo do curso do rio Sirinhaém: Barra de Guabiraba, Cortês, Gameleira e Sirinhaém. A Figura 14 apresenta a localização das cidades.

Figura 14 – Localização das cidades analisadas na bacia do rio Sirinhaém.



Fonte: A autora (2019).

Para cada município foram elaborados dois cenários:

- Cenário 1: simulação das vazões nas seções a montante das cidades considerando o cenário atual, sem barragens de controle de cheias, para os eventos de cheias supracitados;
- Cenário 2: simulação das vazões nas mesmas seções considerando cenário futuro, com a construção das barragens de controle de cheias levantadas pelo PARH.

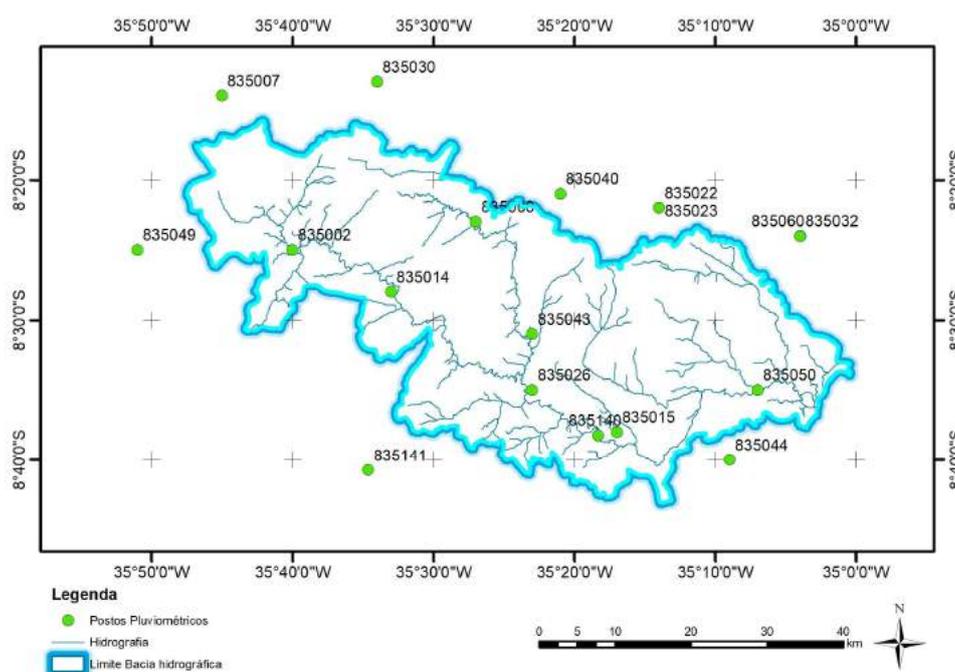
3.4 DADOS HIDROLÓGICOS

O estudo dos dados hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém foi realizado através da análise de séries pluviométricas e fluviométricas ao longo da bacia. Estes foram obtidos do portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas – ANA.

3.4.1 Pluviometria

Foram selecionados 28 postos pluviométricos distribuídos ao longo da bacia e nas áreas vizinhas, os quais podem ser identificados através das informações da Tabela 5 e localizados na Figura 15.

Figura 15 – Localização das estações pluviométricas.



Fonte: A autora (2019).

Tabela 5 – Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica

Nome	Código	Coordenadas Geográficas		Período de dados
		Longitude	Latitude	
Engenho Mato Grosso	835140	-8.6375	-35.3056	1989-2017
Sirinhaém	835050	-8.5833	-35.1167	1963-1985
Ribeirão	835043	-8.5167	-35.3833	1963-1979
Palmares	835141	-8.6794	-35.5772	1990-2018
Rio Formoso	835044	-8.6667	-35.15	1934-1975
Cortes	835014	-8.4667	-35.55	1963-1993
Gravatá	835030	-8.2167	-35.5667	1933-1985
Escada	835022	-8.3667	-35.2333	1920-1983
Amaraji	835000	-8.3833	-35.45	1963-1983
Barra do Guabiraba	835002	-8.4167	-35.6667	1963-1992
Bezerras	835007	-8.2333	-35.75	1963-1992
São Joaquim do Monte	835049	-8.4167	-35.85	1962-1991
Cucau	835015	-8.6333	-35.2833	1971-1991
Gameleira (RFN)	835025	-8.5833	-35.3833	1932-2018

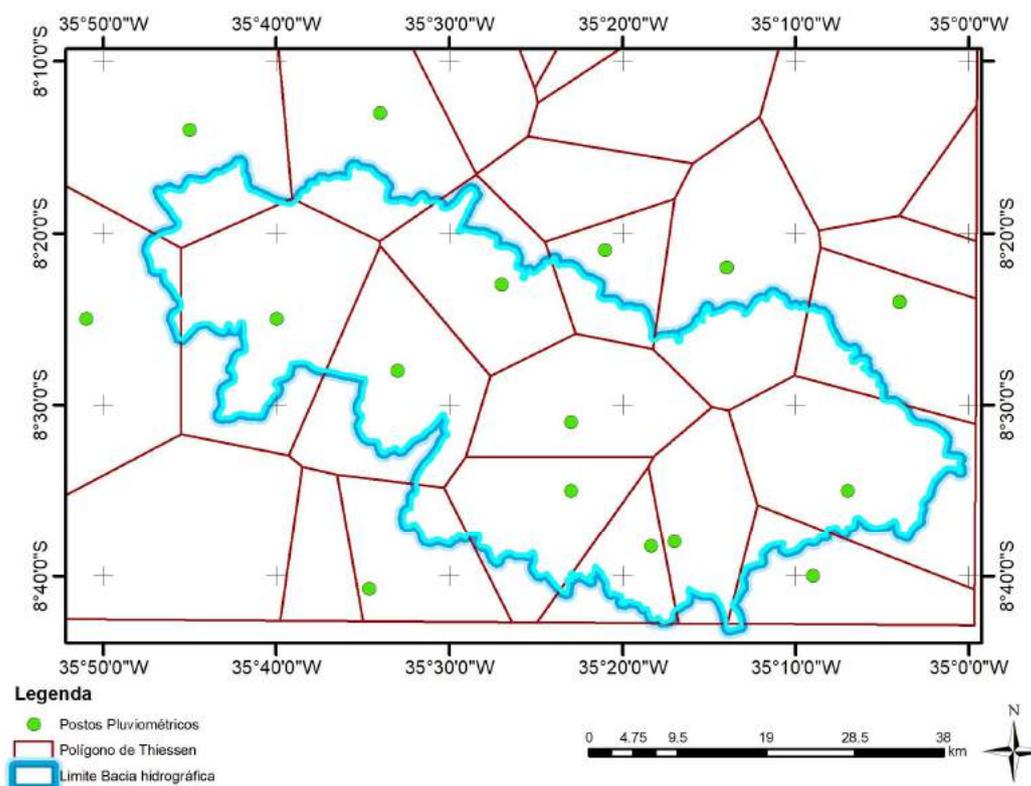
*Código proveniente da plataforma HIDROWEB da ANA

Fonte: A autora (2019).

Dentre os postos citados apenas três possuem séries de vazões até 2017 (Engenho mato grosso – 835140, Palmares – 835141 e Pombos - 835137) e a maioria dos postos possuem séries com menos de 30 anos de dados.

Foi realizado o preenchimento de falhas de acordo com o método da Ponderação Regional. Em seguida foi calculada a chuva média de cada sub-bacia através do método do polígono de Thiessen, conforme figura a seguir.

Figura 16 – Polígono de Thiessen na bacia do rio Sirinhaém.



Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 6 apresenta os postos utilizados para cálculo da chuva média de cada bacia, de acordo com o polígono de Thiessen gerado.

Tabela 6 – Postos utilizados para cálculo da chuva média através do polígono de Thiessen

Código*	Nome	Área (km ²)	Sub-bacia
835002	Barra do Guabiraba	290	Barragem 01 - Barra de Guabiraba
835007	Bezerros	54	
835030	Gravata	53	
835049	São Joaquim do monte	21	
835000	Amaraji	198	Barragem 02 – Gameleira
835002	Barra do Guabiraba	290	
835014	Cortes	224	
835025	Gameleira (RFN)	190	
835030	Gravata	53	
835043	Ribeirão	247	
835000	Amaraji	198	Barragem 03 – Cucaú
835002	Barra do Guabiraba	290	
835014	Cortes	224	
835015	Cucaú	175	
835025	Gameleira (RFN)	190	

Código*	Nome	Área (km²)	Sub-bacia
835030	Gravata	53	
835040	Primavera	47	
835043	Ribeirão	247	
835140	Engenho mato grosso	85	
835141	Palmares	27	
835015	Cucaú	175	Barragem 04 – Camaragibe
835022	Escada	122	
835025	Gameleira (RFN)	190	
835040	Primavera	47	
835043	Ribeirão	247	
835140	Engenho Mato Grosso	85	
835015	Cucaú	175	Barragem 05 – Tapiruçu
835022	Escada	122	
835043	Ribeirão	247	
835050	Sirinhaém	229	
835022	Escada	122	Barragem 06 – Sibiró
835032	Ipojuca	41	
835050	Sirinhaém	229	

*Código proveniente da plataforma HIDROWEB da ANA

Fonte: A autora (2019).

3.4.2 Fluviometria

Quanto aos postos fluviométricos, estes também foram obtidos através da base de dados da ANA. Dentro da bacia hidrográfica do rio Sirinhaém apenas foram encontrados quatro postos de medição de vazão, todos com série de dados com duração inferior a 30 anos. A Tabela 7 apresenta os postos fluviométricos inseridos na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém e a Figura 17 apresenta a localização dos mesmos.

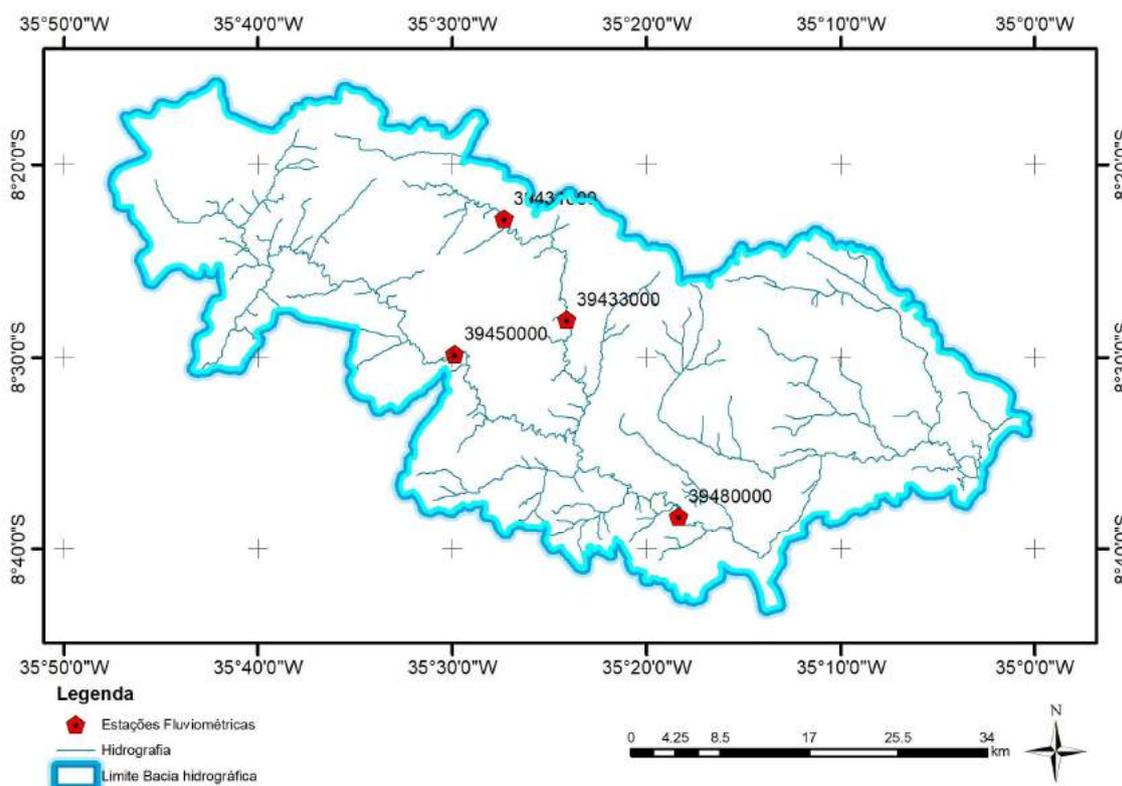
Tabela 7 – Postos fluviométricos na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém

Nome	Código*	Coordenadas Geográficas		Período de dados
		Longitude	Latitude	
Amaragi	39431000	-8.3803	-35.4553	2002-2018
José Mariano	39433000	-8.4675	-35.4014	2002-2018
Engenho Bento	39450000	-8.4972	-35.4978	1999-2018
Engenho Mato Grosso	39480000	-8.6375	-35.3056	1989-2018

*Código proveniente da plataforma HIDROWEB da ANA

Fonte: A autora (2019).

Figura 17 – Localização das estações fluviométricas.



Fonte: A autora (2019).

Dentre os postos analisados apenas o posto engenho Mato Grosso (39480000) foi utilizado para modelagem e calibração hidrológica, uma vez que é o único posto com série de dados próximo a 30 anos e por estar localizado na região da barragem B03 - Cucaú.

3.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA - CAWM – CAMPUS AGRESTE WATERSHED MODEL

A aplicação de um modelo conceitual chuva-vazão tem como objetivo simular o escoamento superficial em bacias hidrográficas de regiões semiáridas. Foi desenvolvido recentemente na UFPE o modelo CAWM – Campus Agreste Watershed Model para cumprir a lacuna deste modelo hidrológico envolvendo procedimentos modernos de entrada e saída de dados e a possibilidade de aproveitamento de informações geradas por técnicas de geoprocessamento sobre bases espaciais, como o SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* e o Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D).

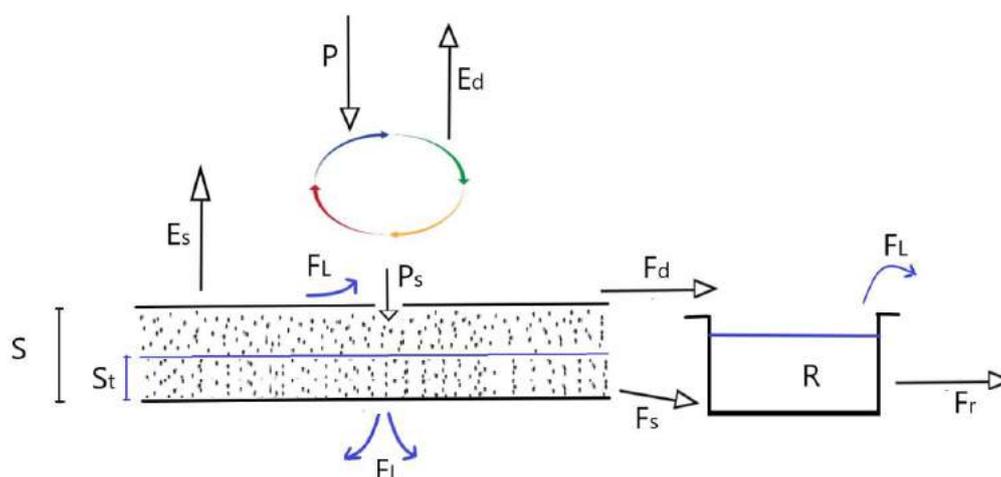
O modelo busca a simplicidade e utilização de poucos parâmetros de entrada e para calibração. O modelo tem sido aplicado inicialmente para bacias hidrográficas de porte tal que o tempo de concentração não exceda um dia, uma vez que não foram implementadas até o desenvolvimento deste trabalho as ferramentas para considerar o retardo do fluxo da bacia.

Diferentemente dos modelos clássicos, nos quais os parâmetros de calibração são baseados em métodos estatísticos, neste novo modelo são levadas em consideração as características físicas da bacia para determinação dos parâmetros de calibração.

O modelo utiliza como dados de entrada dois conjuntos de informações: um representa as características físicas da bacia e outro representa as características hidrológicas da mesma. As características físicas podem ser obtidas através do mapeamento do solo, imagens aéreas e de satélite, Modelo Digital de Terreno (MDT). As informações hidrológicas consistem em séries de chuva, evapotranspiração e as séries de vazões utilizadas para calibração.

A versão anterior, denominada CAWM IV, foi concebida para aplicação a bacias hidrográficas de regiões semiáridas. O modelo consiste em dois reservatórios, um de recepção (**R**) e outro subterrâneo (**S**), localizado nas calhas dos rios. O volume infiltrado é admitido como perda, alimentando as fissuras do solo cristalino característico da região Nordeste, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Esquema do modelo CAWM IV.



Fonte: A autora (2019).

Neste modelo, a evapotranspiração potencial é comparada com a precipitação. Se houver precipitação suficiente, toda evapotranspiração é consumida e descontada do cálculo. O excesso de chuva é denominado precipitação efetiva (P_n). Caso contrário, toda precipitação é transformada em evapotranspiração (E_d) somada a porção remanescente (E_m). Esta pode ser totalmente ou parcialmente removida do reservatório subterrâneo (S), dependendo da quantidade de água presente no mesmo. As equações a seguir apresentam o balanço entre a precipitação e evapotranspiração:

$$\text{Se } P \geq E, \text{ então } P_n = P - E \quad (1)$$

$$\text{Se } P \leq E, \text{ então } P = E_d \text{ e } E_n = E - E_d \quad (2)$$

A precipitação efetiva é subdividida em três parcelas, sendo a primeira classificada com recarga do solo, calculada pela seguinte equação:

$$P_s = \frac{s \cdot \left(1 - \left(\frac{St}{S}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)}{1 + \frac{St}{S} \tanh\left(\frac{P_n}{S}\right)} \quad (3)$$

Onde St é o valor máximo de água acumulado no solo ao longo de um tempo t , e S é a capacidade máxima de armazenamento, ou seja, o valor máximo dos valores de St .

O segundo componente é a determinação da evapotranspiração complementar (E_s), a qual é extraída das camadas mais superficiais do solo e limitada pelo valor de E_n . Sua magnitude depende do valor atribuído ao parâmetro α , conforme equação a seguir:

$$E_s = \left(1 - e^{-\frac{\alpha \cdot St}{S}}\right) \cdot E_n \quad (4)$$

Onde α é definido para especificar a magnitude da evapotranspiração complementar (E_s). Este parâmetro foi utilizado para ajustar os dados pouco precisos dessa variável, quando necessário, podendo variar de 0 a um valor elevado (50, por exemplo), significando nenhuma ou máxima evapotranspiração complementar. O ajuste deste parâmetro é feito por observação do balanço hídrico de longo período, comparando as lâminas de precipitação, vazão e

evapotranspiração e daí avaliando se esta última variável está sub ou superdimensionada.

O último componente representa o escoamento superficial direto para a calha do rio (F_d) e é calculado através da seguinte equação:

$$F_d = P_n - P_s - E_s \quad (5)$$

Do reservatório da lâmina de água S_t armazenada no solo ocorre o fluxo F_s , o qual percola em direção ao reservatório da calha dos rios (R), obedecendo à seguinte equação:

$$F_s = K_s \times S_t \quad (6)$$

Onde K_s é o parâmetro a ser calibrado e representa a permeabilidade do solo, e F_s representa a percolação através do reservatório R .

Acrescenta-se os fluxos F_d e F_s à lâmina de água armazenada no reservatório R . Esse reservatório não é limitado para considerar os extravasamentos em casos de cheias. A partir dele sai o escoamento fluvial (F_r) dado pela seguinte equação:

$$F_r = K \times R^b \quad (7)$$

Onde b é um parâmetro inicialmente avaliado como sendo igual a 5/3, a partir de análise apresentada a seguir.

Considerando V_{sup} como o volume de água acumulado em um período de tempo em todo o comprimento do rio, totalizando uma extensão de L_T e área equivalente de A_e , é definida a equação a seguir:

$$V_{sup} = A_e \cdot L_T \quad (8)$$

Em modelos hidrológicos, volumes de água são representados (em milímetros) por unidade de área da bacia, está em quilômetros quadrados. O cálculo do volume de acumulação no reservatório R pode então ser expresso pela seguinte equação:

$$R = \frac{V_{sup}}{c \cdot A_b} = \frac{A_e \cdot L_T}{c \cdot A_b} \quad (9)$$

Onde **C** é uma constante igual a 1.000 e sua utilização é feita para alinhamento de unidades.

Considerando a Fórmula de Manning para um canal aberto, simplificando a equação para seção transversal retangular, assim como o raio hidráulico assumido aproximadamente igual à profundidade **y**, chega-se à equação a seguir:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \cong \frac{1}{n} \cdot \frac{A^{5/3}}{B^{2/3}} I^{1/2} \quad (10)$$

Onde $A = B \cdot y$ e $R_h \cong y$.

Considerando $V = A \cdot L$ o volume de água acumulado num trecho de rio com comprimento **L**, a seguinte relação pode ser obtida:

$$Q = \frac{I^{1/2}}{n \cdot L^{5/3} \cdot B^{2/3}} V^{5/3} = K^* \cdot V^{5/3} \quad (11)$$

De forma semelhante, a Equação 11 sugere que o valor do expoente b presente na Equação 7 seja adotado como 5/3. As equações seguintes foram simplificadas considerando a área da seção transversal do rio, **A_e**, equivalente a largura superficial do rio, **B_e**.

A relação entre a vazão Q (m³/s) e o escoamento F_r (mm) é dada pela seguinte equação:

$$Q = \frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} \quad (12)$$

Onde Δt é o intervalo de tempo em segundos.

Combinando a Equação 12 com a Equação 9, tem-se:

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \frac{A_e^{5/3}}{B_e^{2/3}} I^{1/2} \quad (13)$$

Isolando a área equivalente na Equação 9 e substituindo-a na Equação 10, tem-se a seguinte equação:

$$\frac{F_r \cdot c \cdot A_b}{\Delta t} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{c \cdot A_b \cdot R}{L_T} \right)^{\frac{5}{3}} \frac{I^{\frac{1}{2}}}{B_e^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

Substituindo a Equação 7 e 9 na Equação 14, e isolando o termo K, tem-se a seguinte equação:

$$K = \frac{\Delta t}{n} \cdot \left(\frac{c^2 \cdot A_b^2}{B_e^2 \cdot L_T^5} \right)^{1/3} I^{1/2} \quad (15)$$

Portanto, o parâmetro K é calculado de acordo com as características físicas da bacia, as quais podem ser obtidas através de técnicas de geoprocessamento, utilizando o Modelo Digital de Terreno da área de estudo.

As perdas de água no sistema podem ser resultantes de diversas causas, tais quais: volumes de retenção nas depressões do solo e pela vegetação, gradativamente evaporados; volumes de extravasamento que não retornam à calha fluvial, igualmente evaporado; e infiltração nas fendas do embasamento cristalino. Essa perda é extraída do reservatório da calha fluvial, **R**. As perdas de água são calculadas através da seguinte equação:

$$F_L = K_L \times R^{1,5} \quad (16)$$

Onde **K_L** é o coeficiente de perda e **F_L** são as perdas dos sistemas. O expoente 1,5 tem sido testado e aprovado nas diversas simulações desenvolvidas, considerando que como as perdas nas áreas inundadas são mais significantes, o valor do expoente é maior que 1.

Sendo assim, os parâmetros utilizados para calibração deste modelo são: **α**, **K_L** e **K_s**. Nas simulações realizadas constatou-se que é possível ajustar o modelo adequadamente com o parâmetro b = 5/3 fixo.

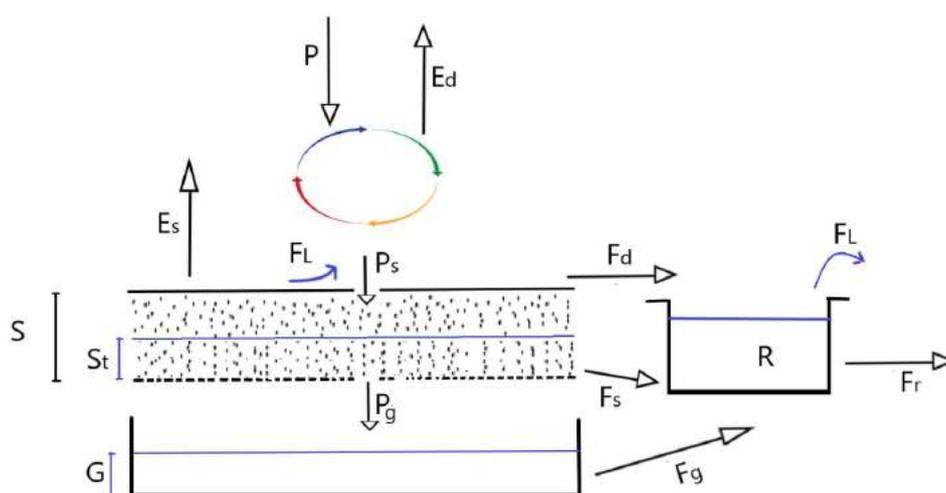
Nesta versão do modelo, CAWM IV, o parâmetro **S** pode ser calibrado ou estimado através da Curva Número médio (CN) da bacia, como proposto pelo *Soil Conservation Service* para retenção de água no solo:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (17)$$

O cálculo dos parâmetros K e S , usando as características físicas das bacias, permitem a regionalização das vazões. Mapas de solo, imagens aéreas e de satélite são usadas para determinação do CN e S . O parâmetro K se mostrou aceitável para rios com baixas declividades e sua magnitude é da ordem de 10^{-2} ou menor. Caso contrário, necessita ser calibrado ou se utilizar uma largura equivalente B_e exagerada artificialmente. Nas aplicações feitas com o modelo CAWM IV (FEITOZA, 2018) o valor de B_e tem sido adotado entre 3 e 5m. A rede de rios da área em estudo deve ser densa (por exemplo, com oito ordens de rios) para representar adequadamente a reservação de água na calha fluvial.

Diferentemente da versão descrita, o CAWM V procura contemplar os processos de fluxo nas bacias hidrográficas de rios perenes, em regiões de solos mais profundos que permitam a manutenção das vazões de base nos períodos de estiagem. Para isso a principal mudança em relação à versão anterior é a inserção de um reservatório subterrâneo que passa a ser alimentado quando o reservatório do solo atinge a saturação, conforme representação na Figura 19. Daí em diante inicia-se um fluxo de percolação profunda (P_g) para alimentar o reservatório subterrâneo, acrescentando a lâmina acumulada (G). A partir deste ocorre o fluxo F_g que alimenta o rio, complementando as parcelas F_d e F_s .

Figura 19 – Esquema do modelo CAWM V.



Fonte: A autora (2019).

O fluxo F_g é dado pela seguinte equação:

$$F_g = K_g \times G \quad (18)$$

Onde K_g é um parâmetro de transferência de água no solo e será calibrado de forma similar ao K_s . Para permitir a alimentação do reservatório subterrâneo, a fórmula de cálculo da percolação (P_s) foi modificada para:

$$P_s = S \times \left(1 - \frac{S_t}{2 \times S}\right) \quad (19)$$

Quando S_t atinge o valor de S , o excedente passa a compor a percolação profunda S_g . Sendo assim o modelo CAWM V pode ter três ou quatro parâmetros de calibração, dependendo da disponibilidade de dados para avaliar o parâmetro S .

Foi utilizado como critério de ajuste o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (ENS) (Equação 20) e o desvio do volume total dos hidrogramas de vazões.

$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,calc})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (20)$$

Onde:

ENS - Coeficiente de *Nash-Sutcliffe*;

$Q_{i, obs}$ - Vazão observada no tempo i (m³/s);

$Q_{i, calc}$ - Vazão calculada pelo modelo no tempo i (m³/s);

Q_{obs} - Vazão observada média no período simulado (m³/s).

A função objetivo usada na calibração busca maximizar os valores encontrados para o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (ENS) ao mesmo tempo em que busca minimizar as variações entre as vazões calculadas e medidas, através da seguinte equação:

$$F = \frac{ENS \cdot 10^6}{\sum abs(Q_{obs} - Q_{calc})} \quad (21)$$

3.6 OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

A regularização de vazões naturais tem como objetivo melhorar a utilização dos recursos hídricos superficiais. Para isto, faz-se o represamento das águas

através da construção de barragens nos cursos d'água. Além do controle de cheias, a regularização também é importante para o atendimento às necessidades do abastecimento urbano ou rural (irrigação), aproveitamento hidroelétrico, controle de sedimentos, recreação e até navegação fluvial.

Caso as vazões naturais dos rios sejam significativamente maiores que as vazões de retirada, mesmo durante os períodos de estiagem (vazões naturais mínimas), não haverá a necessidade de regularização de vazão. Neste caso, somente se justificaria a implantação de um reservatório de acumulação para atenuar os efeitos de enchentes a jusante (controle de vazões máximas), o controle dos níveis d'água e de transporte de sedimentos. Contudo, se a vazão a ser retirada é superior a mínima, é necessário a reserva dos excessos sobre a vazão derivada para atender os períodos cujas vazões naturais são menores que as derivadas.

Para simulação da operação de reservatórios, foi desenvolvido um modelo através de planilha *MS Excel*, na Universidade Federal de Pernambuco, o qual utiliza a metodologia de balanço de massa para cálculo.

3.6.1 Dados de entrada

Para dar início a simulação de operação de reservatórios faz-se necessário a obtenção de parâmetros físicos dos reservatórios, tais quais: capacidade máxima de acumulação, cota de coroamento, cota de soleira, extensão do vertedouro e curva cota x área x volume.

Para as barragens em questão, apenas a barragem de Barra de Guabiraba (B01) possui tais informações no Rima da mesma. As demais possuem valores referentes ao volume de acumulação e localização. Com essas informações foram levantadas as curvas cota x área x volume através de procedimento no *ArcGis*.

Além destes dados, também foram utilizados dados hidrológicos, como series pluviométricas, dados de evaporação e vazões afluentes às barragens. Os dados pluviométricos e de evaporação foram obtidos de postos próximos às barragens, conforme Tabela 8. Já os dados de vazões foram obtidos através do modelo hidrológico CAWM V.

Tabela 8 – Postos pluviométricos e meteorológicos utilizados na operação das barragens.

Barragem	Posto Pluviométrico	Posto Meteorológico (Evaporação)
B01 - Barra de Guabiraba	835030	Surubim
B02 - Gameleira	835025	Recife
B03 - Cucaú	835015	Recife
B04 - Camaragibe	835015	Recife
B05 - Tapirucu	835015	Recife
B06 - Sibiró	835044	Recife

Fonte: A autora (2019).

3.6.2 Balanço hídrico

Foi realizado o balanço hídrico através da seguinte equação, considerando o intervalo de tempo a cada 4 horas.

$$V_{t+4h} = V_t + (V_{afl} + V_{prec} - V_{evap} - V_{cap})/6 \quad (22)$$

Onde:

V_{t+4h} - Volume armazenado após 4h

V_t - Volume armazenado no início do intervalo de tempo

V_{afl} - Volume afluyente ao reservatório no intervalo de tempo

V_{prec} - Volume precipitado sobre o reservatório no intervalo de tempo

V_{evap} - Volume evaporado do reservatório no intervalo de tempo

V_{cap} - Volume a ser captado do reservatório de acordo com a vazão regularizável

Em seguida são calculados os volumes médios entre o volume em 4h e o volume no tempo anterior, conforme a seguinte equação:

$$V_{médio} = (V_{t+4h} + V_t)/2 \quad (23)$$

Onde:

$V_{médio}$ - Volume médio a cada 4h

V_{t+4h} - Volume armazenado após 4h

V_t – Volume armazenado no intervalo de tempo anterior.

Através das curvas cota x área x volume encontradas para as barragens, foi possível calcular a cota para cada volume médio calculado. Sendo assim, analisa-se se a cota obtida é maior ou menor que a cota da soleira, determinando assim a vazão vertida pela barragem, de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{vert} = 2.2 * L_{vert} * (Z_{t+4h} - Z_{vert})^{1.5} \quad (24)$$

Onde:

Q_{vert} – Vazão vertida no intervalo de tempo

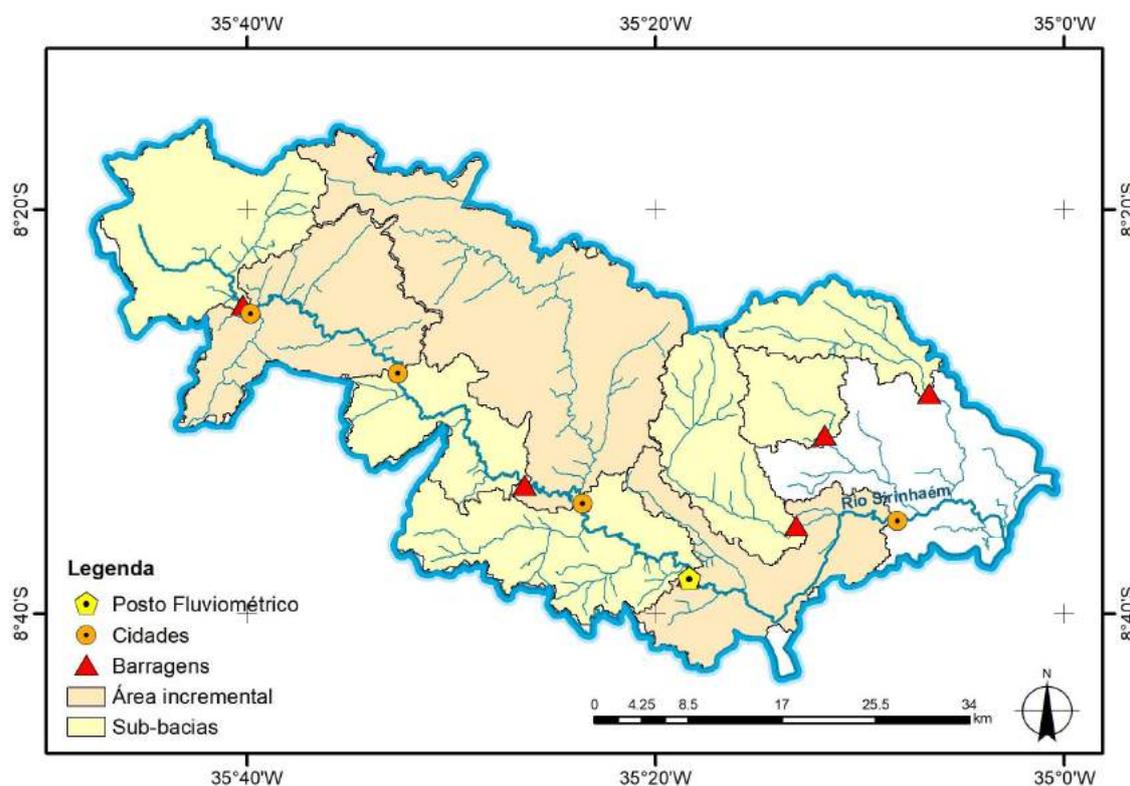
L_{vert} – Extensão do vertedouro na barragem considerada

Z_{t+4h} - Cota da água calculada para o intervalo de tempo

Z_{vert} – Cota da soleira do vertedouro

Como o objetivo deste trabalho é verificar a influência das barragens nas cidades que margeiam o rio Sirinhaém, foram calculadas as vazões que chegam às cidades. Para o cálculo destas vazões considerou-se as áreas incrementais entre as barragens e as cidades estudadas (Figura 20), e a correlação destas áreas com a área proveniente do posto fluviométrico com dados válidos.

Figura 20 – Áreas incrementais e das barragens.



Fonte: A autora (2019).

Soma-se as vazões incrementais com as vazões efluentes das barragens para obtenção dos hidrogramas e simulação hidrodinâmica.

3.7 DADOS CARTOGRÁFICOS

Para delimitação da bacia hidrográfica foi utilizada a base de dados cartográficos SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*, que serviu de apoio para obtenção e tratamento dos dados de entrada para a simulação hidrológica.

Para modelagem hidrodinâmica bidimensional foi utilizada a base de dados disponibilizada pelo programa PE3D, sendo esta mais precisa para elaboração geometria dos trechos de rios, a serem inseridos como dados de entrada na simulação hidrodinâmica.

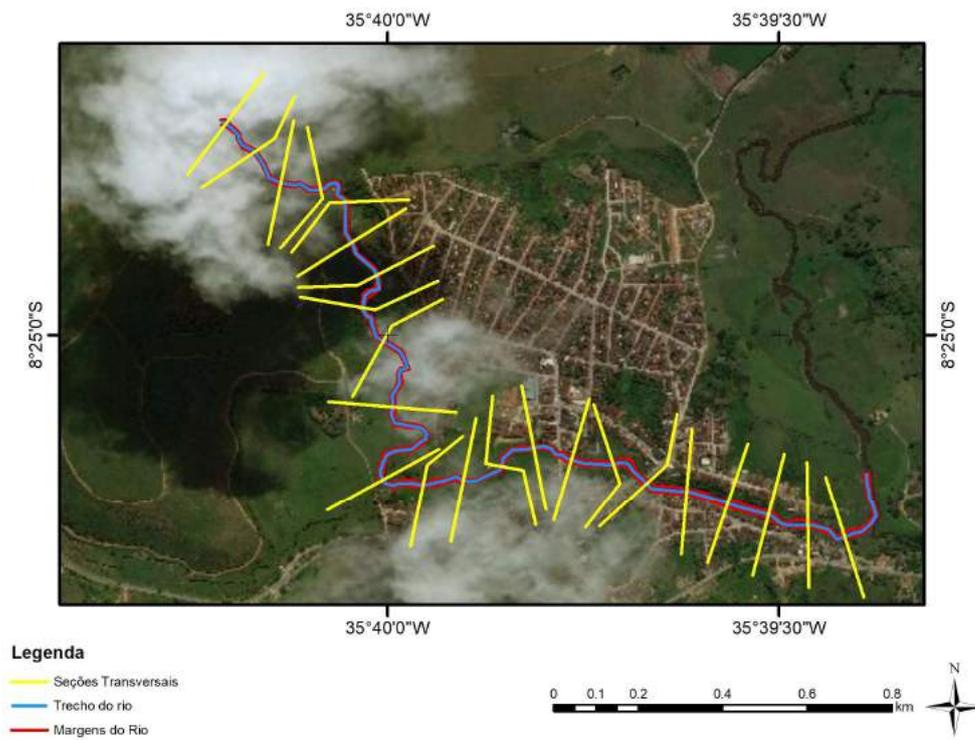
3.8 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA E PRÉ-PROCESSAMENTO DAS SEÇÕES

Para definição da geometria dos trechos simulados foi utilizada a extensão HEC-GeoRAS (USACE, 2009), disponibilizada gratuitamente para o modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Nesta ferramenta foram definidos os trechos dos rios, as margens de cada trecho, o direcionamento do rio e as seções transversais.

Tais parâmetros foram definidos de tal maneira que abrangesse a área urbana das cidades.

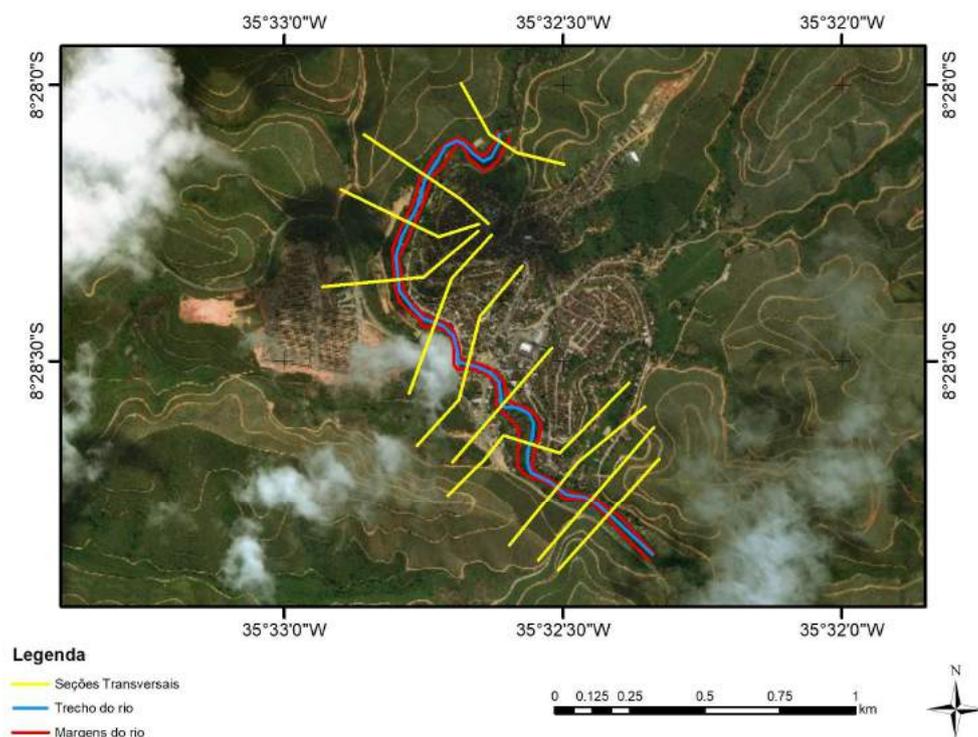
As figuras a seguir apresentam a localização dos trechos de rios simulados.

Figura 21 – Localização do trecho de rio na cidade de Barra de Guabiraba.



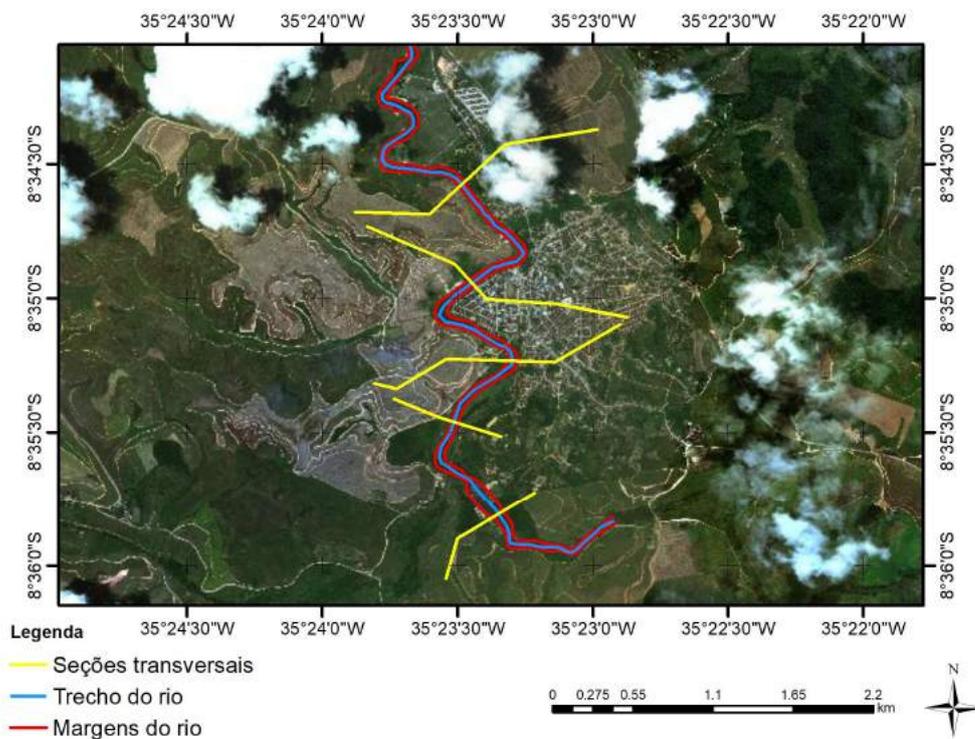
Fonte: A autora (2019).

Figura 22 – Localização do trecho de rio na cidade de Cortês.



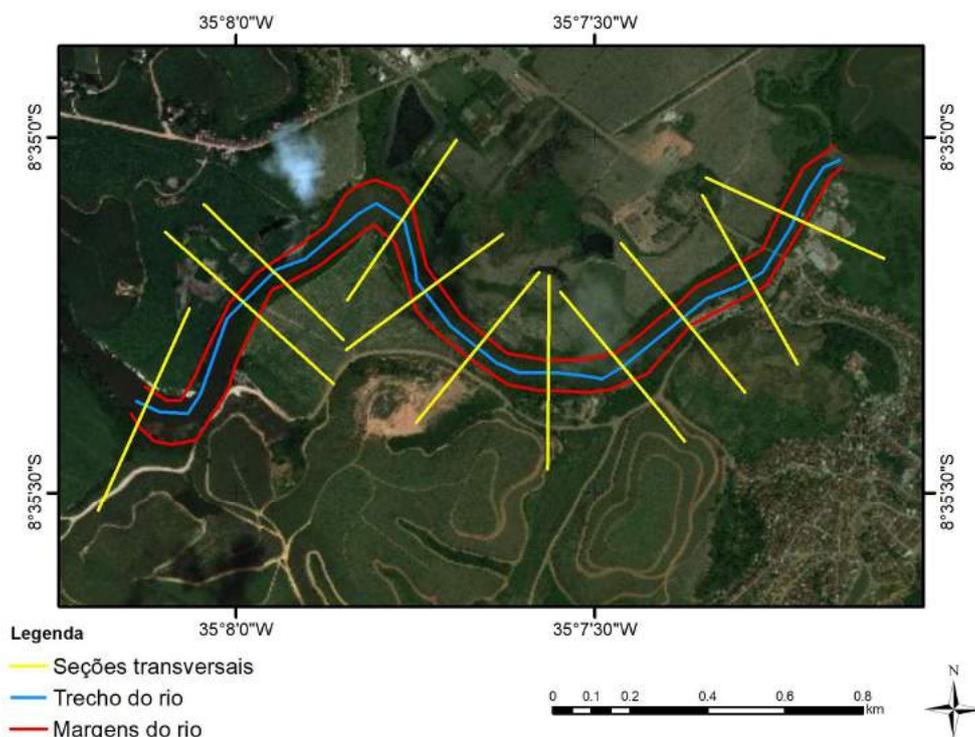
Fonte: A autora (2019).

Figura 23 – Localização do trecho de rio na cidade de Gameleira.



Fonte: A autora (2019).

Figura 24 – Localização do trecho de rio na cidade de Sirinhaém.



Fonte: A autora (2019).

3.9 MODELAGEM HIDRODINÂMICA UNIDIMENSIONAL DA BACIA DO RIO SIRINHAÉM

Para as simulações s hidrodinâmicas foi utilizado o modelo computacional HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System*), desenvolvido pelo centro de engenharia hidrológica, do *U.S. Army Corps of Engineers* dos Estados Unidos (USACE, 2016). O modelo permite ao usuário desenvolver cálculos hidráulicos para escoamentos unidimensionais em regime permanente e não permanente.

A classificação de regime permanente e não permanente se dá em relação à variação da profundidade e vazão com o tempo. Se as propriedades do fluido em um ponto do campo não mudam com o tempo, o escoamento é denominado escoamento em regime permanente. Neste tipo de escoamento, as propriedades podem variar de ponto para ponto no campo, mas deve permanecer constante em relação ao tempo para uma seção fixa qualquer. Se as propriedades do fluido em um ponto do campo variam com o tempo, o escoamento é dito não permanente ou transitório.

O modelo utiliza como metodologia de cálculo as equações de Saint-Venant, as quais foram desenvolvidas segundo princípios de conservação de massa e energia, dadas pelas seguintes expressões:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (26)$$

Onde:

Q - vazão (m³/s);

x - distância na direção do fluxo no canal (m);

A - área da seção transversal (m²);

t - tempo (s);

q_L - contribuição de vazão lateral (m³/s);

β - coeficiente de distribuição de velocidade;

g - aceleração da gravidade (m²/s);

h - altura da lâmina d'água (m);

S₀ - declividade do leito do rio (m/m);

S_f - inclinação da linha de energia (Fórmula de Manning) (m/m), calculada através da seguinte equação:

$$S_f = \frac{n^2 v |v|}{R^{4/3}} \quad (27)$$

Onde:

n - coeficiente de rugosidade de Manning;

v - velocidade (m/s);

R - raio hidráulico (m).

Os critérios para utilização das equações de dimensionamento em escoamentos não permanentes são: para uma mesma lâmina d'água específica a velocidade do fluido é uniforme na seção transversal do canal, o eixo longitudinal do rio é aproximadamente uma linha reta, a declividade do canal é suave e as acelerações verticais não são consideradas e a distribuição de pressões é hidrostática, onde o fluido é incompressível e com densidade constante.

As equações de Saint-Venant podem ser simplificadas, os termos referentes a energia cinética, energia de pressão ou energia gravitacional podem ser eliminados ou reduzidos, dependendo do problema em questão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

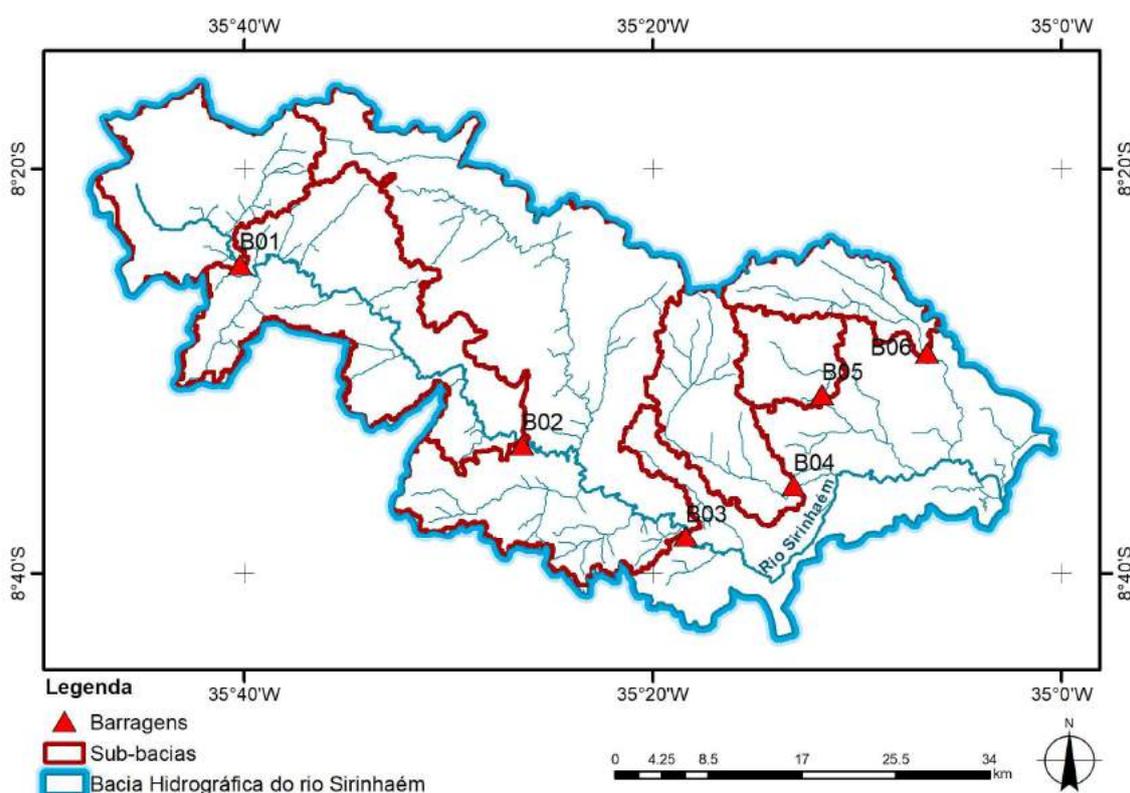
Neste capítulo são abordados os resultados obtidos no trabalho de pesquisa desenvolvido.

4.1 RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO PARA O MODELO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO SIRINHAÉM

A etapa de calibração de um modelo hidrológico é a fase mais laboriosa de um trabalho, uma vez que o hidrólogo deve ter uma sensibilidade quanto aos resultados obtidos de tal forma que os mesmos reproduzam da melhor forma possível o comportamento real da bacia hidrográfica.

O modelo hidrológico CAWM V foi aplicado para a bacia do rio Sirinhaém, a qual, por sua vez, foi subdividida em 6 sub-bacias, referentes ao posicionamento de cada barragem projetada, como pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Limites das sub-bacias.



Fonte: A Autora (2019).

A calibração do modelo para as sub-bacias foi realizada para estação fluviométrica Engenho Mato Grosso (39480000). Em função das várias falhas nos períodos anteriores e períodos de chuva, o período de abril de 1993 a

dezembro de 2017 ficou definido para a calibração e validação do modelo e estimativa das séries de vazões em todas as sub-bacias. A calibração foi feita para um único evento (período de 01/04/1993 a 31/12/2017) e os demais utilizados como validação.

Em função das características físicas das sub-bacias, os parâmetros de calibração citados anteriormente foram calculados: a declividade do rio principal, o comprimento da rede de drenagem e a área de drenagem. Tais parâmetros serviram de auxílio para determinação do parâmetro *K*. A Tabela 9 apresenta os parâmetros encontrados para as sub-bacias.

Tabela 9 – Parâmetros usados nas sub-bacias geradas pelas barragens

	B01 – Barra de Guabiraba	B02 – Gameleira	B03 – Cucaú	B04 – Camaragibe	B05 – Tapiruçu	B06 – Sibiró
I (m/m)	0.006	0.007	0.008	0.003	0.007	0.006
A _b (km ²)	236	363	712	154	74	100
L _t (km)	110872	189830	350468	83442	34275	45255
B _e (m)	5	5	5	5	5	5
K	0.041	0.024	0.014	0.035	0.143	0.097
S (mm)	165	165	165	165	165	165
A	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
K _s	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
K _L	2	2	2	2	2	2

Fonte: A Autora (2019).

A Tabela 10 apresenta os valores dos coeficientes de *Nash* (ENS) e desvio de volume, em percentual, calculados para o modelo, de forma a avaliar o comportamento dos resultados.

Tabela 10 – Coeficiente de *Nash* e Desvio de Volume.

Data Inicial	Data Final	ENS	Desvio Volume (%)
14/04/1993	17/10/1993	0,79	10
25/04/1994	1/3/1995	0,79	21
1/3/1995	26/12/1995	0,70	19
26/12/1995	29/01/1997	0,61	-6
29/01/1997	5/3/1998	0,65	8
28/04/2000	9/3/2001	0,60	-26
9/3/2001	7/2/2003	0,49	-9
4/12/2003	17/04/2005	0,58	-1
17/04/2005	11/2/2006	0,75	4

Data Inicial	Data Final	ENS	Desvio Volume (%)
11/2/2006	12/1/2008	0,45	18
12/1/2008	15/02/2009	0,74	3
15/02/2009	22/03/2010	0,63	5
22/03/2010	16/01/2011	0,45	-16
16/01/2011	30/05/2012	0,79	5
26/03/2013	20/01/2014	0,59	-35
20/01/2014	24/02/2015	0,42	-30
24/02/2015	21/12/2015	0,84	-24
21/12/2015	16/10/2016	0,65	-26
24/01/2017	20/11/2017	0,87	-3
1/4/1993	1/1/2018	0,68	-5

Fonte: A Autora (2019).

Dentro do período escolhido observe-se que o menor coeficiente de Nash foi 0,42 e um valor médio de ENS igual a 0,65, sendo considerados todos aceitáveis. Considerando o evento total, de longo período, o ENS apresentou valor igual a 0,68 e desvio de volume de 5%. Os desvios de volume em sua maioria apresentaram um percentual baixo, menor ou igual a 10%, o que valida o desempenho do modelo também para as menores vazões. A maior variação de volume foi 35% referente ao período de março de 2013 a janeiro de 2014.

Considerando os anos completos (2000, 2001, 2004, 2010, 2011 e 2017), apenas nos eventos de 2000 e 2001 foi gerado um desvio acima de 30% com relação à vazão observada, porém o coeficiente de *Nash* foi considerado bom, ENS=0,79. A Tabela 11 apresenta os coeficientes de *Nash-Sutcliffe* e desvios de volume para os diversos eventos.

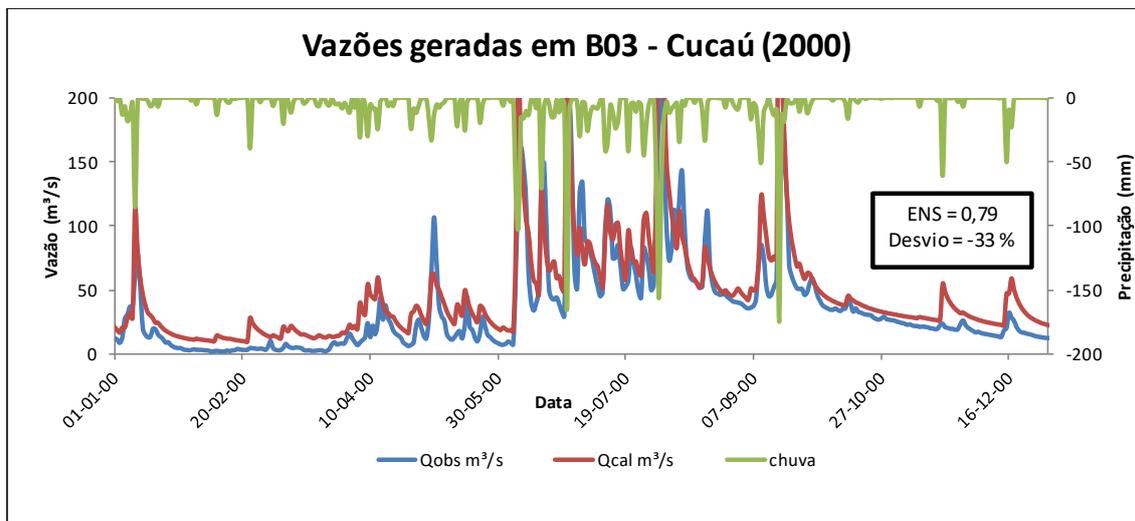
Tabela 11 – Coeficiente de Nash e Desvio de Volume para os eventos de 2000, 2001, 2004, 2010, 2011 e 2017.

Data Inicial	Data Final	ENS	Desvio Volume (%)
1/1/2000	31/12/2000	0,79	-33
1/1/2001	31/12/2001	0,79	-39
1/1/2004	31/12/2004	0,70	-8
1/1/2010	31/12/2010	0,61	-6
1/1/2011	31/12/2011	0,65	5
1/1/2017	31/12/2017	0,60	-3

Fonte: A Autora (2019).

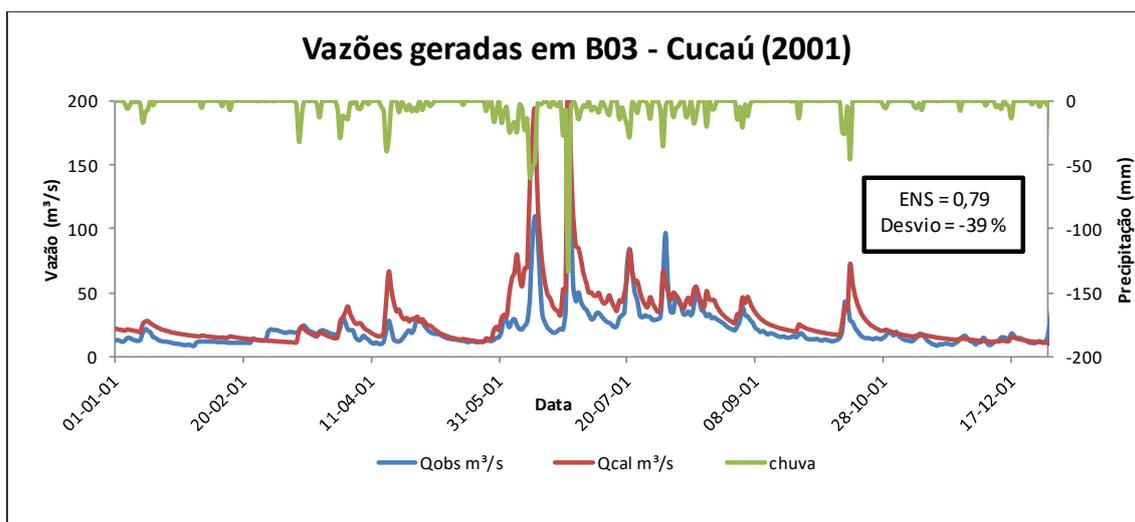
As figuras a seguir apresentaram as comparações gráficas entre as vazões observadas e as vazões calculadas para a sub-bacia B03 – Cucaú.

Figura 26 – Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 – Cucaú (2000).



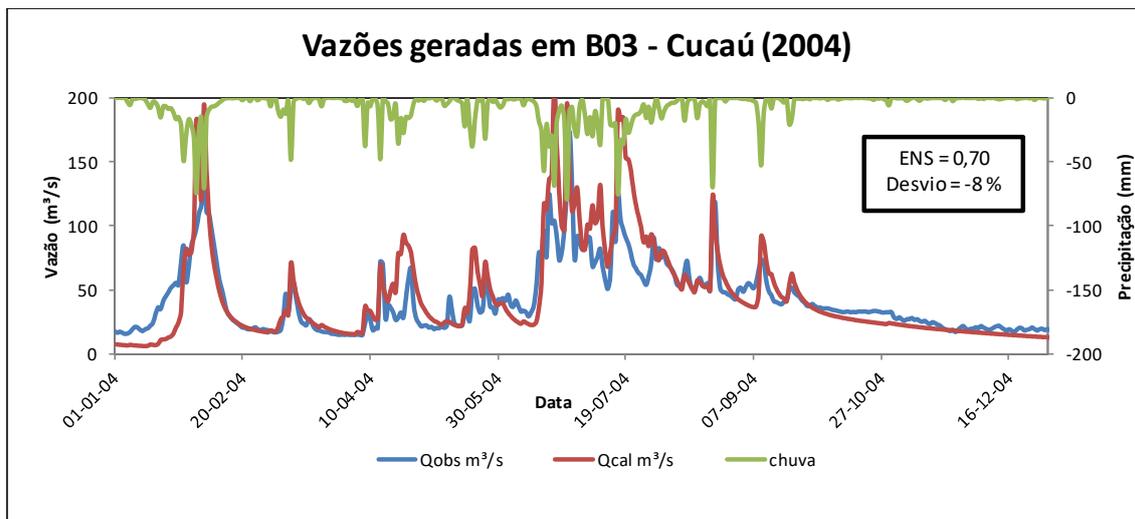
Fonte: A autora (2019).

Figura 27 – Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 – Cucaú (2001).



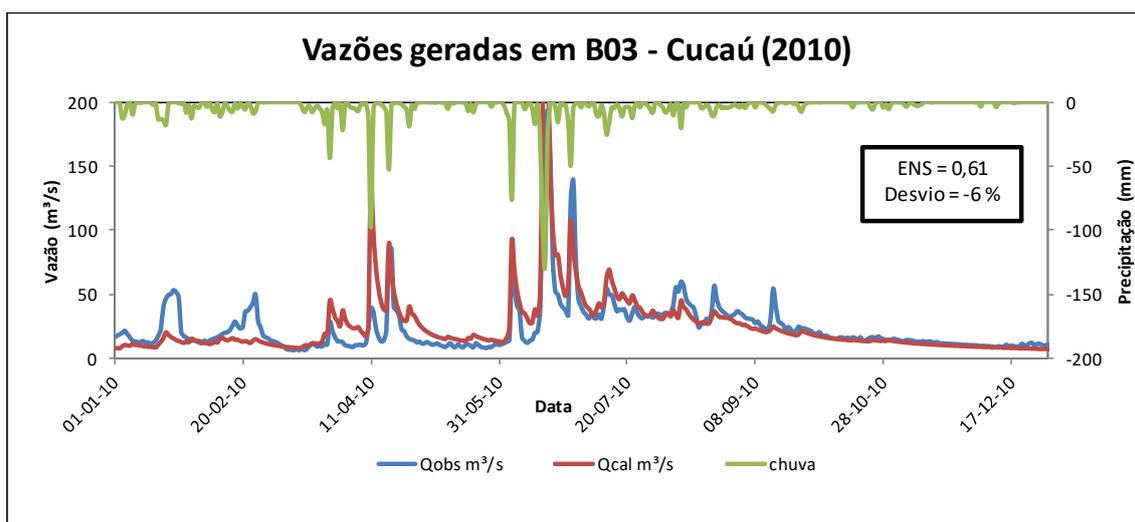
Fonte: A autora (2019).

Figura 28 – Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 – Cucaú (2004).



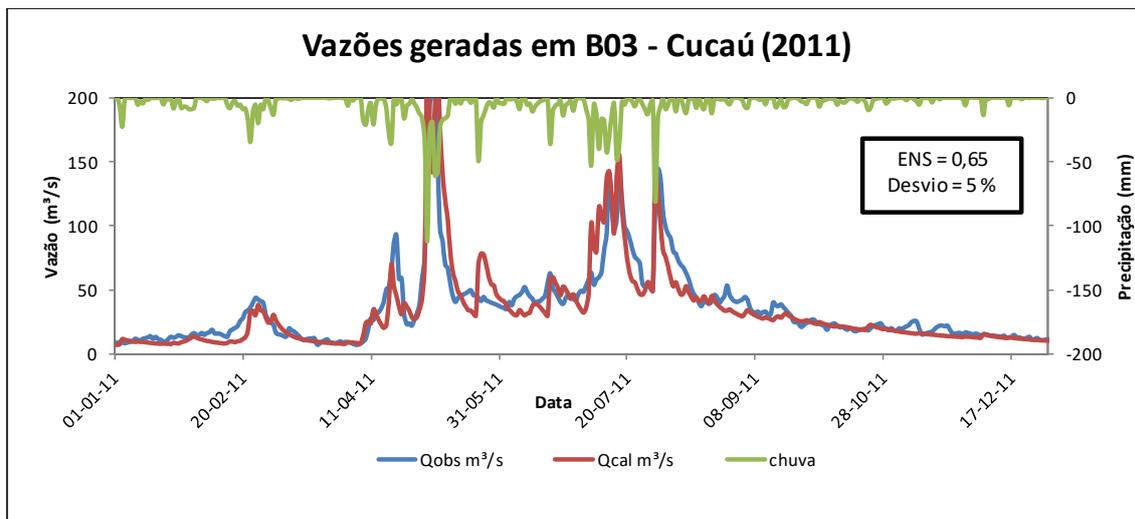
Fonte: A Autora (2019).

Figura 29 – Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 – Cucaú (2010).



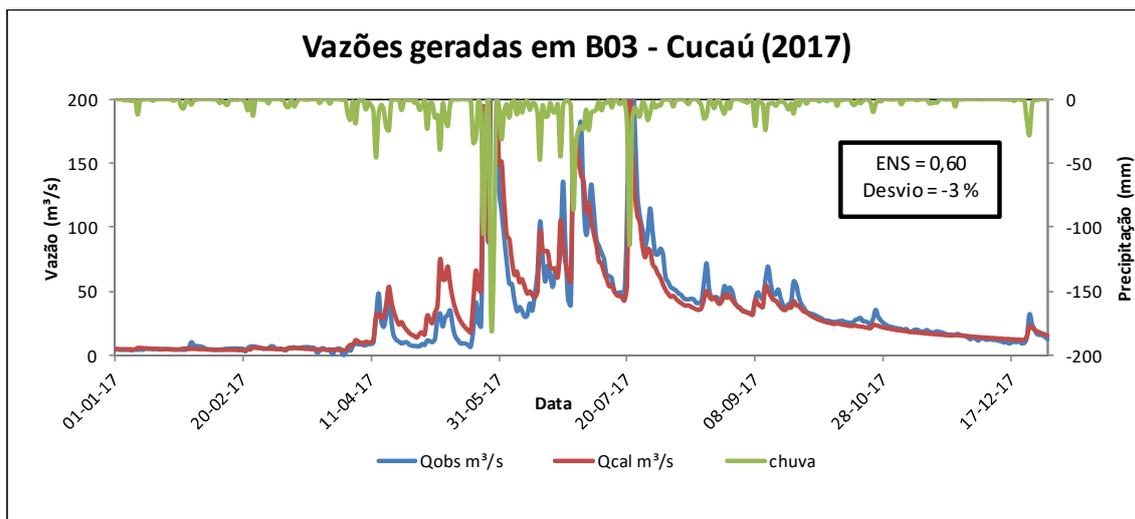
Fonte: A Autora (2019).

Figura 30 – Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 – Cucaú (2011).



Fonte: A Autora (2019).

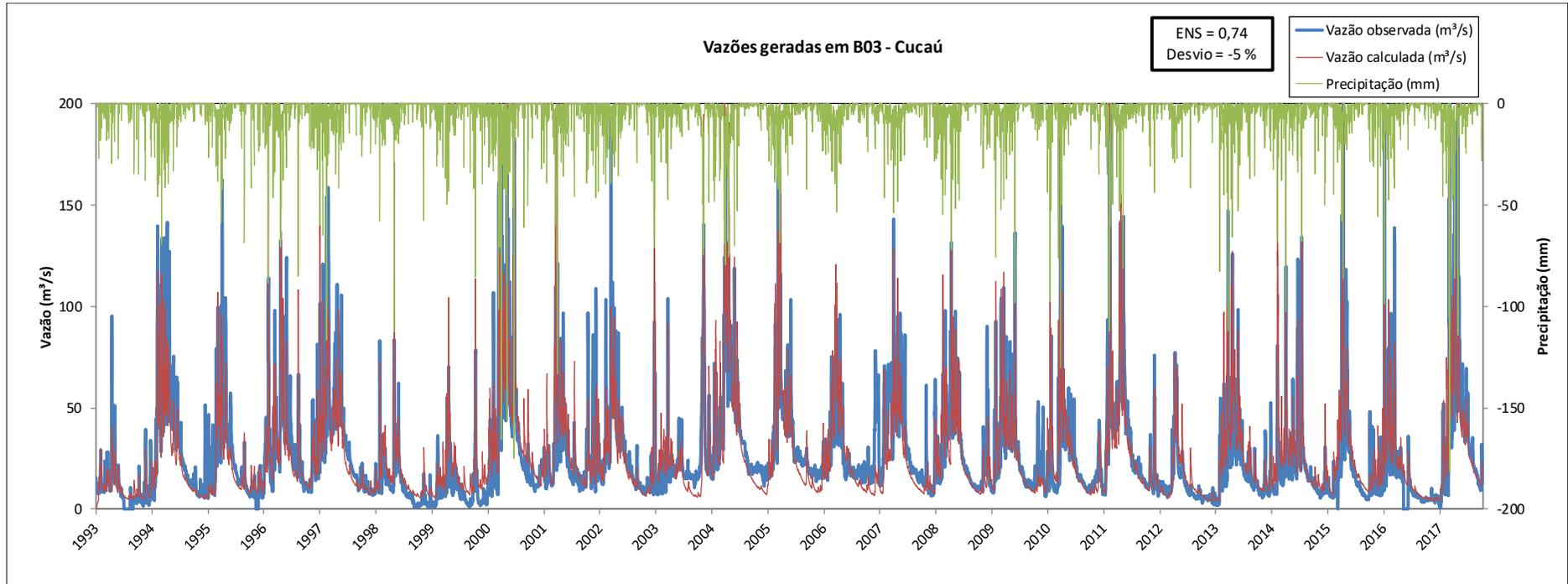
Figura 31 – Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 – Cucaú (2017).



Fonte: A Autora (2019).

A Figura 32 apresenta a comparação gráfica entre as vazões observadas e as vazões calculadas para a sub-bacia B03 – Cucaú, no período total de 01/04/1993 a 31/12/2017.

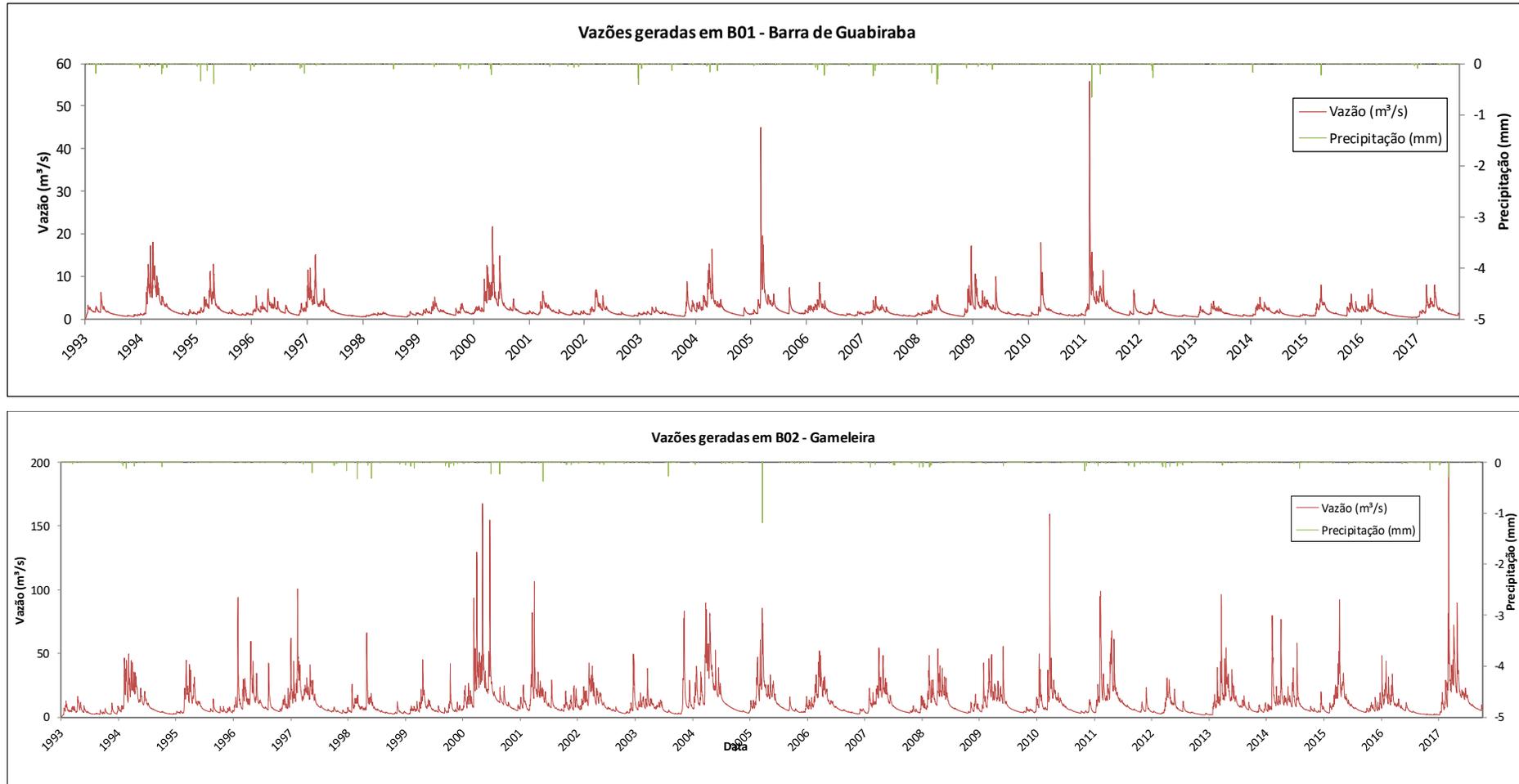
Figura 32 – Hidrograma de vazão calculada e vazão observada para a sub-bacia B03 – Cucaú.



Fonte: A Autora (2019).

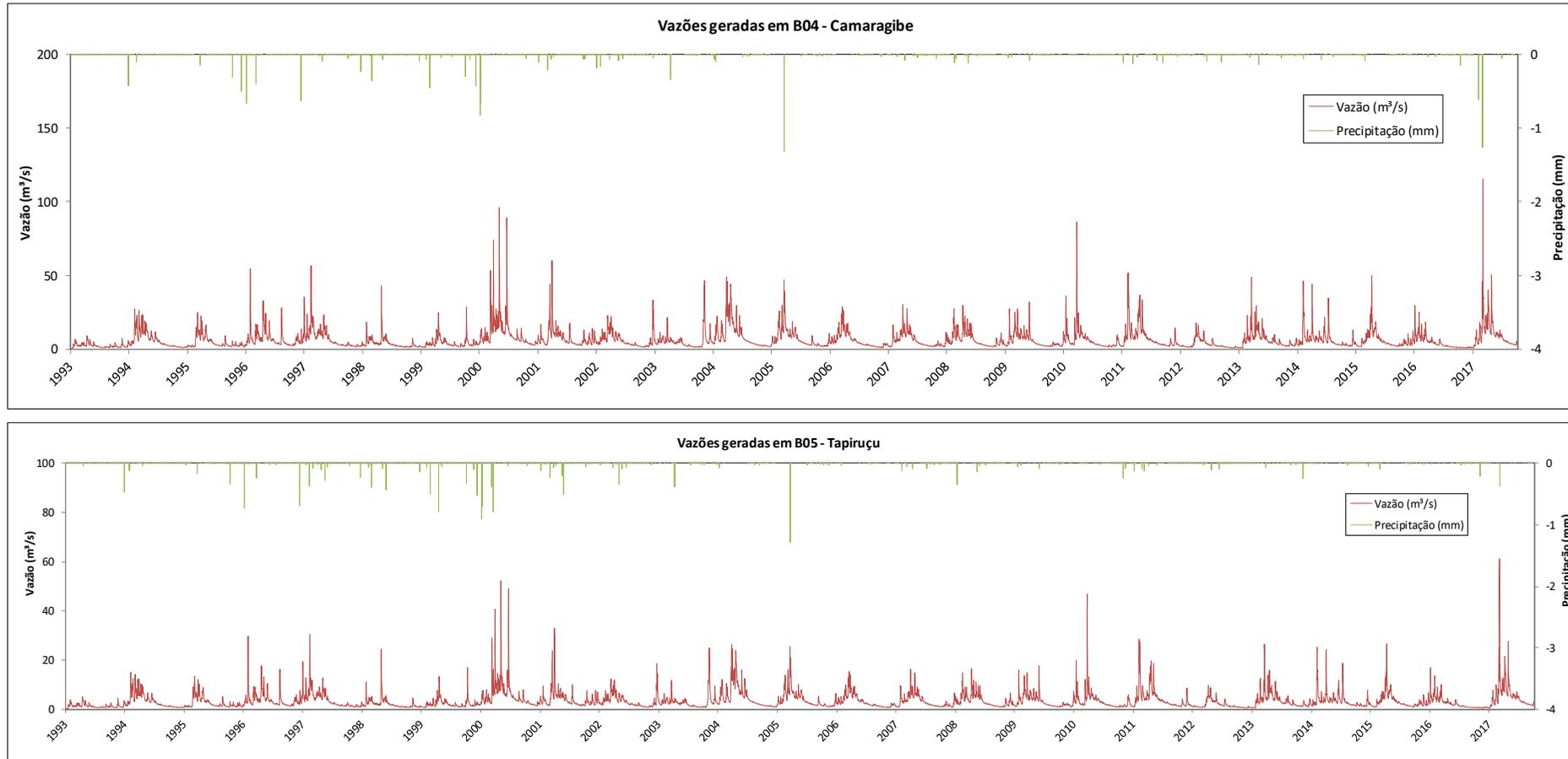
A seguir são apresentados os hidrogramas resultantes de chegada às barragens.

Figura 33 – Hidrograma de vazões para a sub-bacia B01 e B02.



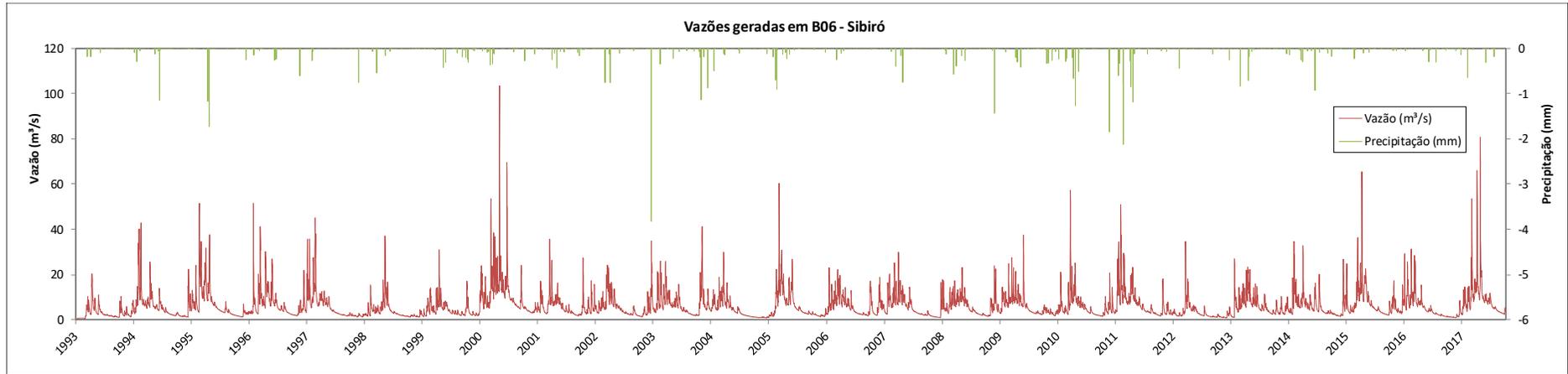
Fonte: A Autora (2019).

Figura 34 – Hidrograma de vazões para a sub-bacia B04 e B05.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 35 – Hidrograma de vazões para a sub-bacia B06.



Fonte: A Autora (2019).

4.2 VAZÕES REGULARIZADAS PELAS BARRAGENS

Através da simulação de operação dos reservatórios foi possível estimar as vazões regularizadas dos mesmos. A tabela a seguir apresenta as vazões regularizadas para cada barragem.

Tabela 12 – Vazões regularizadas pelas barragens.

Barragem	Vazões Regularizadas (m³/s)
B01 – Barra de Guabiraba	2,1
B02 – Gameleira	11,3
B03 – Cucaú	23,8
B04 – Camaragibe	6,5
B05 – Tapiruçu	3,2
B06 – Sibiró	2,6

Fonte: A Autora (2019).

4.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA UNIDIMENSIONAL EM ÁREAS URBANAS

O estado de Pernambuco possui seu relevo conhecido em detalhes devido aos produtos cartográficos disponíveis no Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), conforme citado nos tópicos anteriores. Desta forma, foi possível utilizar as informações de elevações de terreno mais precisas resultando em dados de excelente qualidade.

Foram simuladas as vazões considerando dois cenários: o atual, sem controle, e o que ocorreria se as barragens estivessem construídas. A operação do reservatório foi simulada num intervalo de tempo de 4 horas, sendo assim, o hidrograma resultante é composto das vazões a cada quatro horas.

Uma modelagem hidrodinâmica pode ter instabilidades devido a diversos fatores, tais quais simulações em períodos secos com vazões baixas, trechos com grande declividade, espaçamento entre seções transversais insuficientes, valores do coeficiente de Manning, entre outros.

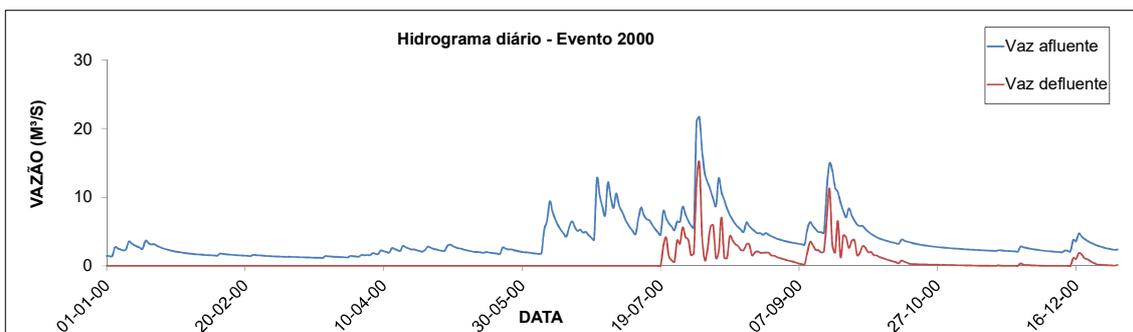
As figuras a seguir apresentam os cenários de inundação da área urbana de Barra de Guabiraba, Cortês, Gameleira e Sirinhaém. A variação dos cenários pode ser visualizada em formato de vídeo, permitindo ao usuário acompanhar a expansão de cada inundação ao longo do período de simulação. Além das manchas de inundação o modelo pode gerar mapas de velocidade das águas.

4.3.1 Barra de Guabiraba

O município de Barra de Guabiraba encontra-se a jusante da barragem B01 – Barra de Guabiraba, sendo assim, recebe contribuição apenas da barragem.

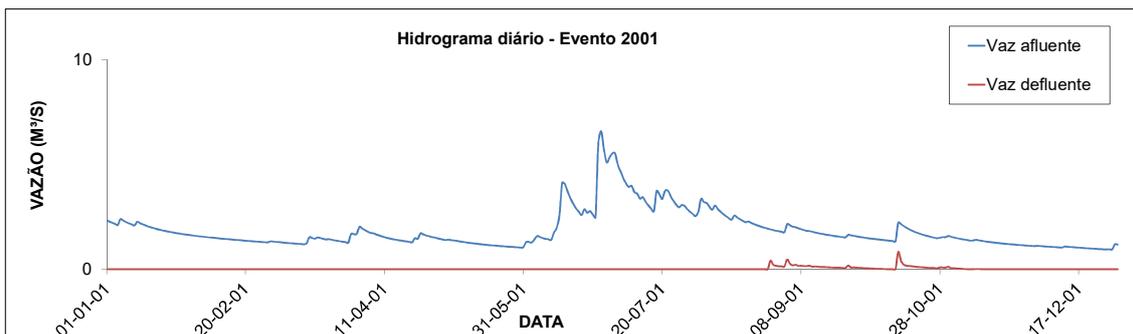
As figuras a seguir apresentam os hidrogramas diários para os eventos de cheias já discutidos anteriormente.

Figura 36 – Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2000).



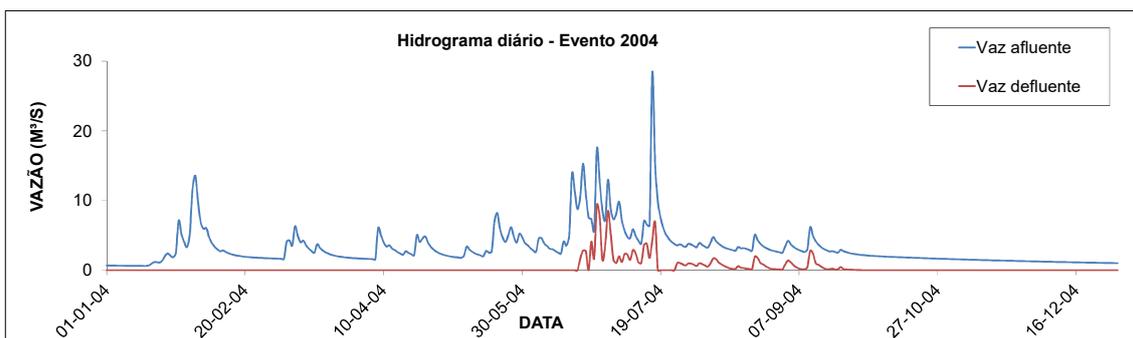
Fonte: A autora (2019).

Figura 37 – Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2001).



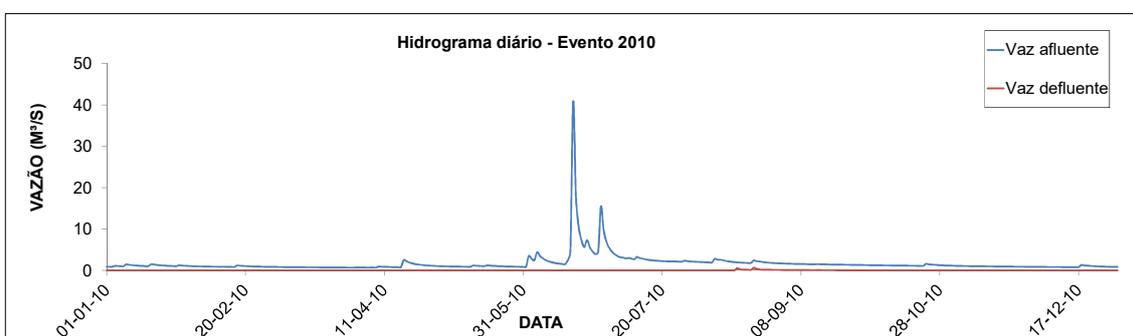
Fonte: A autora (2019).

Figura 38 – Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2004).



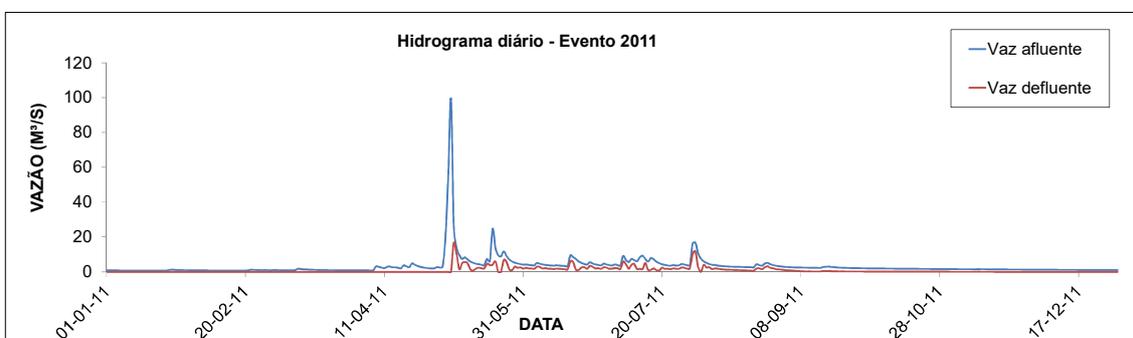
Fonte: A autora (2019).

Figura 39 – Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2010).



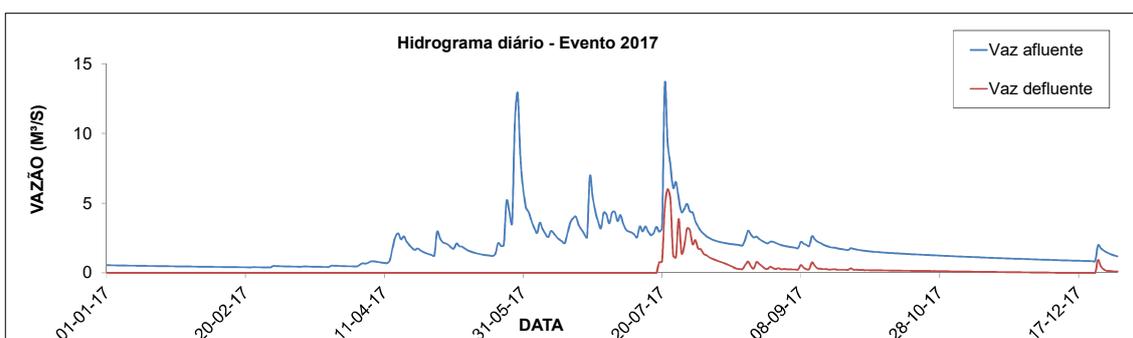
Fonte: A autora (2019).

Figura 40 – Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2011).



Fonte: A autora (2019).

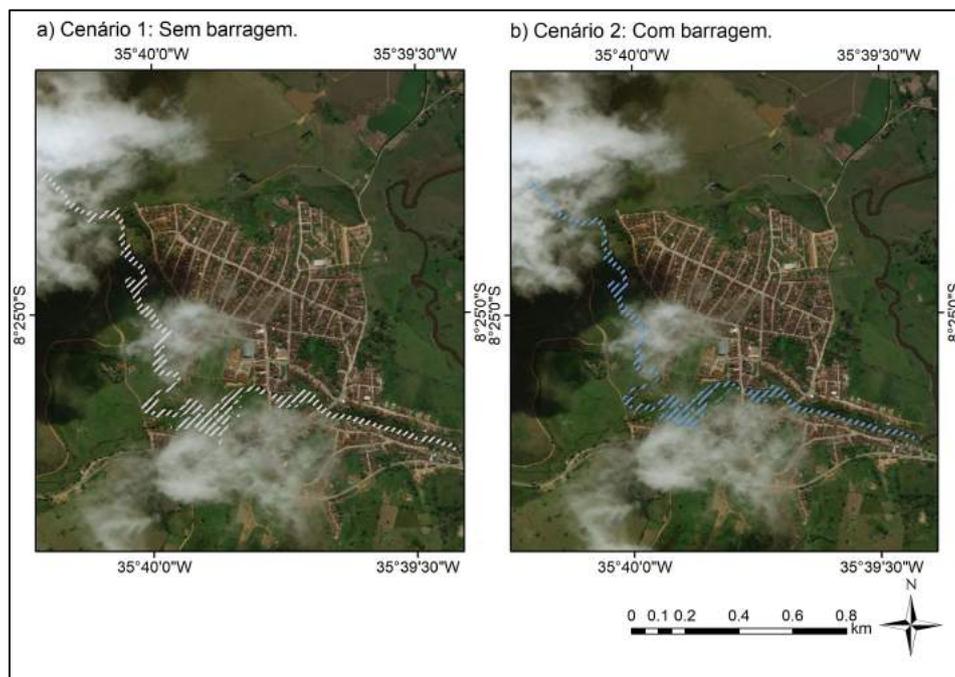
Figura 41 – Hidrograma de vazões diárias a montante de Barra de Guabiraba (2017).



Fonte: A autora (2019).

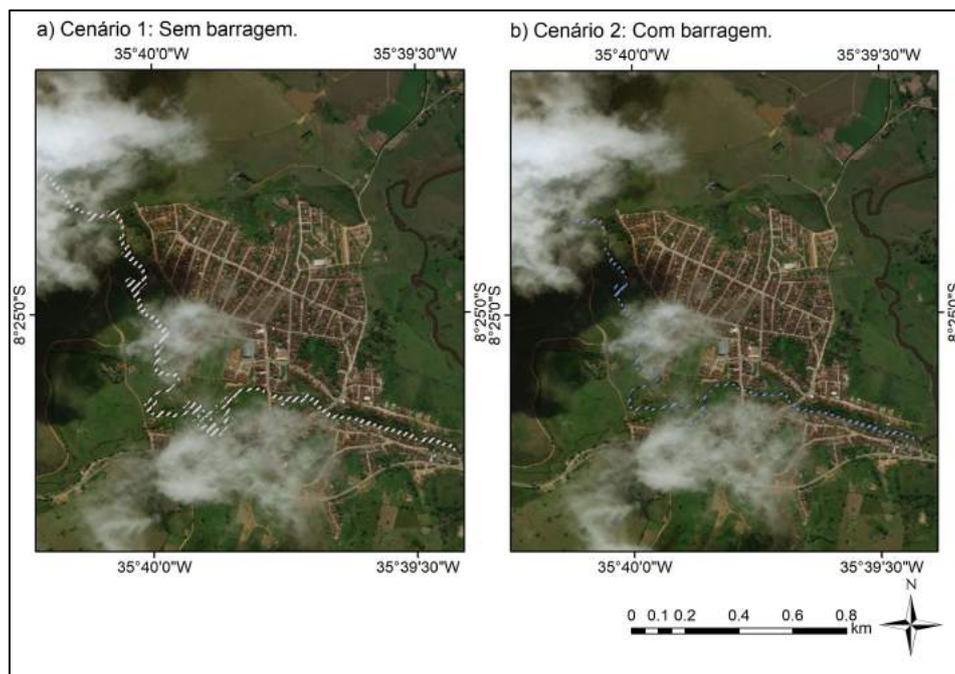
As figuras a seguir apresentam as manchas inundações para os cenários e eventos estudados.

Figura 42 – Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba – Cenário 1 e 2 (2000).



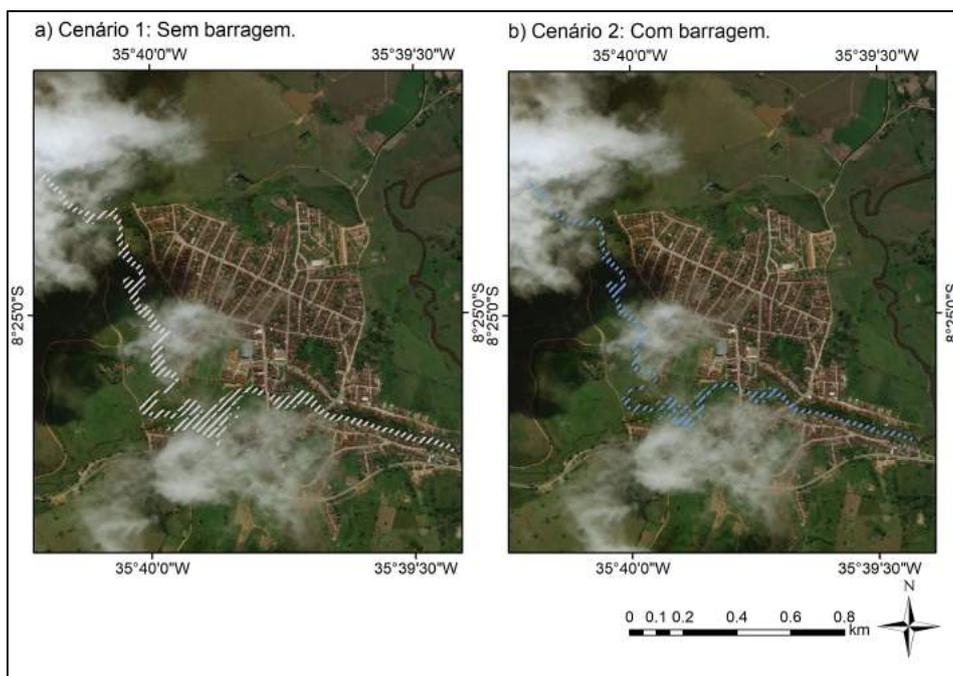
Fonte: A autora (2019).

Figura 43 – Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba – Cenário 1 e 2 (2001).



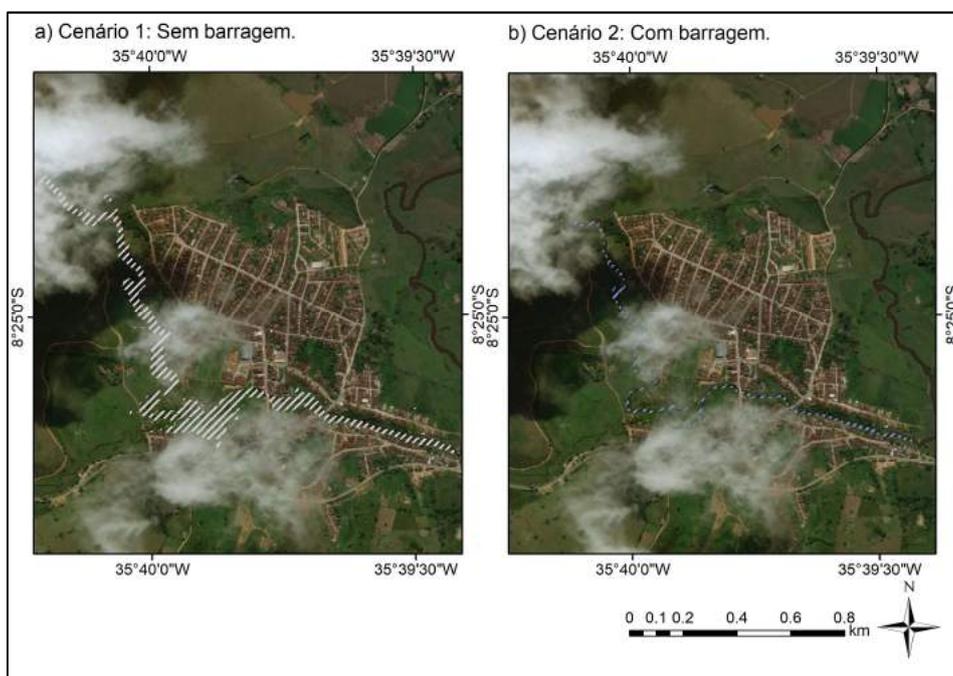
Fonte: A autora (2019).

Figura 44 – Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba – Cenário 1 e 2 (2004).



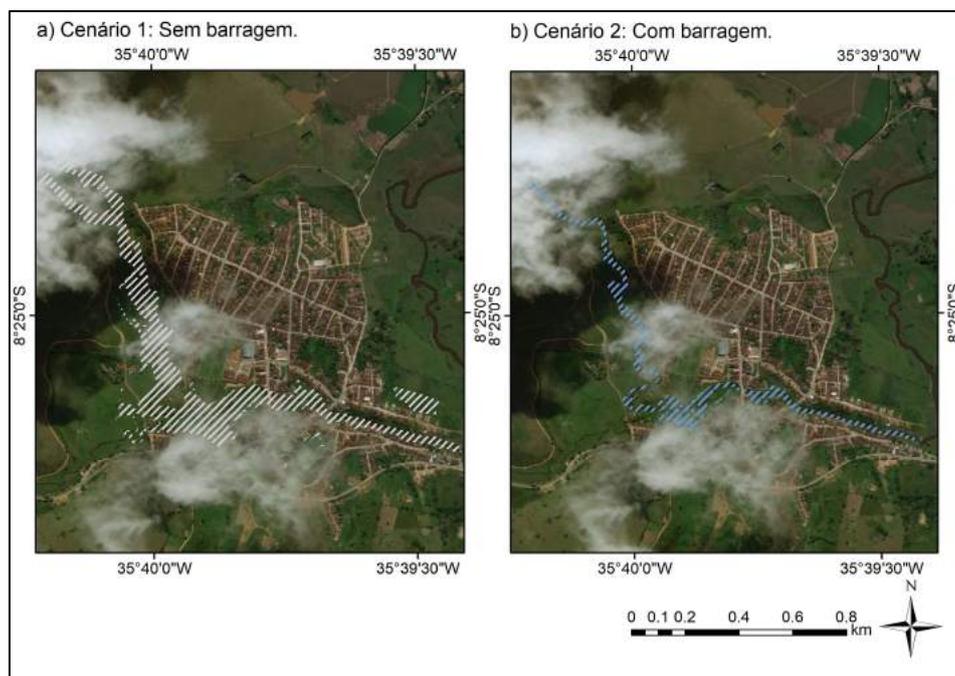
Fonte: A autora (2019).

Figura 45 – Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba – Cenário 1 e 2 (2010).



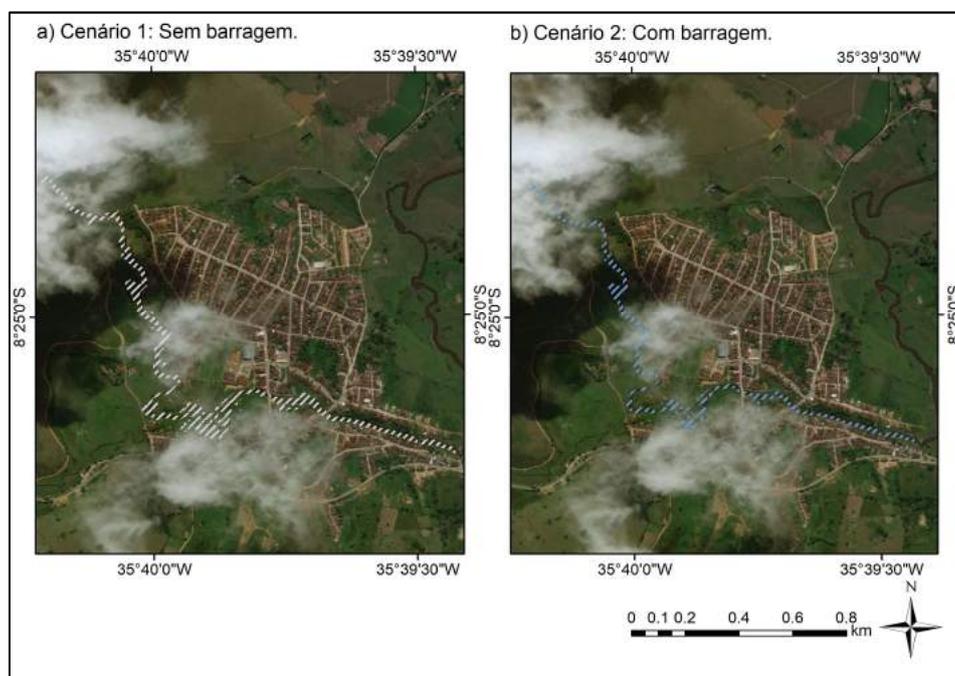
Fonte: A autora (2019).

Figura 46 – Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba – Cenário 1 e 2 (2011).



Fonte: A autora (2019).

Figura 47 – Mancha de inundação para a cidade de Barra de Guabiraba – Cenário 1 e 2 (2017).



Fonte: A autora (2019).

Foi possível constatar nos hidrogramas que as vazões diárias foram amortecidas no cenário 2. A variação destes cenários pode ser visualizada em formato de

vídeo, permitindo o acompanhamento da expansão da inundação a cada passo de simulação.

Tabela 13 – Área inundada pelos eventos em Barra de Guabiraba.

Barra de Guabiraba			
Ano	Área inundada (km ²)		Desvio (%)
	Cenário 1	Cenário 2	
2000	0,07	0,06	-13%
2001	0,04	0,02	-48%
2004	0,08	0,05	-36%
2010	0,09	0,02	-76%
2011	0,16	0,06	-62%
2017	0,06	0,04	-29%

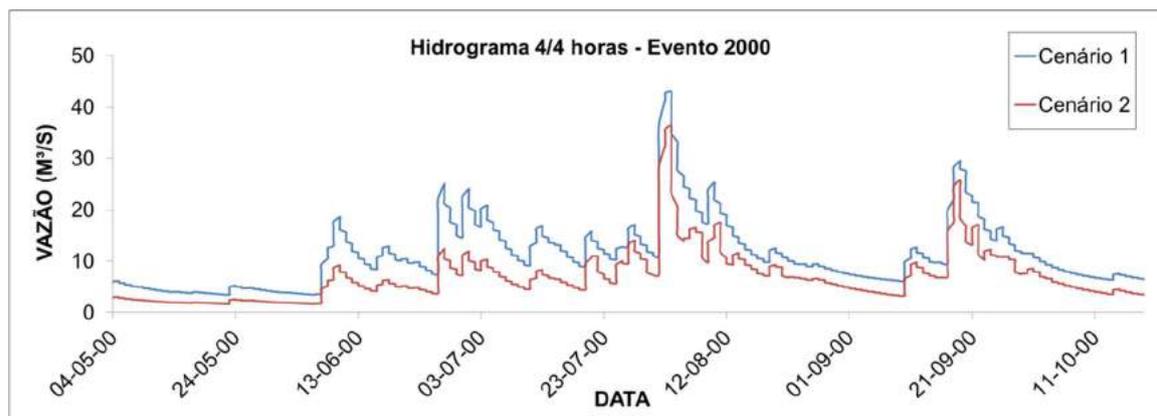
Fonte: A Autora (2019).

4.3.2 Cortês

O município de Cortês encontra-se a jusante da barragem projetada B01 – Cucaú, sendo assim, recebe contribuição da barragem e da área incremental até chegar à cidade.

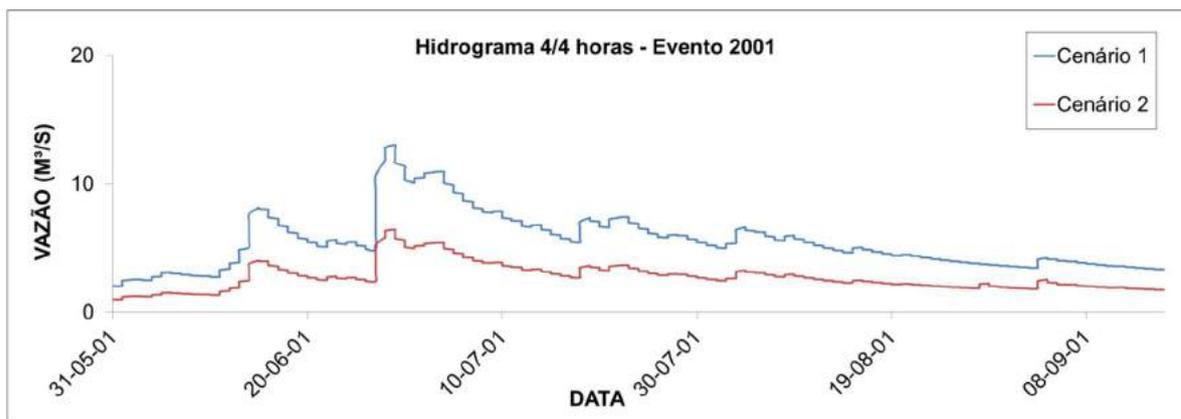
As figuras a seguir apresentam os hidrogramas para os eventos de cheias já discutidos anteriormente.

Figura 48 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2000).



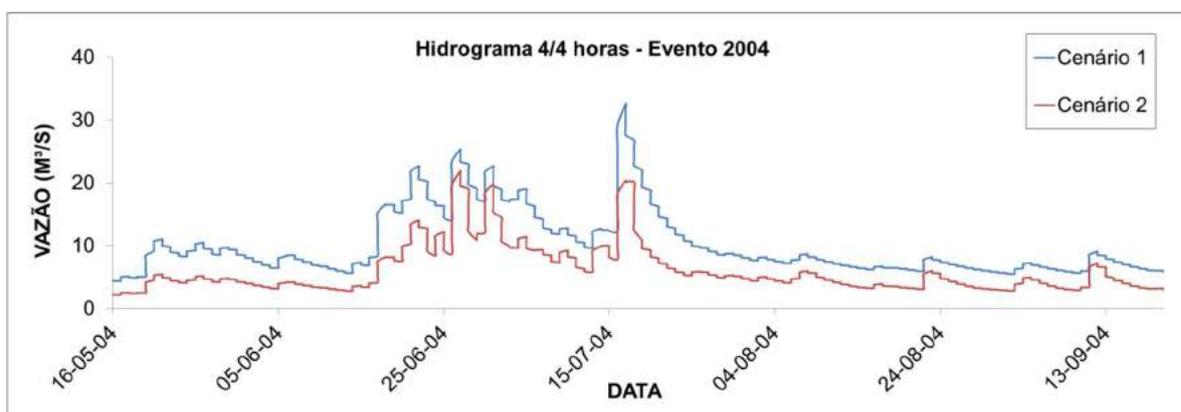
Fonte: A autora (2019).

Figura 49 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2001).



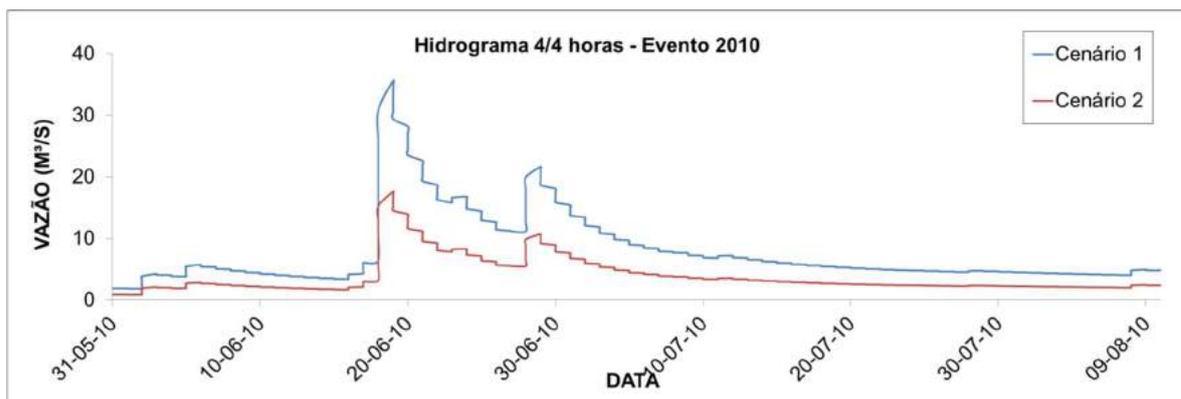
Fonte: A autora (2019).

Figura 50 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2004).



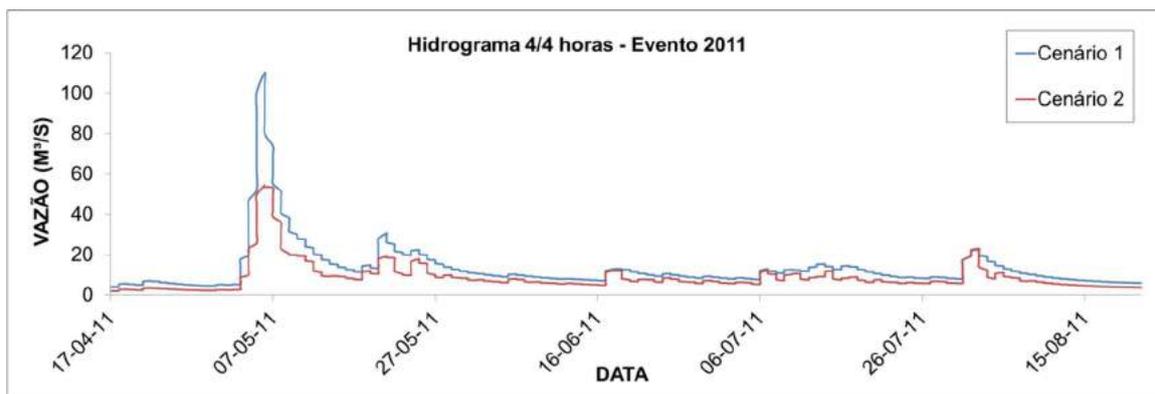
Fonte: A autora (2019).

Figura 51 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2010).



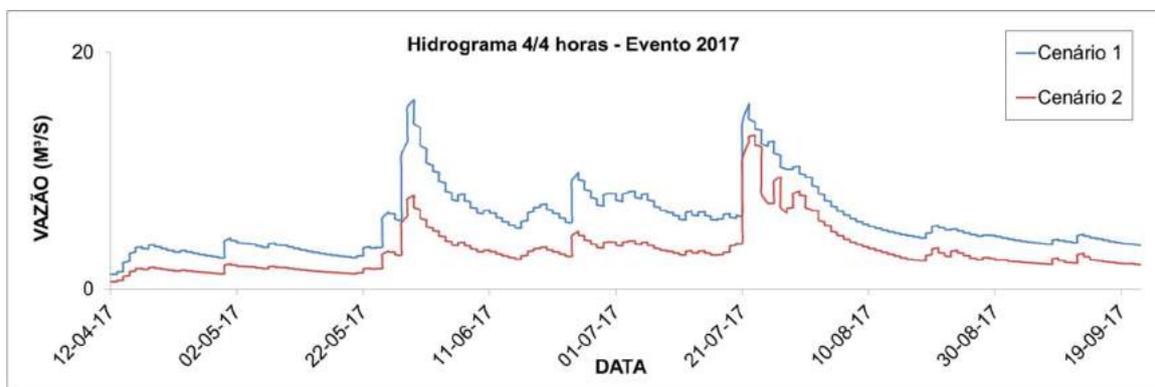
Fonte: A autora (2019).

Figura 52 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2011).



Fonte: A autora (2019).

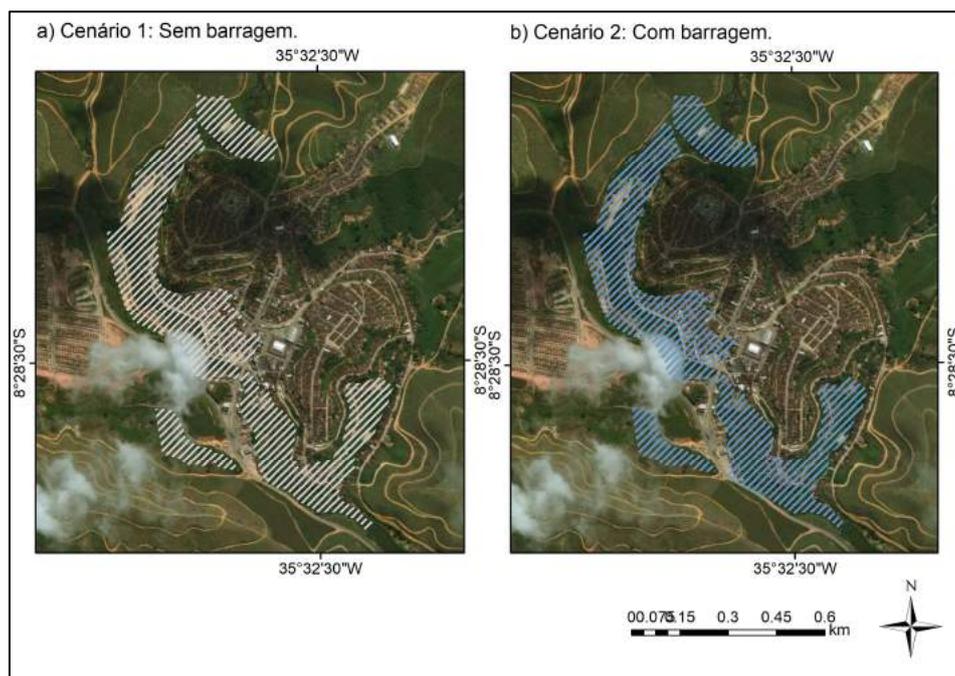
Figura 53 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Cortês (2017).



Fonte: A autora (2019).

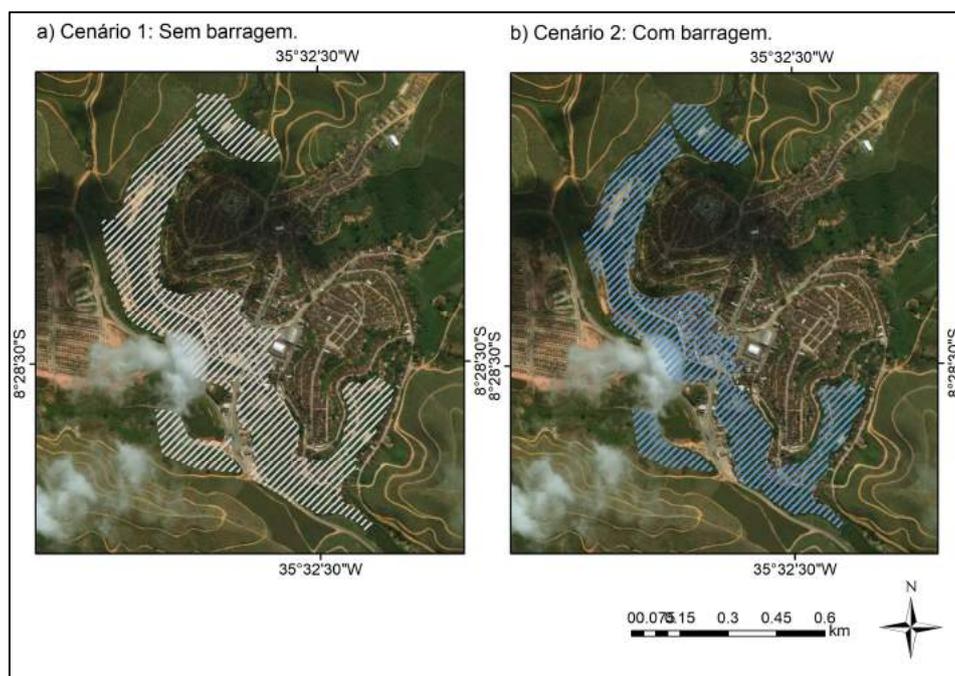
As figuras a seguir apresentam os cenários de inundação da área urbana de Cortês durante as vazões máximas das simulações.

Figura 54 – Mancha de inundação para a cidade de Cortês – Cenário 1 e 2 (2000).



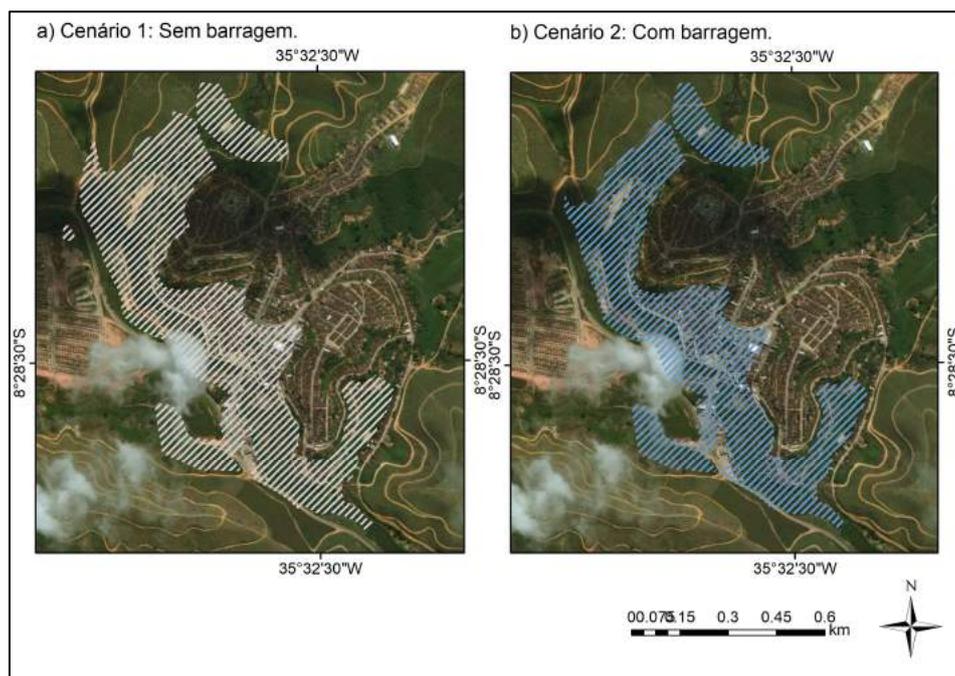
Fonte: A Autora (2019).

Figura 55 – Mancha de inundação para a cidade de Cortês – Cenário 1 e 2 (2001).



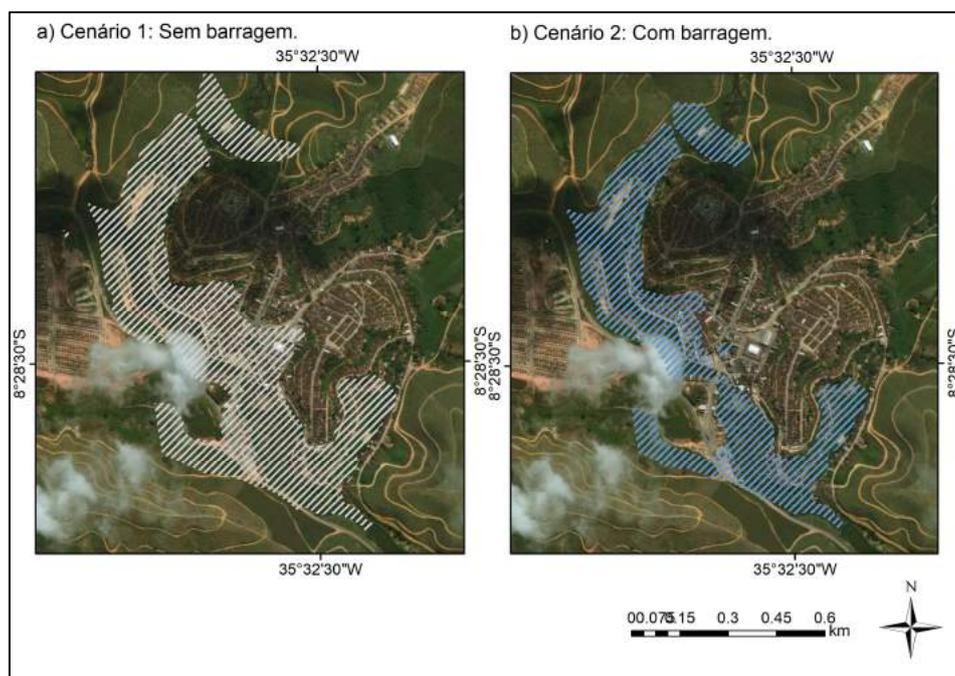
Fonte: A Autora (2019).

Figura 56 – Mancha de inundação para a cidade de Cortês – Cenário 1 e 2 (2004).



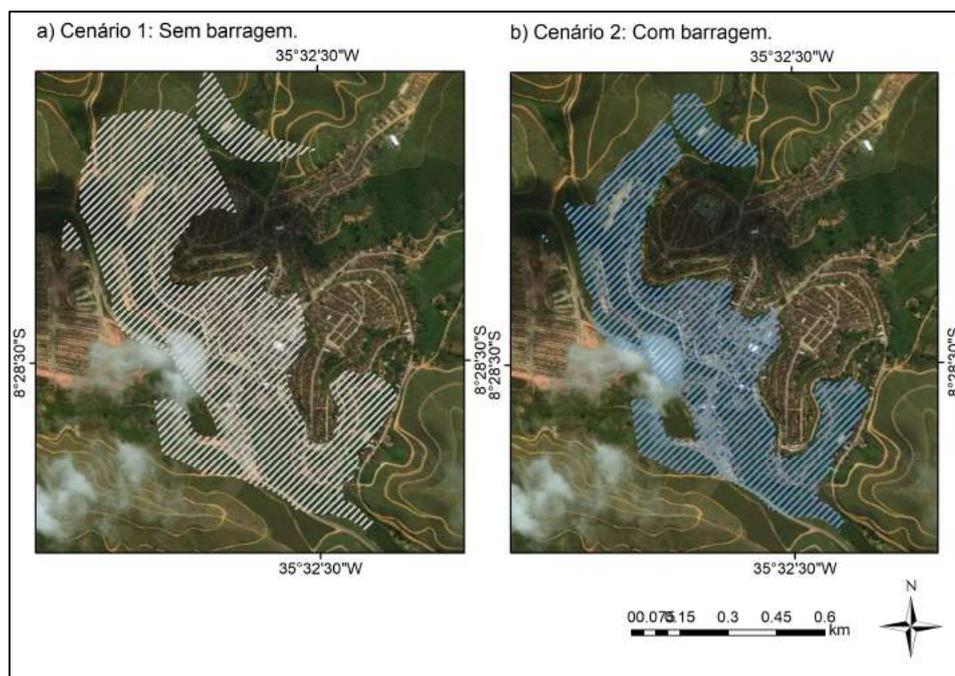
Fonte: A Autora (2019).

Figura 57 – Mancha de inundação para a cidade de Cortês – Cenário 1 e 2 (2010).



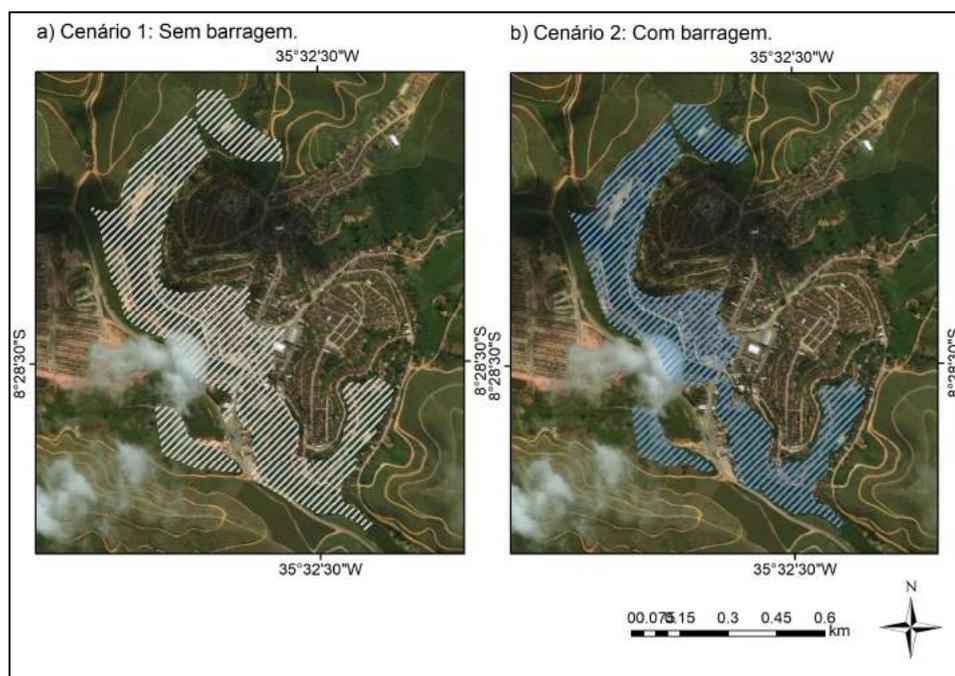
Fonte: A Autora (2019).

Figura 58 – Mancha de inundação para a cidade de Cortês – Cenário 1 e 2 (2011).



Fonte: A Autora (2019).

Figura 59 – Mancha de inundação para a cidade de Cortês – Cenário 1 e 2 (2017).



Fonte: A Autora (2019).

Percebe-se que em todos os anos simulados a área de inundação estimada pela vazão máxima invade a área urbana do município, o que condiz com as ocorrências de cheias acontecidas. Porém com os projetos das barragens, houve redução entre as áreas inundadas nos cenários 1 e 2, conforme a tabela

a seguir. Pode-se observar que ainda assim há inundações nas áreas ocupadas pela população, provavelmente devido ao pequeno porte da barragem de Barra de Guabiraba, que a torna incapaz de reduzir o impacto das cheias nas cidades mais a jusante.

Tabela 14 – Área inundada pelos eventos em Cortês.

Ano	Área inundada (km ²)		Desvio (%)
	Cenário	Cenário	
	1	2	
2000	0,27	0,28	7%
2001	0,32	0,27	-15%
2004	0,41	0,38	-9%
2010	0,41	0,31	-26%
2011	0,55	0,43	-22%
2017	0,34	0,29	-15%

Fonte: A Autora (2019).

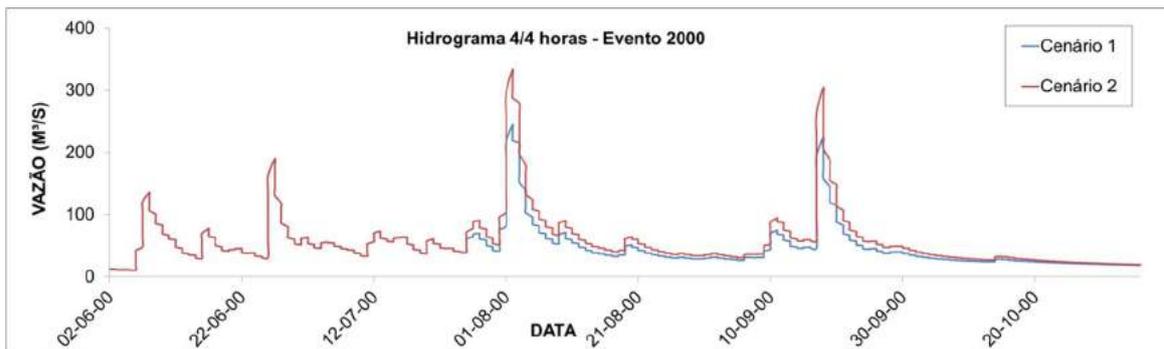
4.3.3 Gameleira

O município de Gameleira encontra-se a jusante da barragem B02 – Gameleira, sendo assim, recebe contribuição da barragem e da área incremental até chegar à cidade, incluindo vazão afluente do rio Amaraji.

Percebe-se que as séries de vazões para os dois cenários são bastante semelhantes, com pequenas variações em alguns períodos. Isso pode ser explicado pelo fato de que a maior contribuição para esta cidade provém da sub-bacia do rio Amaraji, e não há nenhum barramento para regularizar essas as vazões provenientes dele. Sendo assim, propõe-se que seja reavaliada a localização das barragens ou que seja estudada a possibilidade de construção de uma barragem no próprio rio Amaraji.

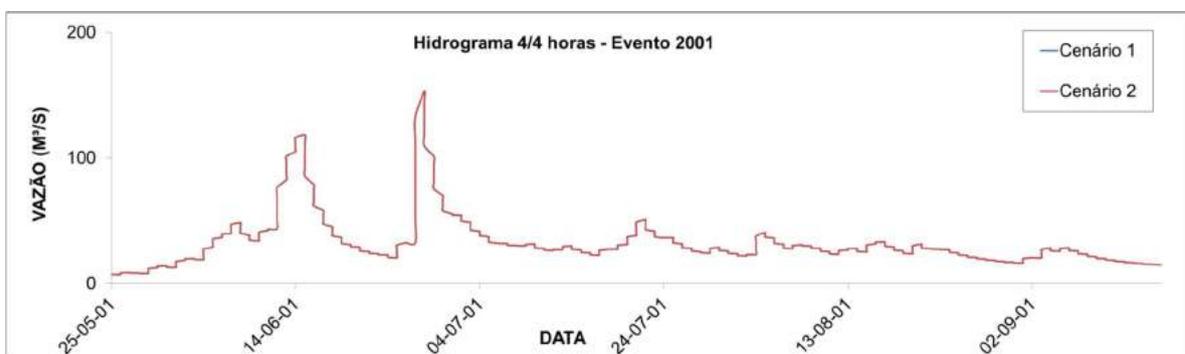
As figuras a seguir apresentam os hidrogramas para os eventos de cheias simuladas para a entrada da cidade de Gameleira.

Figura 60 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2000).



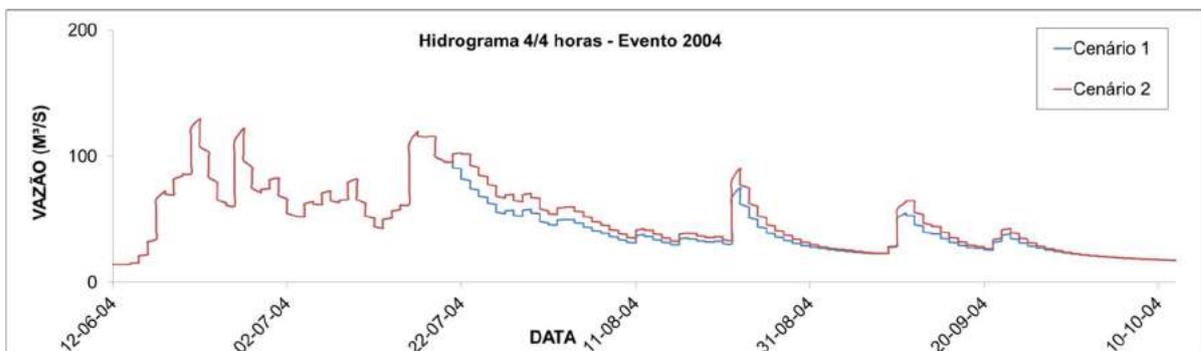
Fonte: A autora (2019).

Figura 61 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2001).



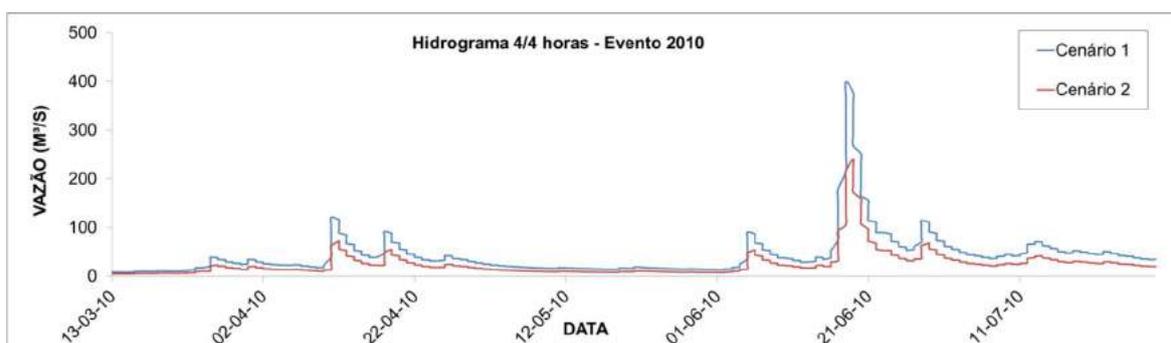
Fonte: A autora (2019).

Figura 62 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2004).



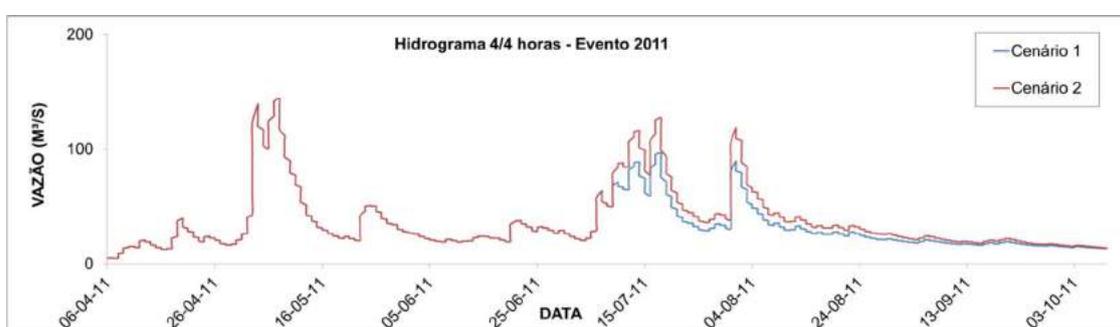
Fonte: A autora (2019).

Figura 63 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2010).



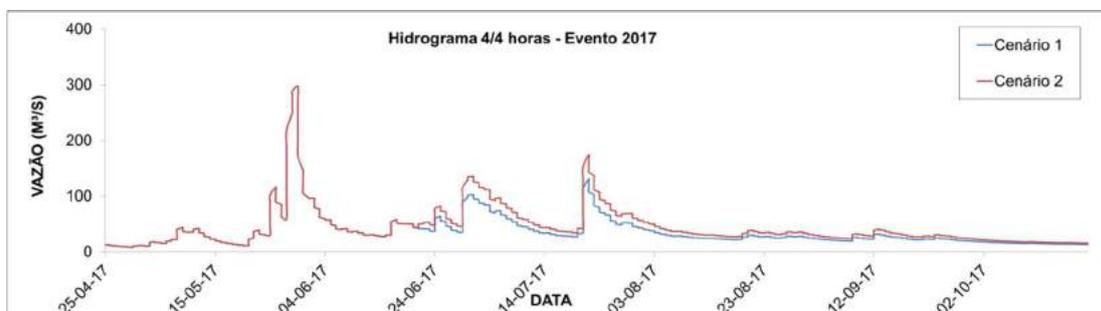
Fonte: A autora (2019).

Figura 64 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2011).



Fonte: A autora (2019).

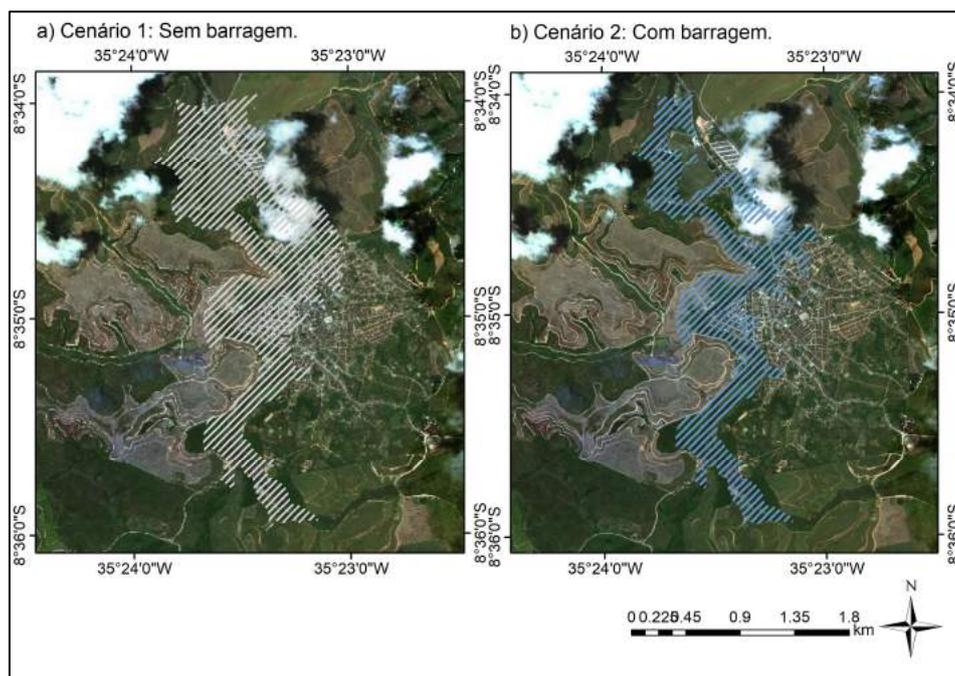
Figura 65 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Gameleira (2017).



Fonte: A autora (2019).

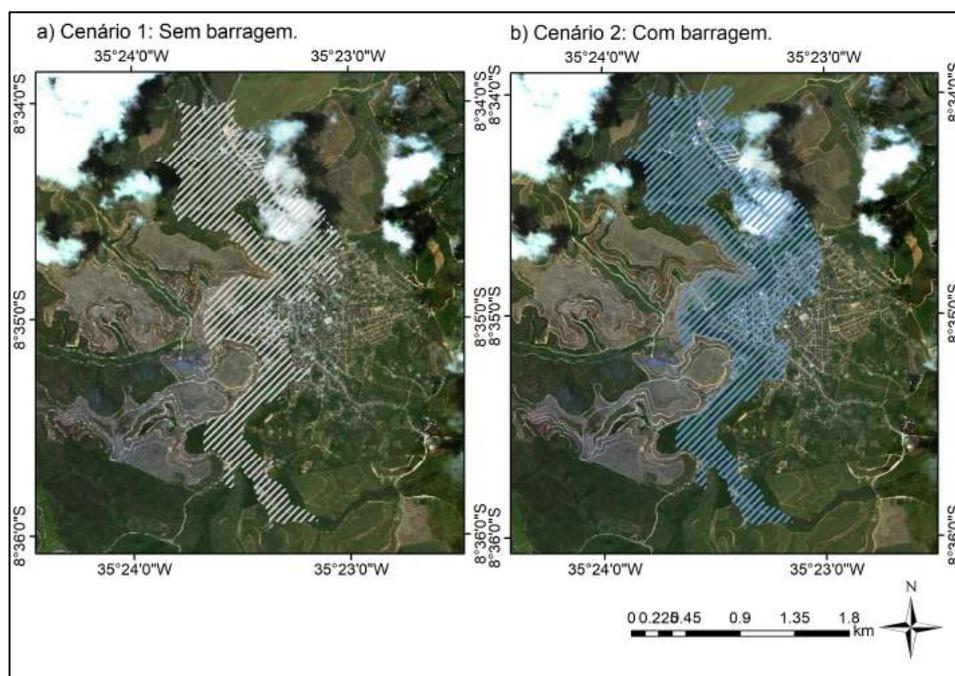
As figuras a seguir apresentam os cenários de inundação da área urbana de Gameleira durante as vazões máximas das simulações.

Figura 66 – Mancha de inundação para a cidade de Gameleira – Cenário 1 e 2 (2000).



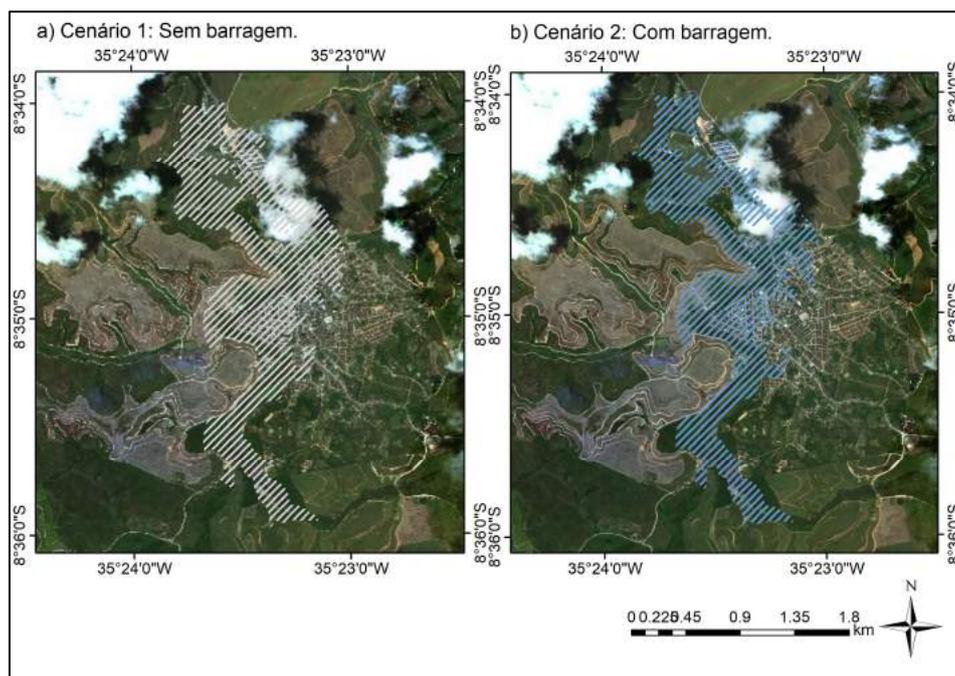
Fonte: A Autora (2019).

Figura 67 – Mancha de inundação para a cidade de Gameleira – Cenário 1 e 2 (2001).



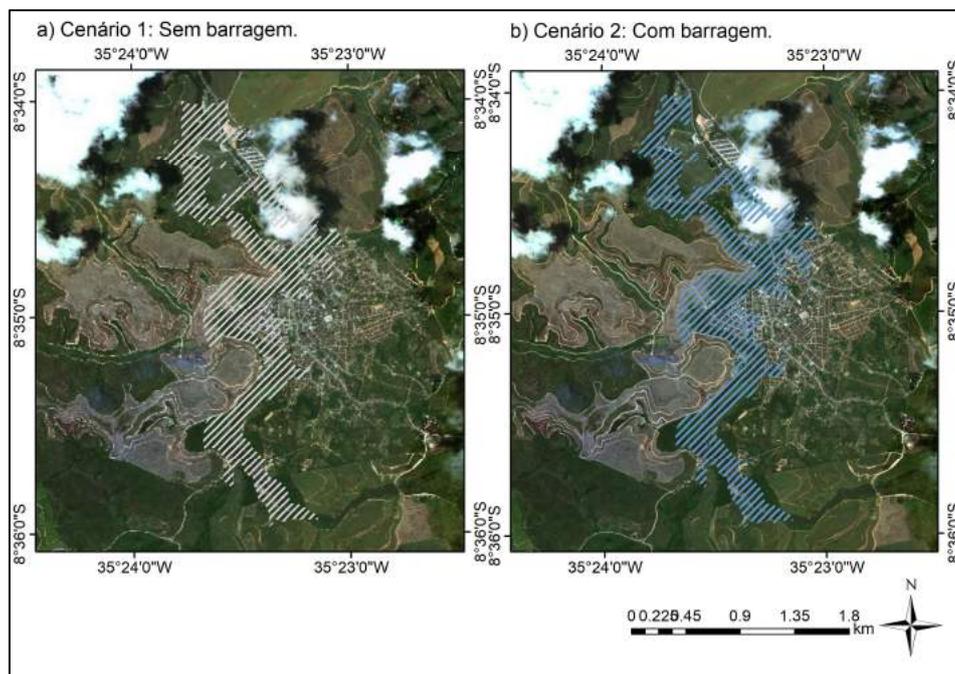
Fonte: A Autora (2019).

Figura 68 – Mancha de inundação para a cidade de Gameleira – Cenário 1 e 2 (2004).



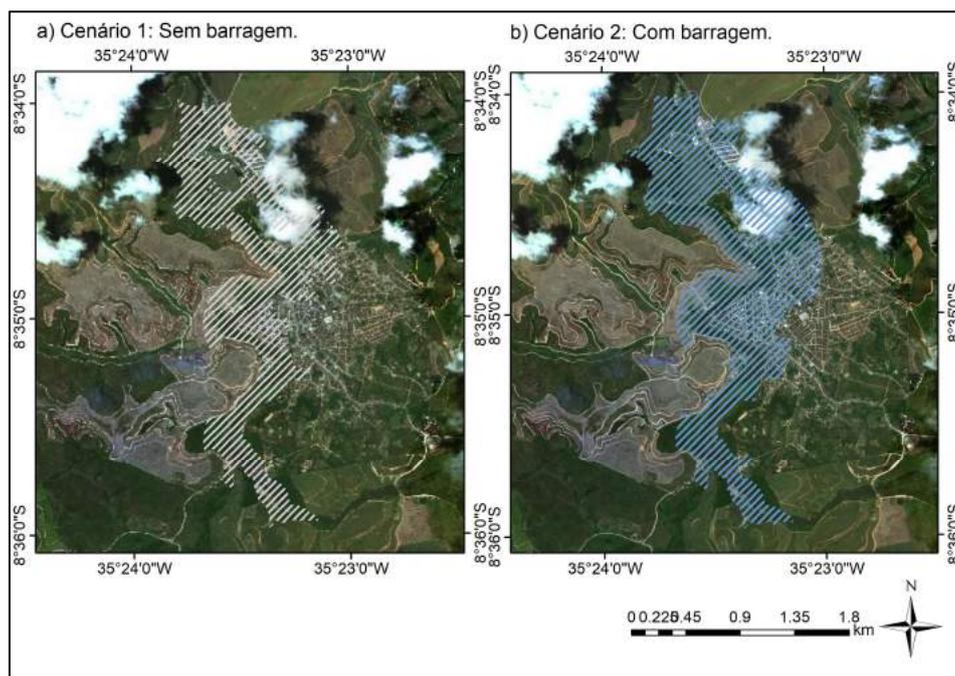
Fonte: A Autora (2019).

Figura 69 – Mancha de inundação para a cidade de Gameleira – Cenário 1 e 2 (2010).



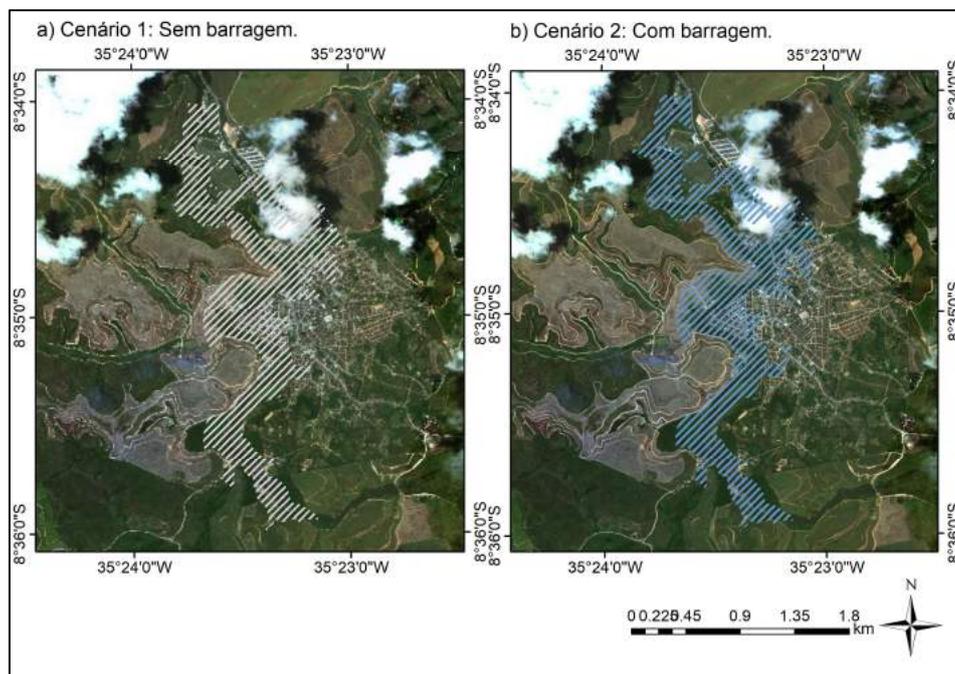
Fonte: A Autora (2019).

Figura 70 – Mancha de inundação para a cidade de Gameleira – Cenário 1 e 2 (2011).



Fonte: A Autora (2019).

Figura 71 – Mancha de inundação para a cidade de Gameleira – Cenário 1 e 2 (2017).



Fonte: A Autora (2019).

Percebe-se que em todos os anos simulados a área de inundação estimada pela vazão máxima invade a área urbana do município, o que condiz com as ocorrências de cheias acontecidas. Porém com os projetos das barragens, houve redução entre as áreas inundadas nos cenários 1 e 2, conforma a tabela

a seguir. Em dois eventos constatou-se aumento da área inundada após a hipótese de construção das barragens, o que não é esperado. Uma possibilidade é que tenha ocorrido instabilidade no modelo.

Tabela 15 – Área inundada pelos eventos em Gameleira.

Ano	Área inundada (km ²)		Desvio (%)
	Cenário 1	Cenário 2	
2000	2,19	1,53	-30%
2001	2,01	2,38	18%
2004	2,06	1,82	-12%
2010	1,59	1,58	-1%
2011	1,82	2,34	29%
2017	1,66	1,66	0%

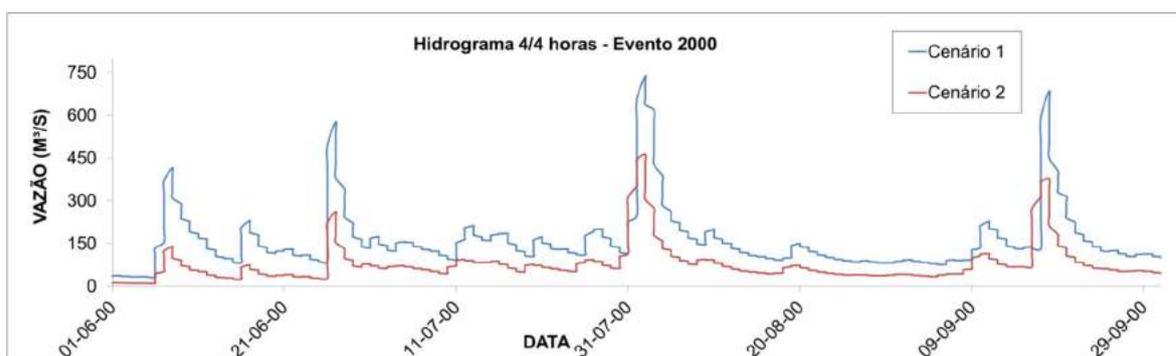
Fonte: A Autora (2019).

4.3.4 Sirinhaém

O município de Sirinhaém encontra-se a jusante da barragem B03 – Cucaú, sendo assim, recebe contribuição da barragem e da área incremental até chegar à cidade, como também recebe a contribuição da barragem B04 – Camaragibe, uma vez que seu afluente se encontra a montante da cidade de Sirinhaém.

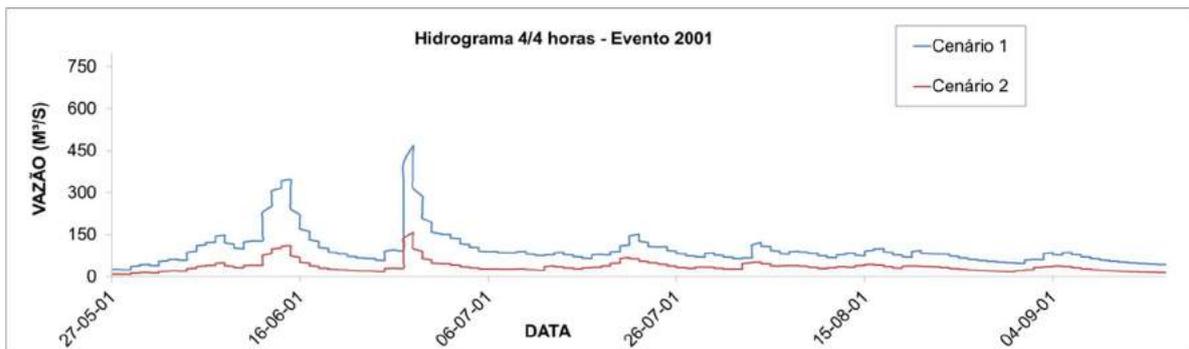
As figuras a seguir apresentam os hidrogramas para os eventos de cheias nas proximidades da cidade de Sirinhaém.

Figura 72 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2000).



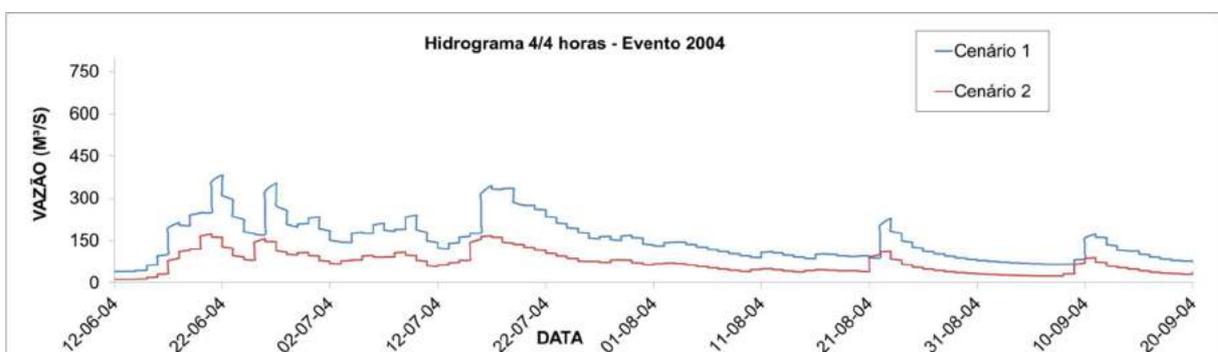
Fonte: A autora (2019).

Figura 73 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2001).



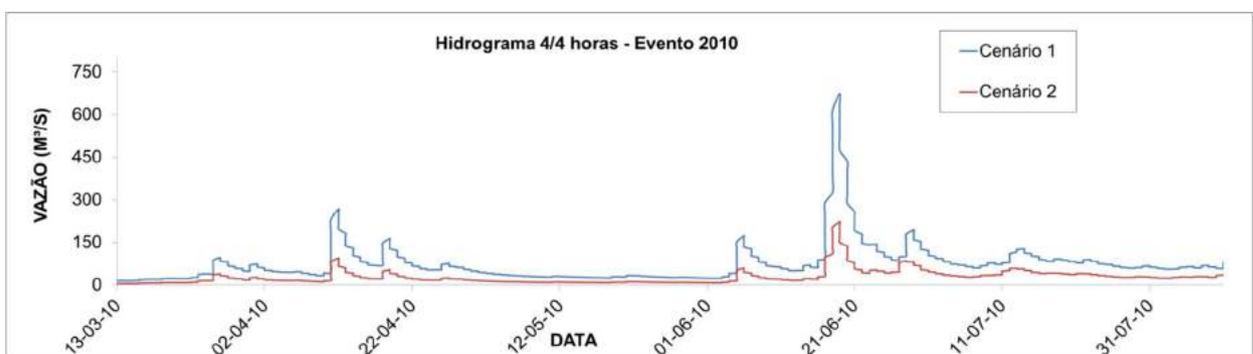
Fonte: A autora (2019).

Figura 74 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2004).



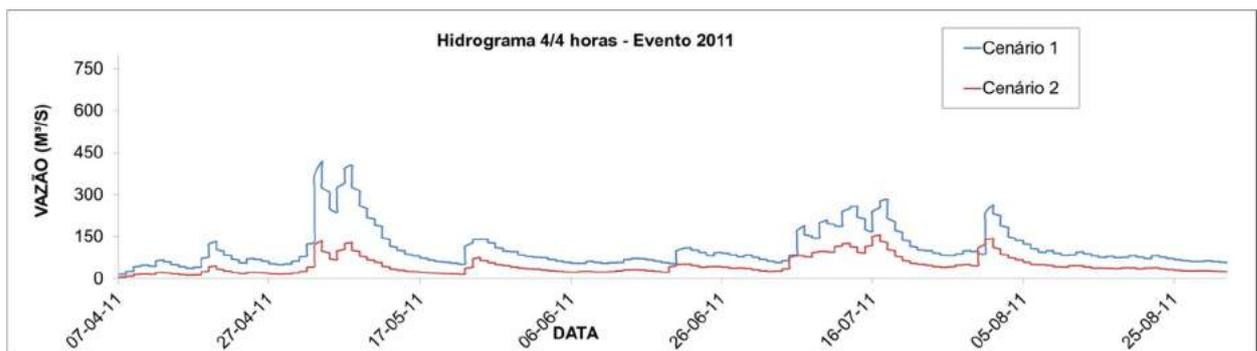
Fonte: A autora (2019).

Figura 75 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2010).



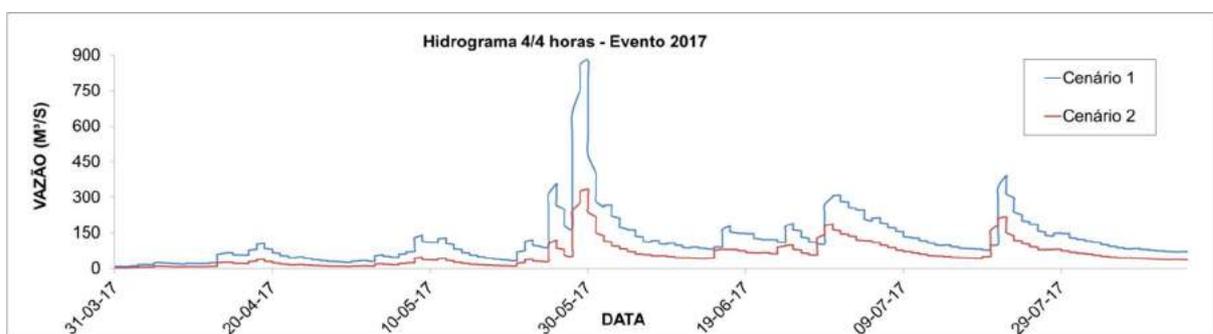
Fonte: A autora (2019).

Figura 76 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2011).



Fonte: A autora (2019).

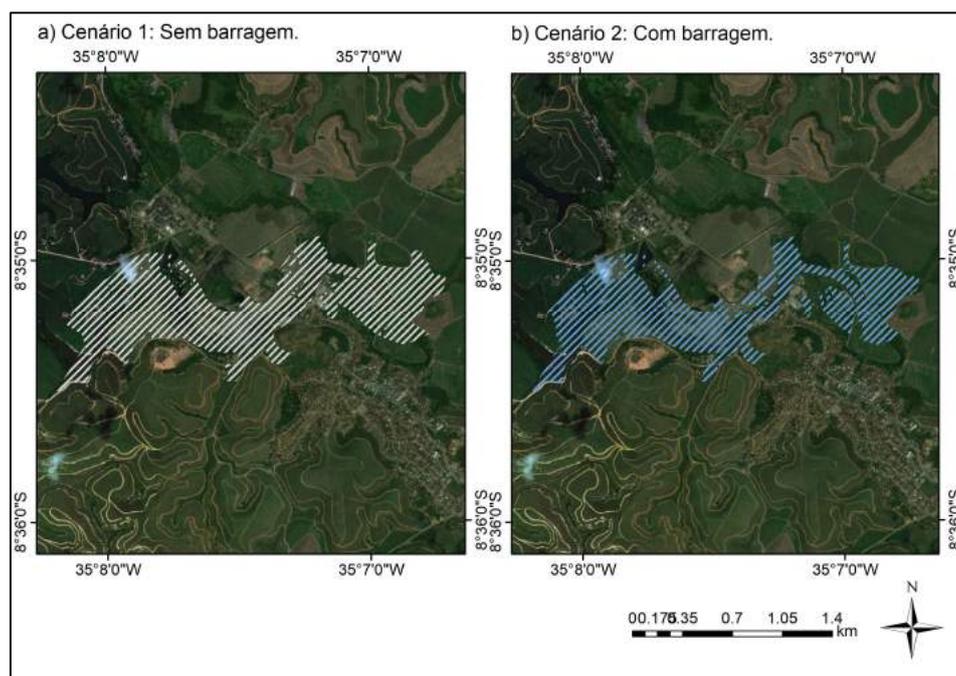
Figura 77 – Hidrograma de vazões a cada 4 horas a montante de Sirinhaém (2017).



Fonte: A autora (2019).

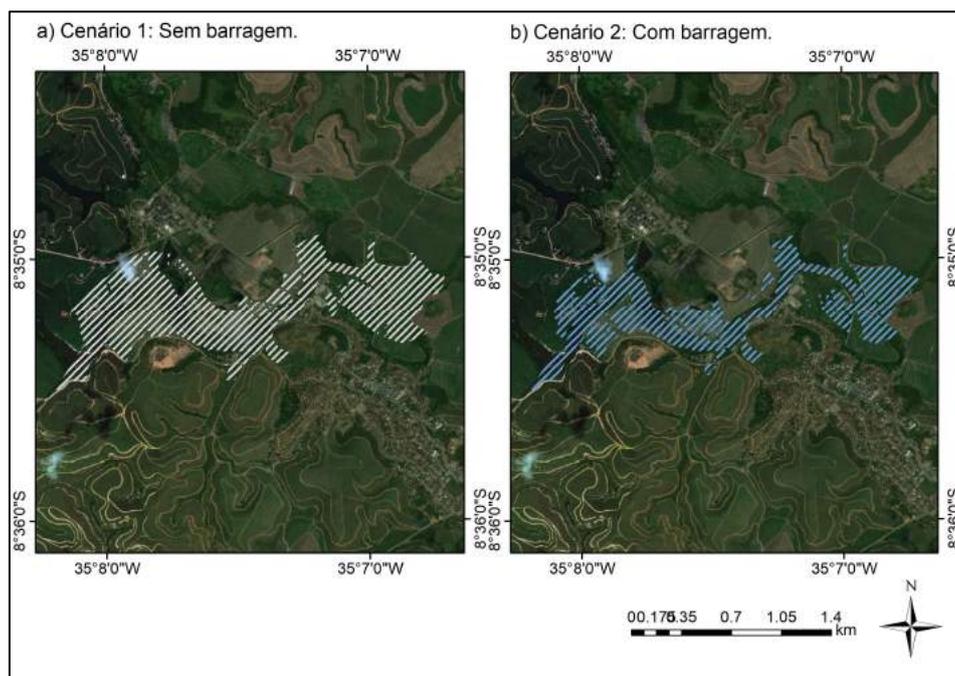
As figuras a seguir apresentam os cenários de inundação da área urbana de Sirinhaém durante as vazões máximas das simulações.

Figura 78 – Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém – Cenário 1 e 2 (2000).



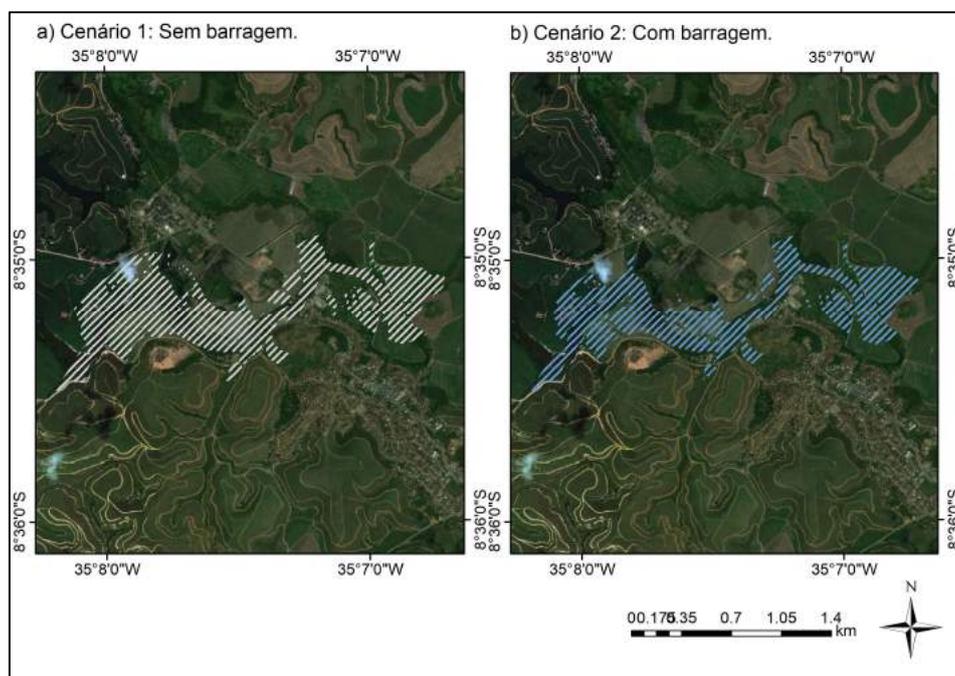
Fonte: A Autora (2019).

Figura 79 – Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém – Cenário 1 e 2 (2001).



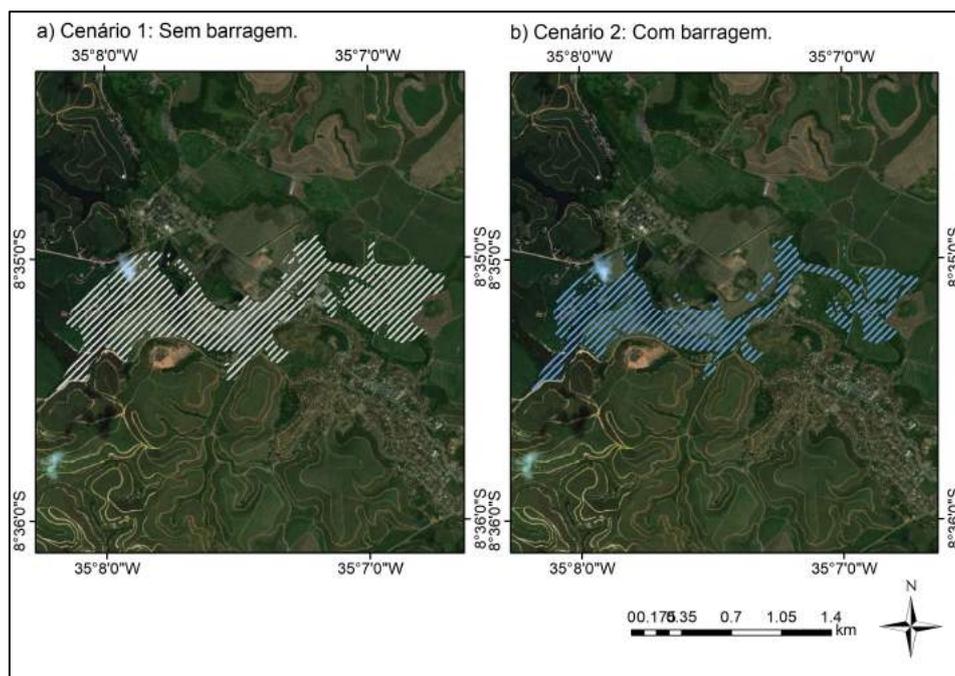
Fonte: A Autora (2019).

Figura 80 – Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém – Cenário 1 e 2 (2004).



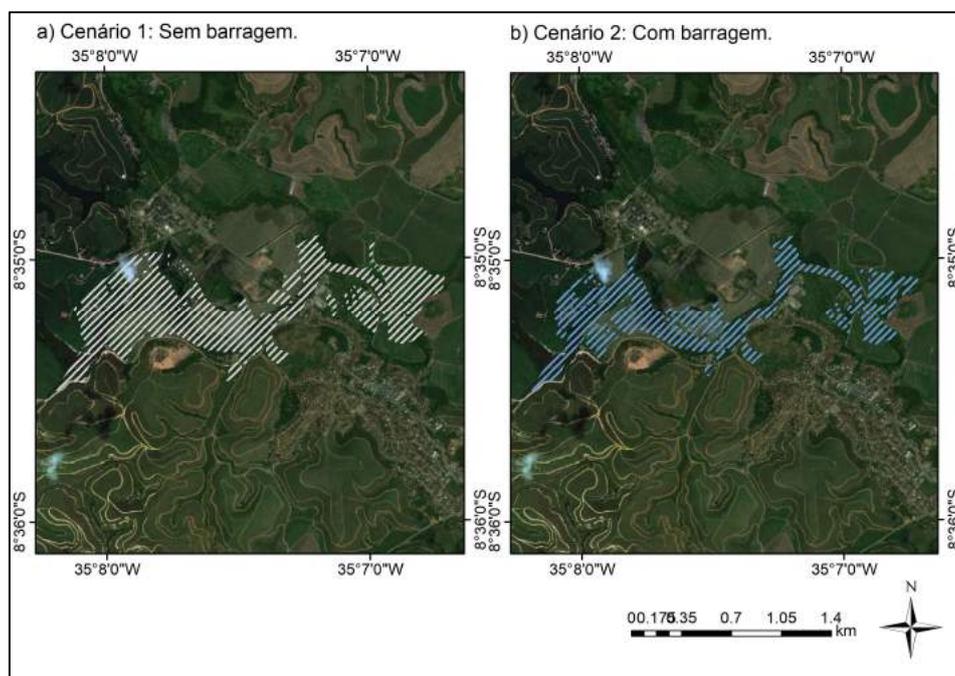
Fonte: A Autora (2019).

Figura 81 – Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém – Cenário 1 e 2 (2010).



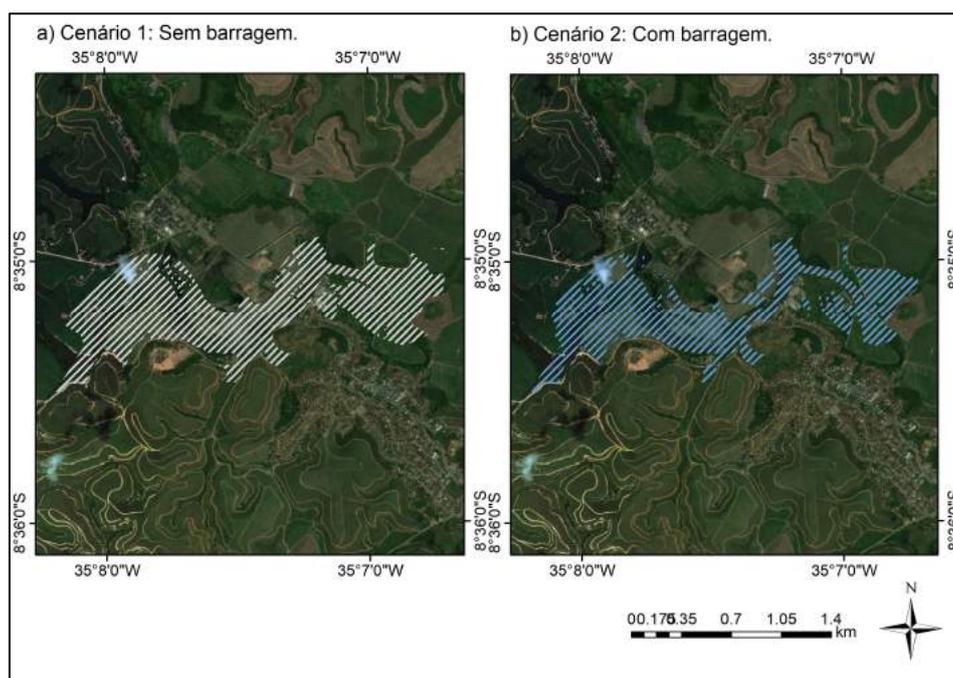
Fonte: A Autora (2019).

Figura 82 – Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém – Cenário 1 e 2 (2011).



Fonte: A Autora (2019).

Figura 83 – Mancha de inundação para a cidade de Sirinhaém – Cenário 1 e 2 (2017).



Fonte: A Autora (2019).

Percebe-se que em todos os anos simulados a área de inundação estimada pela vazão máxima invade a área urbana do município, o que condiz com as ocorrências de cheias acontecidas. Porém com os projetos das barragens, houve redução entre as áreas inundadas nos cenários 1 e 2, conforme a tabela a seguir. Novamente se percebe que a redução não foi tão significativa quanto se espera de um conjunto de barragens como o proposto.

Tabela 16 – Área inundada pelos eventos em Sirinhaém.

Ano	Área inundada (km ²)		Desvio (%)
	Cenário 1	Cenário 2	
	2000	1,15	
2001	1,05	0,75	-28%
2004	0,94	0,79	-16%
2010	1,09	0,77	-29%
2011	0,96	0,66	-31%
2017	1,16	0,90	-22%

Fonte: A Autora (2019).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objeto de estudo a bacia do rio Sirinhaém, uma das mais importantes reservas hídricas do estado para suprir as necessidades crescentes de água para os usos múltiplos, pelo fato de ser constituída por rios perenes e como se mostrou aqui, com capacidade de prover vazões regularizadas significativas para o atendimento das demandas. Todavia, como o foco da pesquisa se refere ao controle de cheias, observou-se que a capacidade das barragens propostas e sua distribuição na bacia não representam garantia adequada para o controle de cheias e conseqüentemente para a proteção da população.

Dessa forma é importante que sejam estudadas com maior profundidade a disposição dos reservatórios e sua capacidade para que a população possa efetivamente ser beneficiada no que tange à sua proteção relativa aos frequentes eventos de cheia ocorridos. No caso de Gameleira, por exemplo, a cidade recebe contribuição da barragem proposta B02 e do afluente Amaraji, sendo a maior contribuição proveniente do afluente. Sendo assim, uma alternativa para este caso seria a construção de uma barragem no curso do rio Amaraji. Por outro lado, percebeu-se o subdimensionamento das barragens, uma vez que, mesmo amortecendo as vazões de pico, as áreas inundadas ainda invadiriam os centros urbanos. É o caso de se estudar, portanto, a possibilidade de aumento da capacidade da maioria das barragens propostas.

De acordo com as análises e simulações voltadas para o comportamento hidrológico e hidrodinâmico da bacia do rio Sirinhaém, pode-se concluir que o modelo hidrológico CAWM V apresentou bons resultados para todos os períodos simulados. Suas características, utilizando dados físicos das bacias hidrográficas, facilita a definição dos seus parâmetros e conseqüentemente potencializam o modelo para utilização em bacias hidrográficas de clima similar, alterando tão somente os parâmetros de natureza física obtidos por técnicas de geoprocessamento.

Embora a análise do ajuste se faça por eventos, o modelo hidrológico foi simulado de forma contínua, com baixo desvio volumétrico. Tal característica traz mais garantia, por exemplo, ao cálculo das vazões regularizáveis. A avaliação

dessas vazões mostra potencial significativo dos reservatórios para suprir as demandas locais e mesmo por transferência para regiões mais carentes, como parte do Agreste que se situa a distâncias economicamente viáveis, provavelmente, para construção de adutoras.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por mais desafiador que seja dar continuidade a trabalhos acadêmicos, uma vez que é necessário transferir o conhecimento adquirido no histórico de pesquisas de uma determinada área científica, a continuidade de um trabalho pode trazer ganhos importantes, principalmente quando se trata de pesquisas ainda em fase de consolidação, como é o caso dos modelos CAWM, de desenvolvimento recente. Assim, a aplicação dos modelos (versões IV e V, este último utilizado na pesquisa apresentada) a novas bacias hidrográficas com dimensões e características distintas e eventuais adequações se faz essencial.

Do ponto de vista de atuação do poder público, a partir deste trabalho pode-se realizar um estudo mais aprofundado quanto às barragens sugeridas para controle de cheias no estudo do PARH, redimensionando-as e revendo suas locações, até mesmo introduzindo novos barramentos para maior proteção das cidades da região estudada.

Pelo fato de os dados do Programa Pernambuco Tridimensional serem de alta resolução, existe uma certa dificuldade em realizar as modelagens hidrológica e hidrodinâmica com esses dados, por conta do volume de processamento computacional requerido. Assim sendo, é um campo a ser mais explorado no desenvolvimento de trabalhos futuros, eventualmente reduzindo a densidade dos dados, que mesmo assim ainda serão mais precisos que a base SRTM.

As simulações hidrodinâmicas nas cidades requerem um detalhamento específico em estruturas de obras de arte, para se ter uma visão mais detalhada dos efeitos das cheias. Recomenda-se inserir todas as pontes existentes nos trechos de áreas urbanas onde se pretende definir as áreas inundáveis. Para isto, deve-se obter em campo as dimensões geométricas exatas das estruturas e o histórico de marcas das cheias nas seções transversais.

REFERÊNCIAS

ALVES, Fellipe Henrique Borba. **Sistema Avançado de Previsão de Enchentes: análises e melhorias aos modelos de previsão de chuva, hidrológico e hidrodinâmico**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Bacia do rio Sirinhaém**. Disponível em http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=21. Acesso em 02 de Janeiro de 2019.

ARAGÃO, J. O. R. **O Impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil**. Secretaria de Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA), Governo do Estado de Pernambuco. 1998.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Pernambuco-Junho de 2010**. Brasília: BM, 2012.

BERNARDES, D. A. M.; SILVA, A.M.; NASCIMENTO, S. S. A história recente das enchentes: a situação das cidades da Zona da Mata Sul de Pernambuco. **Anais Eletrônicos do V Colóquio de História “Perspectivas Históricas: historiografia, pesquisa e patrimônio”**. Luiz C. L. Marques (Org.). Recife, 16 a 18 de novembro de 2011. p. 1029-1038. ISSN: 2176-9060. Disponível em: <http://www.unicap.br/coloiodehistoria/wp-content/uploads/2013/11/5Col-p.1029-1038.pdf>. Acesso em 15 de dez. de 2018.

BRANDALIZE, Maria Cecília Bonato. **A qualidade cartográfica dos resultados do Laserscanner aerotransportado**. 2004. Tese (Doutorado em engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

CENTENO, J.A.S.; KISHI, R.T.; MITISHITA, E.A. **Aplicação de laser scanner para detecção de áreas para coleta de água de chuva**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 5009-5013.

CEPED. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995-2014**. Banco Mundial [Organização Rafael Schadeck] - Florianópolis: CEPED UFSC, 2016.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. de M.; CAMPOS, P. H. A. L. PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL: base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. **SILUSBA Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**. 12º, 2015, Brasília, Distrito Federal, Brasil. Anais... Brasília: SILUSBA, 2015.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014.

D'ARCO, E. **Radiometria e Comportamento Espectral de Alvos**. INPE. Disponível em: http://www.klickeducacao.com.br/simulados/simulados_mostra/0,7562,POR-22089-46-981-2011,00.html. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.

FEITOZA, Maria Alice Britto. **Modelagem aplicada ao planejamento dos recursos hídricos: aprimoramento de modelo conceitual chuva-vazão concentrado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. Oficina de Textos, 2008.

ITEP. **Relatório de Impacto Ambiental – Rima: Sistema de Controle de Cheias da Bacia do Rio Sirinhaém- Barragem Barra de Guabiraba**. Instituto de Tecnologia de Pernambuco; Unidade Gestora de Projetos Barragens da Mata Sul. Recife, 2011. 76p. Disponível em: <<http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/RIMA%20Barra%20de%20Guabiraba.pdf>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2018.

JHA, A. K.; BLOCH, R. & LAMOND, J. 2012. **Cidades e inundações. Um guia para a gestão integrada do risco de inundação urbana para o século XXI**. Ed. Toro, J. & Pedrosa, F.F. Banco Mundial e Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR). 54p.

LIU, William Tse Horng. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2ª Edição. Oficina de Textos, 2015.

MARENCO, J. A. Impactos de Extremos Relacionados com o tempo e o clima - Impactos sociais e econômicos. **Boletim do Grupo de Pesquisa em Mudanças**

Climáticas (GPMC). São Paulo, Edição Especial, nº 8, p. 1-5, maio de 2009. Editorial.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. 2ª Edição. ABRH, 2013..

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de Texto, 2007.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012. 276p.

MIQUELES, M.; CENTENO, J. Extração de Edificações em Ambientes Urbanos utilizando Imagem de Alta Resolução e Dados do Laser Scanner. Anais XII **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 4155-4162

NASA. ASTER: **Global Digital Elevation Map Announcement**. National Aeronautics and Space Administration. EUA, 2011. Disponível em: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Acesso em: 20 de dezembro de 2018.

PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional: PE3D**. Secretaria de Desenvolvimento Econômico – SDEC. 2016. Disponível em: www.pe3.pe.gov.br. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017. Website.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. **Diagnóstico dos recursos hídricos da bacia GL-2, Consolidação de estudos existentes, elaboração do Plano de aproveitamento dos recursos hídricos da Região metropolitana do recife, zona da mata e agreste Pernambucano e modelo de gerenciamento integrado de Recursos hídricos**. Recife, 2005.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – Volume I**. Recife, 1998. 263p.

PERNAMBUCO. Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDEC). Secretaria Executiva de Recursos Hídricos. **Resumo de Custos de Obras para Controle de Cheias**. Recife, 2016. Nota Técnica.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). **Controle de cheias**. Recife, 2011. Disponível em: <http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=327:barragens-de-contencao-decheias>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2019. Website.

RIVIX, 2000. **RiverTools User Guide**. Rivix Co. UsGuide.pdf. 486 p.

SÁ JUNIOR, Arinaldo de. **Aplicação da classificação de Koppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais**. 2009. Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2009.

SANTOS, Leandro Diomério João dos. **Evolução morfodinâmica e antropogênica da unidade geomorfológica restinga no bairro do Recife Antigo-PE**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SCHMIDT, Darlan Martines. **Dinâmica das configurações de formação e inibição das chuvas no Rio Grande do Norte: caracterização hidroclimática do estado**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SILVA, Mirele Viegas da. **Avaliação da qualidade posicional planimétrica de dados LIDAR em duas áreas urbanas no município do Recife/PE**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SLAMA, C. C.; THEURER, C.; HENRIKSEN, S. W. **Manual of photogrammetry**. 4ª Edição. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1980.

SOUZA, E. B. de et al. **Desvios percentuais da precipitação na estação chuvosa do semi-árido nordestino durante os anos de el niño e la niña no pacífico tropical e fases do padrão de dipolo no atlântico tropical**. Divisão de Ciências Meteorológicas - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª edição. UFRGS Editora, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª edição. UFRGS Editora, 2005.

USACE. **HEC-GeoRAS: GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS.** Version 4.2. United States Army Corps of Engineers – USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2009.

USACE. **River Analysis System HEC-RAS: User's Manual.** Version 5.0. United States Army Corps of Engineers – USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2016.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: Guia para utilização dos dados geomorfológicos locais.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 75p. Disponível em: <<http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>> Acesso em: 10 de fevereiro de 2017. xviii, 107 folhas, il., gráfs., tabs. 2008.

VICTORINO, Célia Jurema Aito. **Planeta água morrendo de sede: uma visão analítica na metodologia do uso e abuso dos recursos hídricos.** EDIPUCRS, 2007.

YASSUDA, Eduardo Riomey. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista de Administração Pública**, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 5-18, 1993.