



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

PEDRO FRANCISCO NOTISSO

**APLICAÇÃO DO MODELO WEAP NA AVALIAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA
DO RESERVATÓRIO DOS PEQUENOS LIBOMBOS, MOÇAMBIQUE**

GOIÂNIA

2020

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das dissertações e teses disponibilizados são de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o autor e o orientador firmam o compromisso de que ele não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico: **Dissertação** **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

Nome completo do autor: Pedro Francisco Notisso

Título do trabalho: Aplicação do modelo WEAP na avaliação de alocação de água do reservatório dos Pequenos Libombos, Moçambique

3. Informações de acesso ao documento:

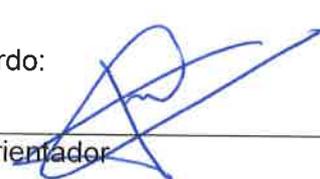
Concorda com a liberação total do documento **SIM** **NÃO**

Independente da concordância com a disponibilização eletrônica, é imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do autor

Ciente e de acordo:


Assinatura do orientador

Data: 18 / 02 / 2020

PEDRO FRANCISCO NOTISSO

APLICAÇÃO DO MODELO WEAP NA AVALIAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA DO
RESERVATÓRIO DOS PEQUENOS LIBOMBOS, MOÇAMBIQUE

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais, da
Universidade Federal de Goiás, como
requisito parcial à obtenção de título de
Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro
Martins Formiga

GOIÂNIA

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Notisso, Pedro Francisco

Aplicação do modelo WEAP na avaliação de alocação de água do reservatório dos Pequenos Libombos, Moçambique [manuscrito] / Pedro Francisco Notisso. - 2020.

72 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Pró reitoria de Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2020.

Bibliografia.

Inclui siglas, mapas, abreviaturas, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Demanda hídrica. 2. Rio Umbeluzi. 3. WEAP. 4. Segurança hídrica. I. Formiga, Klebber Teodomiro Martins, orient. II. Título.

CDU 502/504



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ATA DA DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO Nº 001/2020

Aos doze dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte (12/02/2020), às 14h00, reuniu-se no EECA – Escola de Engenharia Civil e Ambiental - UFG, sala 0, Câmpus Leste Universitário, a Banca Examinadora composta pelos: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga – CIAMB/UFG, o Prof. Dr. Denílson Teixeira – CIAMB/UFG, e a Prof^a. Dr^a. Jussanã Milograna Cortes – IFG/GO, para, sob a presidência da primeira, proceder a defesa da Dissertação intitulada: “Aplicação do modelo WEAP na avaliação de alocação de água do reservatório dos Pequenos Libombos - Moçambique”, de autoria de Pedro Francsico Notisso, discente de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (CIAMB), área de concentração em Estrutura e Dinâmica Ambiental. Foi realizada a avaliação oral no sistema de apresentação e defesa de dissertação de autoria do discente. Terminada a avaliação oral, a Banca Examinadora reuniu-se emitindo os seguintes pareceres mediante as justificativas e sugestões abaixo:

Membro da Banca	Parecer (Aprovado/Reprovado)	Assinatura
Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga	APROVADO	
Dr. Denílson Teixeira	Aprovado	
Dr ^a . Jussanã Milograna Cortes	Aprovado	

JUSTIFICATIVAS e SUGESTÕES:

O ALUNO DEVE ATENDER AS SUGESTÕES ANEXADAS NAS CÓPIAS DA BANCA

Após a avaliação, o referido discente foi considerado _____ na defesa de dissertação. Às _____ horas, o Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formigao, Presidente da Banca Examinadora, deu por encerrada a sessão e, para constar, lavrou-se a presente Ata.

Prof. Dr. Denílson Teixeira
Membro Titular

Prof^a. Dr^a. Jussanã Milograna Cortes
Membro Titular

Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga
Presidente

DEDICATÓRIA

Às minhas **filhas**, Maida e Lana, pelo seu amor inocente e sincero que sentem por mim!

À minha **amada** Natália, pela paciência, compreensão, coragem e muita força que sempre me deu para juntos continuarmos a luta!

Ao meu **irmão** Zito, pelo inquestionável papel de anjo de guarda da minha vida e de meus irmãos!

Ao meu **pai**, Francisco Notisso pelo prestigioso papel prestado na minha formação (**In memoriam**)!

A eles **dedico** este trabalho.

AGRADECIMENTO

A Deus pela saúde, força e oportunidade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais pela confiança e concessão de Carta de Aceitação.

Especialmente, ao meu orientador, que dentro da sua indisponibilidade sempre me recebeu, deixando valiosas orientações que tornaram possível este trabalho.

Aos professores do CIAMB que, direta e indiretamente, trabalharam comigo e se dedicaram de forma desmedida na transferência dos seus conhecimentos acadêmicos, profissionais e sociais.

A todos os meus colegas do CIAMB, especialmente ao Lucas; Vinícius; Lana; Isabella e Michelle que incondicionalmente e de natureza diversa sempre me dispensaram suas ajudas.

Ao grupo de orientandos de Klebber Formiga, especialmente a Kamila; Luiza; Layara; Emanuelle e Gabriel pelas valiosas contribuições.

Ao Tomás, técnico do Laboratório de Hidráulica da UFG pelo apoio prestado.

Aos meus irmãos, que sempre me apoiaram moralmente para dar continuidade com os meus estudos e que nos momentos da minha ausência nunca deixaram de cuidar de todos os meus interesses.

Aos moçambicanos em Goiânia, que se tornaram minha família na diáspora, preenchendo o vazio deixado pela distância.

Ao CNPq por ter tornado possível a continuidade dos meus estudos em uma instituição de ensino superior brasileira, através da concessão do apoio financeiro.

RESUMO

A satisfação das necessidades hídricas humanas e ambientais é um tema que tem merecido atenção no âmbito do planejamento e gestão dos recursos hídricos na África Austral. Atualmente, a bacia hidrográfica do rio Umbeluzi é a principal fonte de fornecimento de água no baixo Umbeluzi. As incertezas sobre as dificuldades de atender as necessidades hídricas futuras motivaram a realização deste estudo. O que pode acontecer com a oferta de água se os padrões de crescimento populacional, industrial e de aumento da área de irrigação mudarem? Este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de satisfação de necessidades de água na região do baixo Umbeluzi, Moçambique, através da aplicação do WEAP (*Water Evaluation And Planning System*). O WEAP é um modelo que permite simular de forma integrada sistemas dos recursos hídricos com usos múltiplos. O estudo de caso é a parte moçambicana da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi. Simularam-se quatro cenários: o cenário de Referência que corresponde a exploração atual dos recursos hídricos; três cenários de impacto: Menor Crescimento que representa valores menores de crescimento de locais de consumo, Tendencial que reflete valores médios de crescimento de locais de consumo e Maior Crescimento que corresponde a valores maiores de crescimento populacional, expansão da área agrícola e industrial, entre 2018 e 2040. Foi ainda testada e medida de adaptação que avalia a construção do reservatório sobre o rio Movene e a mudança de prioridades dos locais de consumo. A metodologia incluiu a estimativa de afluências ao sistema a partir de resultados do *Water Year Method*. A avaliação da capacidade de satisfação de necessidades de água foi feita recorrendo a estatísticas como garantia de fornecimento. Os resultados obtidos mostram a incapacidade do sistema de satisfazer as necessidades atuais e futuras independentemente do cenário estudado. O sistema apresenta garantia anual de fornecimento de água de 70,9% e 63,5% nos cenários de Referência e Menor Crescimento, com valores mais críticos de 42,1% e 31,7% nos cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento. Todos os cenários apresentam duração média de cada falha superior a três meses. A medida adaptativa testada não foi significativa, uma vez que resultou em uma redução menor da demanda total de água não atendida em todos os setores.

Palavras-chave: Demanda hídrica; rio Umbeluzi; WEAP; segurança hídrica.

ABSTRACT

The issue of satisfying human and environmental water needs has been tackled in the water resources management and planning framework in the Africa Austral. Currently, the Umbeluzi river basin is Greater Maputo main source of water supply. This study was driven by uncertainties generated by difficulties in meeting future water needs. What can happen to water supply if the patterns of population growth, industrial growth and increase in irrigation areas change? This article aims at assessing the capacity of meeting water needs in the Greater Maputo area in Mozambique through application of WEAP (Water Evaluation and Planning System). WEAP is a model that allows simulation of water resource systems with multiple uses in an integrated manner. The case study is the Mozambican part of the Umbeluzi River basin. Four scenarios were simulated: the reference scenario which corresponds to the ongoing exploitation; three impact scenarios: Lower Growth that represents lower values of growth of consumption sites, Trend that reflects average growth values of consumption sites and Greater Growth which corresponds to higher values of population growth, expansion of the agricultural and industrial area, between 2018 and 2040 and adaptation measure. The methodology included the estimation of affluences to the system obtained from the results of the Water Year Method. An assessment of the capacity to meet water needs was made using indicators such as coverage and supply guarantee. The results obtained show the system's inability to meet current and future needs. The system has an annual water supply guarantee of 70.9% and 63.5% in the Reference and Lower Growth scenarios, with more critical values of 42.1% and 31.7% in the Trend and Higher Growth scenarios. All scenarios have an average duration of each failure exceeding three months.

Keywords: Water demand; Umbeluzi river; WEAP; water security.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Representação das zonas de operação do reservatório no WEAP _____	22
Figura 2.2 - Esquema de entrada de dados no modelo WEAP _____	23
Figura 2.3 - Tela de resultados exibidos no modelo WEAP _____	26
Figura 4.2 - Precipitação anual _____	41
Figura 5.1 - Volume observado e simulado no reservatório dos Pequenos Libombos _____	48
Figura 5.6 - Aumento de área de irrigação (ha) _____	52
Figura 5.7 - Demanda de água para abastecimento doméstico _____	53
Figura 5.8 - Distribuição de consumo de água na irrigação _____	54
Figura 5.9 - Demanda de água para irrigação (hm ³) _____	54
Figura 5.10 - Demanda industrial de água (hm ³) _____	55
Figura 5.11 - Demanda total anual de água (hm ³) _____	56
Figura 5.12 - Demanda anual não atendida para abastecimento doméstico (hm ³) _____	58
Figura 5.13 - Demanda anual não atendida para irrigação (hm ³) _____	59
Figura 5.14 - Demanda anual não atendida na indústria (hm ³) _____	60
Figura 5.15 - Demanda total anual não atendida (hm ³) _____	61
Figura 5.16 - Volume do reservatório dos Pequenos Libombos _____	62
Figura 5.17 - Vazão anual de Umbeluzi no ponto de saída do oceano Índico _____	64
Figura 5.18 - Probabilidade de excedência de vazão de Umbeluzi no ponto de saída _____	64
Figura 5.19 - Características de modelo de alocação de água com medida de adaptação _____	66
Figura 5.20 - Demanda anual não atendida para abastecimento doméstico (hm ³) _____	67
Figura 5.21 - Demanda anual não atendida na irrigação (hm ³) _____	68
Figura 5.22 - Demanda anual não atendida na indústria (hm ³) _____	69
Figura 5.23 - Demanda total anual não atendida (hm ³) _____	69
Figura 5.24 - Volume do reservatório de Movene _____	71
Figura 5.25 - Volume do reservatório dos Pequenos Libombos com reservatório de Movene operando _____	72
Figura 5.26 - Probabilidade de excedência de vazão de saída _____	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Distribuição da área de drenagem da bacia	29
Tabela 3.2 - Cota x Área x Volume do reservatório dos Pequenos Libombos	31
Tabela 3.3 - População observada entre 1997 e 2007	33
Tabela 3.4 - Demanda anual de água no baixo Umbeluzi - Moçambique (2005) (hm ³).....	34
Tabela 3.5 - Taxa de uso e demanda de água para irrigação	34
Tabela 3.6 - Requisitos de vazão mínima ecológica	35
Tabela 4.1 - Teste de tendência de precipitação total anual	41
Tabela 4.2 - Teste de tendência de vazão média anual.....	42
Tabela 4.3 - Condições hidrológicas observadas (2005-2017)	44
Tabela 5.1 - Funções objetivas de parâmetros observados e simulados.....	49
Tabela 5.2 - Distribuição de consumo mensal de água na irrigação (percentagem)	54
Tabela 5.3 - Média anual da demanda de água por setor (2018-2040)	57
Tabela 5.4 - Resultados de simulação do reservatório dos Pequenos Libombos (2005-2040)	65
Tabela 5.5 - Desempenho do reservatório dos Pequenos Libombos (2005-2040).....	65
Tabela 5.6 - Resultados de simulação do reservatório de Movene (2030-2040)	71
Tabela 5.7 - Desempenho do reservatório de Movene (2030-2040)	72
Tabela 5.8 - Resultados do reservatório dos Pequenos Libombos com operação do reservatório de Movene (2030-2040)	74
Tabela 5.9 - Desempenho do reservatório dos Pequenos Libombos com operação do reservatório de Movene (2030-2040)	74
Tabela 5.10 - Condições hidrológicas previstas (2018-2040)	75

LISTA DE ACRÓNIMOS E/OU SIGLAS

ARA -Sul – Administração Regional de Águas do Sul

BRU – Bacia do Rio Umbeluzi

DNRH – Direção Nacional de Recursos Hídricos

INE – Instituto Nacional de Estatística

IWMI – *International Water Management Institute*

MICOA – Ministério para a Coordenação da Ação Ambiental

RM – República de Moçambique

RPL – Reservatório dos Pequenos Libombos

SADC – *Southern African Development Community*

SEI – *Stockholm Environment Institute*

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SSD – Sistema de Suporte a Decisões

UGBU – Unidade de Gestão da Bacia de Umbeluzi

WEAP – *Water Evaluation and Planning System*

Sumário

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	11
1.1 Problema	12
1.3 Objetivos	13
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 PADRÕES DE USO E SEGURANÇA HÍDRICA	14
2.2 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	15
2.3 MODELOS DE SIMULAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	17
2.4 O MODELO WEAP – WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM	18
2.5 INSTRUMENTOS LEGAIS DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	26
CAPÍTULO III - A BACIA DO RIO UMBELUZI	28
3.1 Localização	28
3.6 INFRAESTRUTURAS DE ARMAZENAMENTO	30
3.7 DISPONIBILIDADE E DEMANDA DOS RECURSOS HÍDRICOS	32
CAPÍTULO IV – METODOLOGIA	36
4.1 OBTENÇÃO E ANÁLISE DA BASE DE DADOS	36
4.2 DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS	37
4.3 TENDÊNCIA HIDROLÓGICA PASSADA	40
4.4 SELEÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO	42
4.5 APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	43
4.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO	45
CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	48
5.2 CRESCIMENTO DA POPULAÇÃO	50
5.3 AUMENTO DA ÁREA DE IRRIGAÇÃO	51
5.5 DEMANDA DE ÁGUA	52
5.6. DEMANDA DE ÁGUA NÃO ATENDIDA	57
5.7 RESERVATÓRIO DOS PEQUENOS LIBOMBOS	61
5.8 VAZÃO ECOLÓGICA	63
5.9 INDICADORES DE DESEMPENHO	64
5.10 IMPLANTAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE MOVENE	65
5.11 SÉRIE HIDROLÓGICA PREVISTA	74
CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO	76
6.1 Considerações finais	76
6.2 Recomendações	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Em países e regiões com problemas de água, os recursos hídricos tornaram-se uma questão estratégica não apenas relacionada à sobrevivência e desenvolvimento, mas também um aspecto importante da segurança nacional e das relações internacionais (ZHAO *et al.*, 2009). A preocupação com a garantia da segurança hídrica para abastecimento doméstico é crescente no sul de Moçambique tendo em conta a situação atual, especialmente devido ao agravamento da escassez de água.

A gestão de longo prazo dos recursos hídricos enfrenta muitos desafios vinculados a alto grau de incerteza associado tanto ao uso do recurso como à disponibilidade do mesmo (NADAL *et al.*, 2017). A quantidade dos recursos hídricos disponíveis numa região é uma variável importante que pode limitar o desenvolvimento da vida e também incidir no desenvolvimento de atividades produtivas como agricultura e indústria.

Estes desequilíbrios tendem a agravar-se em resultado das mudanças globais, não só devido às alterações climáticas, mas também a outras mudanças como o aumento populacional, mudanças no uso do solo, urbanização e migração de zonas rurais para áreas urbanas (JUÍZO; LÍDEN, 2010; DROOGERS *et al.*, 2014). A expansão da irrigação é outro desafio que altera o regime hidrológico natural do rio (SWECO; ASSOCIATES, 2005). O rio Umbeluzi tem dois grandes reservatórios, o reservatório de Mnjoli na Suazilândia, com uma capacidade total de 152 hm³ que se destina a irrigação e o reservatório dos Pequenos Libombos em Moçambique, com uma capacidade total de 392 hm³ com finalidade de abastecimento. Uma pequena parte da água disponível é alocada para irrigação e indústrias em Moçambique (DROOGERS *et al.*, 2014).

Para o enfrentamento destas questões, a simulação matemática é de grande utilidade porque, permite representar o funcionamento do sistema de forma bastante realista (SIMÕES; OLIVEIRAS, 2010). Vários modelos são utilizados na modelagem dos recursos hídricos com destaque para WEAP (*Water Evaluation And Planning System*). Muitos pesquisadores fizeram estudos sobre alocação dos recursos hídricos em diferentes escalas espaciais e temporais em todo o mundo (McCartney *et al.*, 2004; Le Roy, 2005; Arranz; McCartney, 2007; Johannsen *et al.*, 2016). Esses estudos indicam que a avaliação foi realizada na escala de bacias e sub-bacias hidrográficas em muitos países para um melhor planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

Na bacia do rio Umbeluzi (BRU) destacam-se os estudos de SWECO; Associates (2005); Juízo; Liden (2010); Droogers *et al.* (2014). Contudo, os primeiros dois estudos estão

um pouco desatualizados, e o último não estimou o volume da demanda não coberta. Portanto, este trabalho utilizou sempre que foi necessário os dados, métodos e resultados desses estudos. O que pode acontecer com a oferta de água se os padrões de crescimento populacional, industrial e de aumento da área de irrigação mudarem ao longo do tempo?

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é a avaliação do sistema hídrico, tendo em vista a satisfação das necessidades de água para abastecimento urbano e desenvolvimento de atividades agrícolas e industriais no baixo Umbeluzi em Moçambique. Para tal, utilizou-se o modelo WEAP para estimar as operações atuais do reservatório dos Pequenos Libombos e a implantação do reservatório de Movene, de novas prioridades e as suas capacidades para satisfazer as necessidades de água futuras na região.

Os principais resultados mostram que o cenário de Referência apresenta resultados positivos para a manutenção do sistema dos recursos hídricos. Porém, esse cenário de desenvolvimento futuro dificilmente será concretizado, pois a taxa utilizada é inferior ao histórico da região. A medida de adaptação testada não foi significativa, uma vez que resultou em uma redução menor na demanda total não atendida, com apenas o cenário Menor Crescimento a apresentar uma situação satisfatória.

1.1 Problema

A gestão efetiva da BRU é especialmente crítica para a sustentabilidade futura de mais de 1,9 milhões de habitantes (INE, 2019) no baixo Umbeluzi que dependem do seu fluxo. Como Moçambique está a jusante é afetado pela escassez de água mais do que a região a montante. O aumento da demanda de água para os setores de abastecimento doméstico, irrigação agrícola e indústria na bacia hidrográfica é cada vez mais preocupante, ganhando mais destaque com o crescimento populacional e numa altura de grandes incertezas de variáveis hidrológicas e climáticas na região de África Austral (DROOGERS *et al.*, 2014).

O rio Umbeluzi é um sistema de recursos hídricos que enfrenta alguns dos principais desafios dos rios transfronteiriços na África Austral: alta variabilidade climática, escassos recursos hídricos, usuários à montante versus a jusante, grande escala versus pequena escala, crescimento populacional e expansão da irrigação (SWECO; ASSOCIATES, 2005). Um aspecto importante é que atualmente não existe nenhum acordo de partilha de água na BRU.

Nos últimos cinco anos a BRU vem sofrendo escassez de água resultante da precipitação insuficiente e não prolongada. Para o reservatório dos Pequenos Libombos, a Administração Regional de Águas do Sul (ARA-Sul) adotou medidas de restrição no fornecimento de água para todos os setores devido ao baixo nível de armazenamento.

Assim as principais questões que se colocam são as seguintes: De que forma pode ser alocada a água do reservatório dos Pequenos Libombos para atender as atuais e futuras demandas de água para usos múltiplos, perante uma disponibilidade limitada e confrontada com a expansão da área agrícola irrigada, crescimento populacional e do parque industrial? De que forma a construção do reservatório sobre o rio Movene pode atender as futuras demandas de água no baixo Umbeluzi?

1.3 Objetivos

Objetivo geral

Avaliar a capacidade atual e futura do sistema hídrico de satisfazer as demandas hídricas dos setores urbano, agrícola e industrial na região do baixo Umbeluzi, a partir do reservatório dos Pequenos Libombos, empregando modelagem do modelo WEAP e considerando diferentes cenários como Menor Crescimento, Médio Crescimento e Maior Crescimento.

Objetivos específicos:

- a) Avaliar os usos múltiplos de água do reservatório dos Pequenos Libombos.
- b) Examinar até que ponto a atribuição de maior prioridade ao abastecimento e vazão ecológica pode melhorar a satisfação das necessidades de água no baixo Umbeluzi.
- c) Examinar a capacidade futura de oferta de água com a construção do reservatório sobre o rio Movene na satisfação da demanda de água na região.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PADRÕES DE USO E SEGURANÇA HÍDRICA

A segurança hídrica é definida como a utilização sustentável dos recursos hídricos, adequada em quantidade e qualidade, para o bem-estar humano, desenvolvimento socioeconômico e conservação ecológica, incluindo um nível aceitável de risco de desastres relacionados à água (SUN *et al.*, 2016). Um sistema de segurança hídrica é um sistema grande e complexo que inclui subsistemas como sociedade, economia, recursos hídricos, ecologia da água e ambiente hídrico (WILK; JONSSON, 2013).

Em países e regiões com problemas de água, os recursos hídricos tornaram-se uma questão estratégica não apenas relacionada à sobrevivência e desenvolvimento, mas também um aspecto importante da segurança nacional e das relações internacionais (ZHAO *et al.*, 2009).

Fang (2007) refere que as questões da segurança dos recursos hídricos deveriam se concentrar em resolver o desequilíbrio entre a oferta e a demanda dos recursos hídricos, que pode prejudicar o desenvolvimento social e econômico, bem como a estabilidade do sistema ecológico. Estimar esse desequilíbrio é o foco do presente trabalho numa escala de sub-bacia. A avaliação da segurança dos recursos hídricos envolve o desenvolvimento de índices de pressão dos recursos hídricos, índice social de escassez de água, índice de pobreza de água (MANANDHAR *et al.*, 2012; WILK; JONSSON, 2013) e capacidade de carga dos recursos hídricos (CHEN; WEI, 2014).

Nas últimas décadas, os recursos hídricos têm apresentado diminuição devido a mudanças do clima e do uso do solo, alterando o processo hidrológico. A redução da precipitação, principal fator para disponibilidade dos recursos hídricos faz com que haja diminuição do escoamento.

A distribuição temporal e espacial desigual dos recursos hídricos numa região é a principal causa da falta de água (ZHANG *et al.*, 2019). A característica espaço-temporal dos recursos hídricos representa um sério desafio para manter um suprimento confiável e suficiente para atender a uma crescente demanda do desenvolvimento socioeconômico, em muitos países, onde a disponibilidade de água é baixa (JIANG, 2015).

Com disponibilidade limitada de água no espaço e no tempo, é necessário que se use de maneira eficaz e eficiente a água com risco mínimo de tornar a escassez mais severa. O padrão de uso de água em muitos países intensifica a escassez de água, com maior exposição

ao risco de escassez severa (JIANG, 2015). Tais padrões estão relacionados ao crescimento populacional, urbanização acompanhada com mudança no estilo de vida, mudanças no uso do solo que aumenta a demanda por água.

O padrão do uso de água implica maior competição entre os setores por água em quantidade limitada. Alterar os padrões do uso de água e promover a implementação efetiva da Gestão Integrada dos Recursos Hídricos representam uma estratégia importante para melhorar a segurança hídrica.

2.2 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS

A simulação consiste na experimentação do funcionamento de um sistema de forma a obter uma avaliação do seu desempenho. A simulação matemática recorre a modelos computacionais para descrever o funcionamento de um sistema, enquanto a simulação física faz uso de modelos físicos a uma escala reduzida.

Os modelos que simulam fenômenos relacionados com recursos hídricos podem ser classificados em três grandes categorias: hidráulicos, que correspondem a aqueles que simulam o comportamento de fluxos nos canais para diferentes cenários; hidrológicos, que simulam a relação entre as características meteorológicas e o escoamento de uma bacia; e de planificação, que modelam a operação dos sistemas dos recursos hídricos de uma bacia (WURBS, 2005). No planejamento e gestão dos recursos hídricos, a simulação matemática é de grande utilidade porque, permite representar o funcionamento do sistema de forma bastante realista (SIMÕES; OLIVEIRAS, 2010). A verificação de várias soluções alternativas permite identificar a solução mais adequada por um processo de tentativa e erro.

Ao simularem vários cenários e acompanharem a evolução do estado da bacia hidrográfica, os modelos são uma importante ferramenta de apoio à decisão, permitindo identificar as políticas de gestão que asseguram o cumprimento dos objetivos do sistema (Simões; Oliveiras, 2010; Hipólito; Vaz, 2017), como a compatibilização das disponibilidades com as necessidades de água.

Segundo Wurbs (2005) os modelos de simulação da operação de reservatórios permitem analisar os seguintes tipos de estudos:

- ✓ pré-dimensionamento de infraestruturas;

- ✓ avaliação da capacidade de satisfação das necessidades de águas servidas por um aproveitamento hidráulico, tendo em conta uma determinada política de gestão;
- ✓ definição de políticas de gestão de bacias hidrográficas de forma a assegurar a satisfação das necessidades de água, controlar a escassez de água ou conciliar usos conflitantes de água.

Os dados de entrada desses modelos incluem a identificação e caracterização das infraestruturas de armazenamento, de adução e de distribuição de água e dos locais de demanda de água, tais como centros urbanos, áreas irrigadas e parques industriais (WURBS, 2005). As aflúncias de água de cada seção com interesse e as necessidades de água são também dados de entrada do modelo. Segundo Yates *et al.* (2005a) os principais resultados deste tipo de modelos são os volumes de água armazenados ou transportados em cada infraestrutura ao longo do período de simulação e um conjunto de parâmetros que descrevem o desempenho do sistema, como o volume médio fornecido a cada usuário (local de consumo) de água ou o número de falhas de abastecimento.

Os modelos de simulação da operação de reservatórios podem distinguir-se pela forma como as regras de operação do sistema são definidas e pelo método computacional utilizado para calcular o balanço hídrico. Desta forma, as políticas de operação podem ser definidas por regras que definem cada decisão em função da água disponível em *supply driven rules* [regras orientadas pela oferta] ou por regras que definem os objetivos a atingir, deixando ao modelo a decisão sobre como os alcançar em *demand driven rules* [regras orientadas pela demanda] (SIMÕES; OLIVEIRA, 2010).

As regras *supply driven* são estabelecidas de modo a satisfazer as necessidades de água em cada passo de cálculo. São aplicadas de montante para jusante e determinam como o balanço hídrico é realizado em cada nó e arco. Estas regras estão em função de água disponível em cada nó ou arco.

Em alternativa, os modelos com políticas *demand driven* incluem um submodelo de otimização que em cada passo de cálculo minimiza os desvios para um conjunto de metas pré-definidas, por exemplo, objetivos de fornecimento de água ou níveis ideais de armazenamento em reservatório. Em cada passo de cálculo o modelo determina as descargas a realizar em cada reservatório e as atribuições de água a cada uso, de modo a tentar que estas metas sejam cumpridas. No modelo *demand driven* o fornecimento de água é influenciado pela procura.

2.3 MODELOS DE SIMULAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

A publicação científica, no campo da gestão de água é muito vasta e complexa, partindo dos relatórios, artigos e manuais. Fica evidente o uso de vários modelos matemáticos para simular diferentes sistemas de recursos hídricos e avaliar os impactos de diferentes alternativas de manejo de água no mundo. A literatura de gestão dos recursos hídricos é rica em modelos de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos (GIRH) (YATES *et al.*, 2005a).

O *Water Resources Yield Model* (WRYM) foi desenvolvido na África do Sul. É usado para avaliar a alocação de água em bacias hidrográficas (MACKENZIE; VAN ROOYEN, 2003). O modelo simula as águas superficiais e subterrâneas, bem como as transferências entre bacias. A rede é analisada para cada período de tempo e resolvida com as estruturas de prioridades selecionadas. O utilizador da rede minimiza as prioridades para cada etapa de tempo, escolhendo a melhor alocação de água para os diferentes usuários.

O *River Basin Planning And Management* (RIBASIM) é um modelo desenvolvido pela DELTARES que permite simular a bacia hidrográfica consoante um conjunto de políticas de gestão de infraestruturas definidas pelo utilizador. O *software* permite realizar estudos sobre a qualidade de água e de sedimentação ao longo curso de água e dos reservatórios. O RIBASIM apresenta uma interface de três módulos: uma ferramenta de Sistemas de Informação Geográfica para esquematizar a bacia hidrográfica, uma secção de introdução de dados e uma outra para visualizar os resultados da simulação (DELTARES, 2012).

O AQUATOOL foi desenvolvido pela Universidade Politécnica de Valência (ANDREU *et al.*, 1991), tem sido aplicado em vários estudos em todo mundo. É um modelo com um passo de cálculo mensal que visa, sobretudo, avaliar a capacidade de satisfação das necessidades de água de uma dada infraestrutura hidráulica. Segundo Simões e Oliveiras (2010), as necessidades de água podem variar de mês para mês, ao longo do ano, mas não de ano para ano, ao longo do período de simulação. O modelo não estima o eventual consumo ou produção de energia no sistema, nem simula processos de qualidade de água.

O número de modelos hidrológicos disponíveis é maior a tal ponto que se tornou uma tarefa difícil escolher um dentre eles quando se pretende fazer simulação. Os critérios para seleção de um modelo estão principalmente ligados à natureza do problema a ser avaliado, aos recursos disponíveis (dados, facilidades de computação) e a familiarização com o modelo. O *Water Evaluation And Planning System* (WEAP) desenvolvido pelo *Stockholm Environment Institute* (SEI) foi escolhido por ser considerado eficaz, fácil de usar, acessível (YATES *et al.*, 2005b) e transparente (JUÍZO; LÍDEN, 2010). Além disso, a estrutura de dados e o nível de

detalhes podem ser facilmente otimizados para atender aos requisitos de uma análise específica e para refletir os limites impostos em um ambiente de dados limitados (YATES *et al.*, 2005a).

2.4 O MODELO WEAP – WATER EVALUATION AND PLANNING SYSTEM

2.4.1 Descrição do modelo

O WEAP é um modelo semi-distribuído desenvolvido pelo *Stockholm Environment Institute* (SEI). Este modelo funciona utilizando o princípio básico de balanço de massa e que combina características de modelo hidrológico e de planificação, auxilia o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. O WEAP é classificado como *demand driven* e opera com um passo de cálculo mensal.

O WEAP é um sistema integrado de apoio à decisão que é capaz de simular a demanda e o suprimento de água para uma região específica sob hipóteses parametrizadas. O modelo combina fatores biofísicos que influenciam o escoamento de água, como o clima, a hidrologia de águas subterrâneas e a cobertura da terra com fatores socioeconômicos, como uso do solo, infraestrutura e prioridades de gestão de água (YATES *et al.*, 2005a).

De acordo com Le Roy (2005), o WEAP pode ser utilizado como modelo de chuvas ou utilizado como modelo de alocação de água para simular a demanda de água de um reservatório. Segundo CCG-UCC e SEI (2009) o modelo possui duas funções principais:

- simulação de processos hidrológicos naturais (por exemplo, evapotranspiração, escoamento superficial e infiltração) para permitir a avaliação da disponibilidade de água dentro de uma bacia hidrográfica;
- simulação de atividades antrópicas sobrepostas ao sistema natural para influenciar os recursos hídricos e sua alocação (ou seja, demandas de consumo consuntivo e não-consuntivo de água) para permitir a avaliação do impacto do uso de água.

2.4.2 O modelo de operação

O modelo apresenta uma estrutura com 5 componentes que organizam a especificação do sistema, a inserção dos dados e análise dos resultados em passos distintos. Os componentes são: mapa esquemático, dados, resultados, explorador de cenários e notas.

Na simulação do sistema, o utilizador deve começar por definir o mapa esquemático da área de estudo através da ferramenta de informação geográfica. O esquema do sistema a modular é efetuado através da utilização de elementos como, *transmissions links* [canais de transporte], *return flows* [fluxos de retorno], reservatório, locais de consumo, entre outros (CCG-UCC; SEI, 2009).

Criado o esquema do sistema de estudo, o utilizador acede à componente de gestão de dados para inserir a informação necessária à simulação do sistema, tais como reservatório, características da barragem, taxas de evaporação, taxas de infiltração, necessidades de água, entre outras.

Posto isto, estabelece-se o ano de referência com todos os dados necessários no sistema, definindo assim o cenário de referência. Em seguida é definido o período da simulação e lançados no modelo os cenários de desenvolvimento futuro, estabelecidos a partir do cenário de referência (YATES *et al.*, 2005a). Nesses cenários, podem ser introduzidos dados referentes a novos locais de consumo, crescimento populacional, mudanças nas regras de operação do reservatório ou novos reservatórios. Ainda na componente de gestão de dados define-se as políticas de operação para cada cenário.

O módulo para inserção de dados divide-se em cinco grupos: suprimento e recursos, hidrologia, qualidade de água e outros dados (CCG-UCC; SEI, 2009). Desses grupos destacam-se o suprimento onde se insere os dados relativos às necessidades dos pontos de consumo, e o recurso onde se define as aflúências do sistema e as características da barragem associada aos cursos de água. Esta organização permite um controle rápido entre os elementos e as suas relações.

2.4.3 Processo de simulação e respectivos algoritmos

O modelo permite calcular um balanço mensal de massa de água, para cada nó e *link* [canal]. Em seguida, são descritos detalhes de cada tipo de componente e alguns cálculos definidos pelo sistema de alocação e armazenamento de água no tempo.

2.4.3.1 Demanda mensal e anual dos locais de consumo

As necessidades de um ponto de consumo são calculadas pela soma das necessidades das ramificações no nível inferior deste ponto de consumo.

$$Demanda = \sum \text{Nível de atividade} \times \text{Taxa de utilização de água} \quad (2.1)$$

2.4.3.2 Afluência e efluência

As afluências e efluências são calculadas por balanços de massa em cada nó e canal após a contabilização dos consumos. Para CCG-UCC e SEI (2009) a utilização de um programa linear permite maximizar a satisfação dos requisitos pelos pontos de consumo, tendo sempre em conta as prioridades definidas.

A quantidade num ponto de consumo é, no máximo, igual à soma do escoamento dos canais de transporte associados.

$$\text{Ponto de consumo} = \sum \text{Canais de transporte Entrada} \quad (2.2)$$

Para o canal de transporte, o balanço é representado pela seguinte expressão:

$$\text{Canal Transporte Saída} = \text{Canal de transporte Entrada} - \text{Canal Transporte Perdas} \quad (2.3)$$

2.4.3.3 Avaliação do desempenho do sistema

Os indicadores de desempenho permitem avaliar a resistência e a sustentabilidade do sistema. O WEAP apresenta variados resultados, nos quais são apresentados a garantia mensal e anual, duração média de cada falha e resiliência para o sistema.

2.4.3.3.1 Garantia mensal e anual no local de consumo

A garantia mensal consiste na percentagem dos meses em que as necessidades dos locais de consumo são satisfeitas, ao longo do período da simulação (2.4). E a garantia anual é determinada pela expressão (2.5). Para Yates *et al.* (2005a) este parâmetro permite ter um nível de satisfação mais apropriado.

$$Garantia_{Mensal} = (n^{\circ} \text{ meses sem falha de distribuição} / n^{\circ} \text{ total de meses}) \times 100 \quad (2.4)$$

$$Garantia_{Anual} = (n^{\circ} \text{ anos sem falha de distrib} / n^{\circ} \text{ anos do período de simulação}) \times 100 \quad (2.5)$$

2.4.3.3.3 Garantia e cobertura de vazão ecológica

A garantia e cobertura de vazão ecológica são determinadas através das expressões (2.6 e 2.7) respectivamente.

$$\text{Garantia} = (n^\circ \text{ meses sem falha de distribuição} / n^\circ \text{ total de meses}) \times 100 \quad (2.6)$$

$$\text{Cobertura} = (\text{Volume fornecido} / \text{Necessidades de água}) \times 100 \quad (2.7)$$

2.4.3.3.4 Duração média de cada falha

Falha é o conjunto de meses consecutivos em que a distribuição não foi satisfeita, portanto, a duração média de cada falha é expressa por:

$$\text{Duração média de cada falha} = n^\circ \text{ de meses com falhas} / n^\circ \text{ de falhas} \quad (2.8)$$

2.4.3.3.4 Resiliência

A resiliência consiste na capacidade do sistema recuperar após uma falha e atender satisfatoriamente a demanda, é representada pela seguinte expressão:

$$\text{Resiliência} = (n^\circ \text{ de falhas com apenas um mês} / n^\circ \text{ de falhas}) \times 100 \quad (2.9)$$

2.4.4 Rios

O modelo WEAP permite conectar todos os rios da bacia, possibilitando a visualização do rio principal e seus tributários (YATES *et al.*, 2005a). Nessas conexões, podem ser medidas as vazões geradas em cada trecho. Segundo o mesmo autor, a vazão pode variar em um determinado trecho devido à influência de um rio tributário, de um local de demanda. Wurbs (2005) afirma que a variação, pode ser também influenciada pela operação do reservatório

2.4.5 Reservatório

O reservatório representa um objeto especial no modelo WEAP na medida em que pode ser configurado para armazenar água que se torna disponível a partir de uma série de fluxos de tempo definidos pelo utilizador. Com base na demanda de água para abastecimento, irrigação e indústria e no armazenamento de água do reservatório, o WEAP calcula a quantidade necessária de água para satisfazer as necessidades hídricas (YATES *et al.*, 2005a).

Os critérios de operação de um reservatório determinam a quantidade de água disponível na etapa de liberação atual para atender às exigências da demanda e vazão a jusante e requisitos de controle de inundação (YATES *et al.*, 2005a). Se a prioridade atribuída ao armazenamento de água em um reservatório for menor que as demandas a jusante ou vazão ecológica, o WEAP irá liberar apenas o armazenamento disponível que for necessário para atender aos requisitos de demanda e vazão ecológica, levando em consideração o fornecimento de outros reservatórios e captações em rios e outras fontes (YATES *et al.*, 2005a; CCG-UCC; SEI, 2009). O reservatório é estratificado de acordo com os volumes de armazenamento de água, geralmente são definidas quatro zonas de armazenamento de água, conforme mostrado na Figura 2.1.

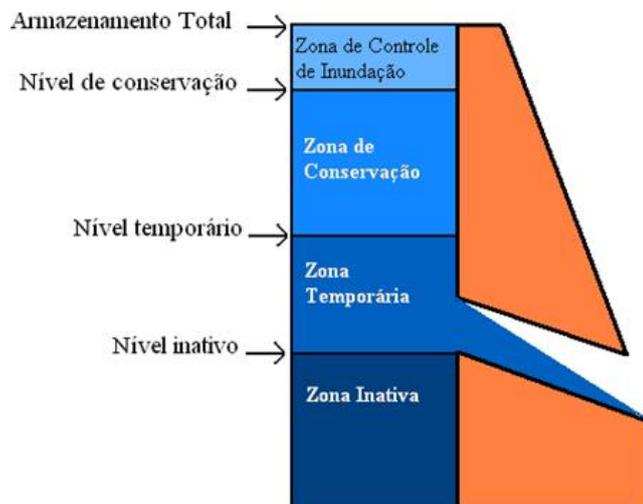


Figura 2. 1- Representação das zonas de operação do reservatório no WEAP

Sempre que o modelo registrar níveis na zona temporária, a simulação pode ser realizada com coeficiente da zona temporária (K_b) que diminui o envio de água para os pontos de consumo (YATES *et al.*, 2005a). Quando isto ocorre, o envio mensal não pode exceder o volume de água acumulada na zona temporária. O cálculo é feito através da equação 2.10.

$$ADD_{Res} = ZC_{Res} + ZT_{Res} + K_b \times ZI_{Res} \quad (2.10)$$

Onde:

ADD é o Armazenamento Disponível para Distribuição [m³];

ZC é o volume armazenado na Zona de Controle [m³];

ZT é o volume armazenado na Zona Temporária [m³];

ZI é o volume armazenado na Zona Inativa [m³].

Toda água da zona de conservação, ou acima é destinada para os pontos de consumo, sempre que for requerida. Quando o nível do reservatório entra na zona temporária, as distribuições para os locais de consumo começam a ser restritas devido ao coeficiente da zona temporária (K_b) (SEI, 2015).

2.4.6 Dados de entrada

O modelo necessita de uma série de dados que permitem a realização da simulação. Dentre os vários dados necessários para o modelo, são resumidos da seguinte forma:

- ano base para início dos cálculos;
- tempo estimado para realização dos cálculos;
- período para realização da simulação;
- pontos de consumo: abastecimento, irrigação, industrial e ecológico;
- recursos e requerimentos de água: ligação entre locais de consumo e reservatório, rios;
- reservatório: capacidade de armazenamento, taxa de evaporação, taxa de infiltração;
- volume mínimo, volume máximo, regime de operação mensal.

Os itens apresentados acima, representam dados principais a partir dos quais há um desdobramento de outras informações mais desagregadas que complementam as chaves e permitem que o programa tenha resultados satisfatórios. A Figura 2.2 mostra o esquema de entrada de dados no modelo WEAP.

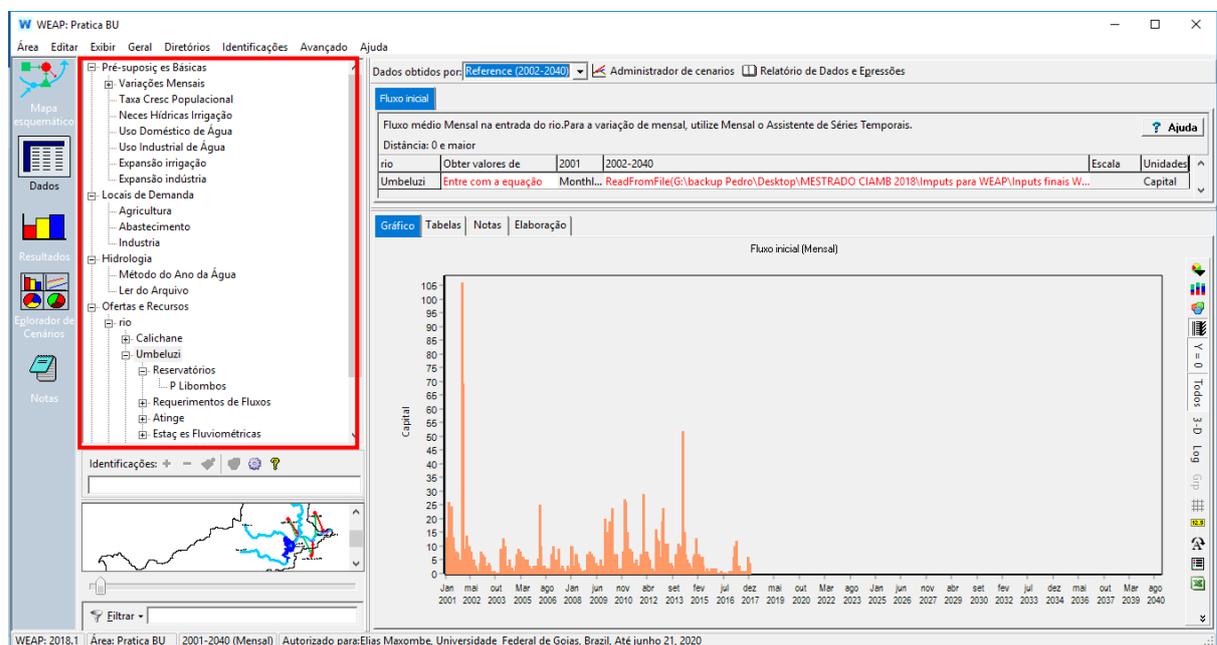


Figura 2.2- Esquema de entrada de dados no modelo WEAP

2.4.7 Calibração e validação do modelo

Normalmente, o modelo WEAP é aplicado configurando o sistema para simular um ano ou período de linha de referência para o qual a disponibilidade de água e as demandas podem ser determinadas com confiança (Arranz; McCartney, 2007), depois desta etapa, o modelo é usado para simular cenários alternativos.

Os procedimentos de calibração em modelagem, geralmente visam ajustar os dados simulados aos dados de fluxo observados nas estações de medição. A abordagem tradicional é calibrar um modelo em relação a valores medidos para um período específico e testar sua capacidade preditiva em outro período (MCCARTNEY *et al.*, 2004; YATES *et al.*, 2005a). Usando uma série histórica de vazão obtida em três estações de medição do leito principal, Leong e Lai (2017) calibraram o modelo com dados de seis anos. Segundo Yates *et al.* (2005a), na calibração do modelo é fundamental o uso de dados de série histórica longa onde possam aparecer períodos de inundações e de secas.

Uma validação é feita primeiramente comparando graficamente os valores modelados com os valores observados. Droogers *et al.* (2014), testaram o desempenho do modelo comparando a vazão de entrada e saída do reservatório e volume do reservatório dos Pequenos Libombos com a vazão de entrada e saída do reservatório e volume do reservatório de série histórica. Existe uma variada gama de técnicas estatísticas utilizadas, com a função de validação. Le Roy (2005) validou o modelo utilizando a função objetiva de mínimos quadrados e coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), Leong e Lai (2017) e Hassan *et al.* (2017) recorreram ao coeficiente de determinação, R^2 e eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) enquanto Droogers *et al.* (2014) e Adgolign *et al.* (2016) utilizaram o coeficiente de determinação, R^2 e o coeficiente de Pearson, R.

2.4.8 Regras de prioridade

No WEAP, todos os pontos de consumo recebem uma prioridade que varia de 1 a 99, sendo 1 a prioridade mais alta e 99 a mais baixa. As prioridades de consumo determinam a ordem que o modelo seguirá ao alocar a água, restringindo a alocação de água aos pontos de baixa prioridade quando a demanda de água não puder ser atendida (MCCARTNEY *et al.*, 2004; YATES *et al.*, 2005a).

O utilizador do modelo atribui as prioridades em função do objetivo do trabalho, Le Roy (2005), atribuiu prioridade alta às demandas próximas do reservatório e baixa prioridade

às demandas mais a jusante. Juízo e Liden (2010) definiram prioridades relativamente mais baixas para os usuários de Moçambique e do reservatório dos Pequenos Libombos, e mais altas para os usuários da Suazilândia e do reservatório de Mnjoli a montante. Enquanto Adgolign *et al.* (2016) definiram o mesmo valor de prioridade para todas as demandas, irrigação, abastecimento, hidroelétrica incluindo a vazão ecológica, reconhecendo o meio ambiente como um utente legítimo de água.

2.4.9 Desenvolvimento de cenários

A análise de cenários, é o principal método de projeções, não tenta mostrar uma imagem exata do futuro, porém, apresenta conscientemente vários desenvolvimentos futuros alternativos (ADGOLIGN *et al.*, 2016). A característica típica de análise de cenário é que pode modelar muitos problemas reais e que as decisões são baseadas em informações certas apresentadas como conjunto de possíveis resultados (WENG *et al.*, 2010). A maior parte dos cenários desenvolvidos na literatura tem como referência algum estudo de base sobre a bacia em causa. Juízo e Liden (2010) recorreram ao levantamento da SWECO e Associates (2005) como referência no rio Umbeluzi. Na sub-bacia de Didessa na Etiópia, Adgolign *et al.* (2016) utilizaram os dados do plano diretor do desenvolvimento da bacia.

Geralmente em projetos de planejamento e gestão dos recursos hídricos é inevitável o desenvolvimento de cenários. Cada utilizador do modelo, concebe os cenários em função dos objetivos do trabalho, e são desenvolvidos tendo em conta as condições ótimas, moderadas e péssimas ou numa escala espaço-temporal.

2.4.10 Resultados

O WEAP apresenta os resultados através de gráficos, tabelas e mapas esquemáticos que podem ser exportados para uma planilha do Microsoft Excel. O modelo apresenta os seguintes resultados da simulação:

a. Demanda: atendida, demanda não atendida, vazão atendida, local de entrada e saída do recurso, demandas de água, suprimento requerido, suprimento distribuído, demanda complementar, etc.

b. Entrada de dados: nível de atividade anual do uso de água, distribuição anual, gerenciamento de demanda, perdas, custos, etc.

c. Requerimentos e Recursos: vazão do rio, saída por tipo de recurso, afluxo por tipo de recurso, volume armazenado e elevação do reservatório, entrada e saída do reservatório, vazão nos canais de abastecimento, etc.

d. Qualidade da água: geração de poluição, carga de poluição, vazão poluidora de entrada e saída em plantas de tratamento, superfície de qualidade da água, etc.

A Figura 2.3 mostra como o WEAP pode apresentar os resultados, exibindo-os num gráfico ao longo do período analisado e num esquema na parte superior que mostra a visualização dos mesmos.

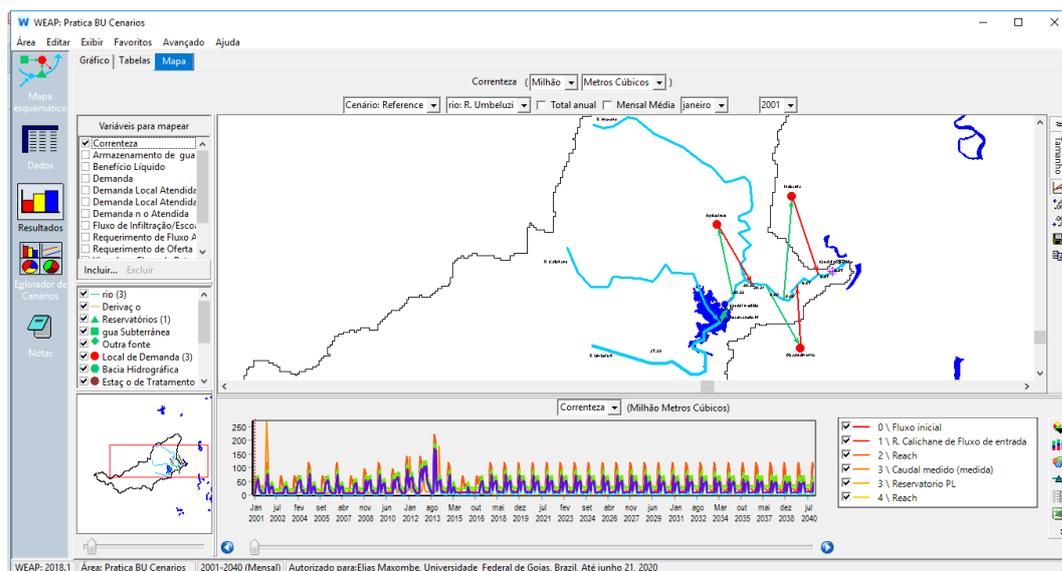


Figura 2.3- Tela de resultados exibidos no modelo WEAP

2.5 INSTRUMENTOS LEGAIS DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

2.5.1 Protocolo de partilha de cursos de água da SADC

O protocolo da SADC (*Southern African Development Community*) (2000) objetiva promover uma cooperação mais estreita para a gestão equilibrada, sustentável e coordenada, na proteção e utilização de cursos de água compartilhados. Para atingir este objetivo, o protocolo realça promover a harmonização e o monitoramento de legislação e políticas de planejamento, desenvolvimento, conservação, proteção de cursos de água compartilhados e alocação de seus recursos.

No que concerne aos dados, um dos princípios deste protocolo preconiza que os Estados membros deverão trocar informações e dados disponíveis sobre as condições hidrológicas, de qualidade da água, meteorológicas e ambientais dos cursos de água compartilhados. Droogers *et al.* (2014) enfrentaram dificuldades de acesso a dados hidrológicos, meteorológicos e ambientais sobre a bacia do rio Umbeluzi, na Suazilândia.

2.5.2 Instrumentos nacionais

A Lei de água (1991) concebe a descentralização da gestão dos recursos hídricos, cooperação institucional, participação pública na tomada de decisão, licenciamento no uso de água, princípio de poluidor pagador, o papel do setor privado no desenvolvimento dos recursos hídricos, cooperação internacional em rios compartilhados.

A Política Nacional de Águas, revista em 2016, preconiza em seus objetivos a redução da vulnerabilidade das cheias e secas através de uma coordenação e planejamento, uso de medidas estruturais e não estruturais em áreas ciclicamente afetadas.

Na componente planejamento e alocação dos recursos hídricos, a Estratégia Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (ENGRH) (2007) realça a necessidade de elaboração dos planos de bacias, nos quais os recursos hídricos e demandas previstas são avaliados, e medidas estruturais e não-estruturais são definidas, com vista a assegurar um adequado balanço entre a disponibilidade e a demanda, bem como permitir a mitigação dos efeitos das cheias e secas, a curto, médio e longo prazos.

Como estratégia, o ENGRH (2007) prioriza a necessidade de reconciliar a disponibilidade hídrica com a demanda atual e futura, particularmente nos rios da região sul, devido à sua situação de pressão, bem como a sua natureza transfronteiriça, onde o planejamento da bacia hidrográfica é urgente. A alocação de água para diferentes utentes deve-se basear numa utilização racional, equitativa e sustentável com prioridade para as necessidades básicas, mantendo ao mesmo tempo as reservas mínimas para a proteção dos ecossistemas associados.

CAPÍTULO III - A BACIA DO RIO UMBELUZI

3.1 Localização

Moçambique é um país situado na parte sul do continente africano, com uma área total de cerca de 800.000 km², no interior é limitado pela Tanzânia, Malawi, Zâmbia, Zimbabwe, Suazilândia e África do Sul, no lado leste pelo Oceano Índico. A BRU é uma bacia transfronteiriça, nasce na Suazilândia, onde tem dois principais afluentes, os rios M'buluzi Negro e M'buluzi Branco, e entra em Moçambique na fronteira de Goba (SWECO; ASSOCIATES, 2005). Apresenta a forma alongada como mostrado na Figura 3.1, a bacia é compartilhada por três países, Suazilândia, Moçambique e uma pequena porção pela África do Sul.

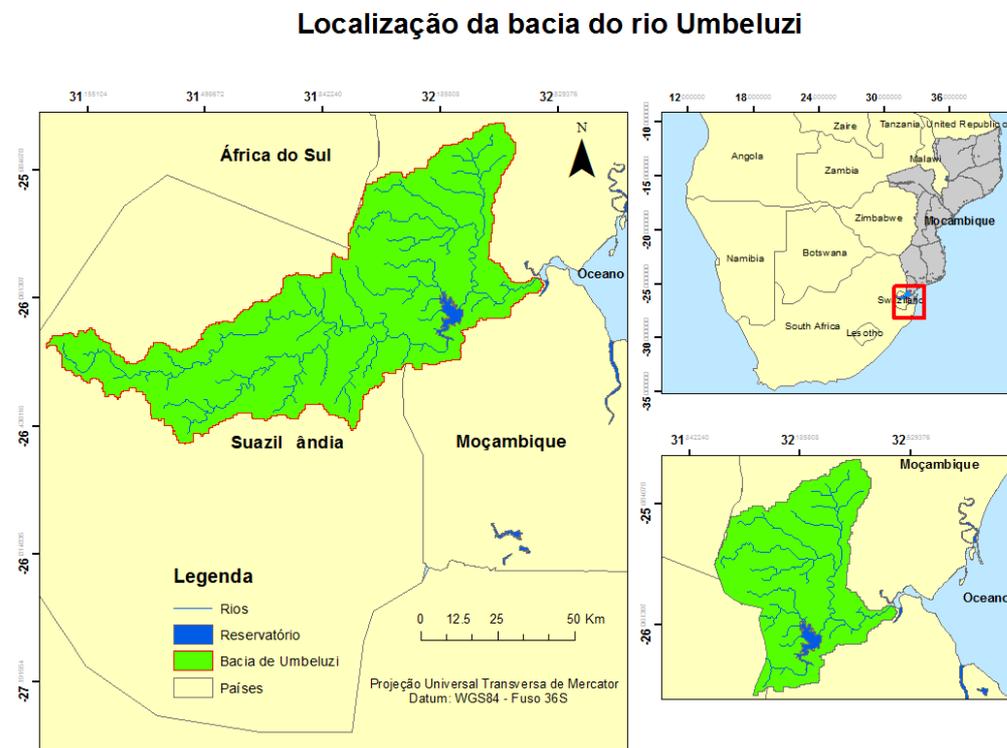


Figura 3.1- Localização da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi

A BRU localiza-se aproximadamente entre os paralelos 25° 40' 22" e 26° 16' 47" Sul e meridianos 31° 55' 43" e 32° 29' 01" Este (Figura 3.1). Situada na região denominada Libombos, próximo as capitais de Suazilândia e Moçambique, tem uma área de 5.600 km² dividida em três países (Tabela 3.1).

É considerada como bacia estratégica, pois é responsável pelo abastecimento de água a capital Mbabane na Suazilândia, a capital Maputo em Moçambique, e ainda as cidades de Matola e Boane.

Tabela 3.1 - Distribuição da área de drenagem da bacia

País	Área (km²)	Percentagem
África do Sul	80	1,5
Moçambique	2.380	42,5
Suazilândia	3.140	56,0
Total	5.600	100

Fonte: ARA-Sul (2014)

A parte moçambicana da bacia está localizada inteiramente na província de Maputo e os afluentes são o rio Calichane e o rio Movene, respectivamente a montante e a jusante do Reservatório dos Pequenos Libombos (RPL). A altitude aumenta do nível do mar para cerca de 2.000 metros na parte ocidental.

3.2 Uso do solo

A ocupação do solo é predominantemente constituída pela cana-de-açúcar, na Suazilândia que é responsável por 70% de consumo dos recursos hídricos na bacia (JUÍZO; LÍDEN, 2010). Em Moçambique, predominam as culturas de banana e citrinos, cujo consumo de água é de cerca de 17,5% dos recursos hídricos do baixo Umbeluzi.

3.3 Clima

Lopes (2011) classificou o clima da bacia como subúmido, com intensa variação do regime pluvial ao longo do ano. Esta bacia é caracterizada por duas estações distintas: a estação seca e fria, entre abril e setembro e a estação úmida e quente, entre outubro e março. Na área de estudo, segundo a classificação climática de Koppen, na parte sul do rio Umbeluzi, predomina o tipo seco de estepe (BS).

3.4 Precipitação

A precipitação média na bacia é de 840 mm/ano, variando de 600 mm/ano na zona costeira a 1500 mm/ano na região mais ocidental da bacia. No território moçambicano, a sua média anual é de 800 mm, variando de 600 mm na zona costeira a 1.000 mm na Cordilheira dos Libombos (ARA-Sul, 2014).

O regime das chuvas na BRU segue o comportamento das duas estações do ano. A estação úmida e quente, é a época de muitas chuvas, que chegam a representar cerca de 86,0% do total da precipitação anual. E a estação seca e fria, com cerca de 14,0% da precipitação média anual. As chuvas com maior intensidade são registadas na cordilheira dos Libombos e na região montanhosa entre Suazilândia e África do Sul, no extremo ocidental e, as de baixa intensidade, ao longo do rio e no flanco ocidental da cordilheira dos Libombos.

A umidade relativa média anual é de 80,5%, variando de 74,0%, em novembro a 86,0% em julho (LOPES, 2011). Segundo ARA-Sul (2010) o escoamento é de 11,24 m³/s medida a partir da estação de Goba.

3.5 Geomorfologia

A bacia do rio Umbeluzi apresenta, segundo Muchangos (1999) e Lopes (2011) formações geológicas do Cretáceo com representações de eras mais modernas na planície litorânea, onde formações pós-cretáceas estão cobertas por formações quaternárias representadas por dunas interiores e aluviões.

O relevo da bacia é caracterizado, em geral, por uma paisagem levemente ondulada e sem grandes diferenças de altitude. Na parte norte, leste e sudoeste apresenta uma paisagem com pequenas diferenças de nível, formando-se uma verdadeira planície. Segundo Lopes (2011), as regiões sul e oeste são marcados por uma variação gradual de altitudes atingindo cerca de 1.900 metros.

3.6 INFRAESTRUTURAS DE ARMAZENAMENTO

O rio Umbeluzi tem três reservatórios, dos quais dois na Suazilândia, o reservatório de Mnjoli, com capacidade total de 152 hm³, destinada à irrigação de cana-de-açúcar e o reservatório de Hawene, com capacidade de 2,75 hm³ que abastece água a capital Mbabane, e

em Moçambique, o reservatório dos Pequenos Libombos, com capacidade total de 391,52 hm³, destinada ao abastecimento de água à capital Maputo e as cidades de Matola e Boane. Este trabalho, dedica-se exclusivamente ao reservatório dos Pequenos Libombos em Moçambique (baixo Umbeluzi).

3.6.1 Descrição do reservatório dos Pequenos Libombos

O reservatório dos Pequenos Libombos é única infraestrutura de armazenamento com capacidade de regularização de vazões na área de estudo. Localiza-se no rio Umbeluzi, a cerca de 35 km a montante da cidade de Maputo (ARA-Sul, 2014).

Segundo ARA-Sul (2014), o reservatório foi construído com o principal objetivo de abastecimento de água à cidade de Maputo e outros secundários como: assegurar o amortecimento e encaixe de cheias; garantir o fornecimento de água para irrigação e indústria e produzir energia eléctrica. A infraestrutura está projetada para que o reservatório armazene 391,52 hm³ à cota de 47 m (Tabela 3.2), com uma superfície inundada de 40,7 km².

Tabela 3.2 - Cota x Área x Volume do reservatório dos Pequenos Libombos

Cota (m)	Área (km ²)	Volume (hm ³)
15	0	0
25	2,99	10,17
27,5	4,54	19,43
30	6,79	33,44
32,5	9,74	53,95
35	13,4	82,73
37	16,83	112,89
39	20,72	150,37
40	22,83	172,14
41	25,06	196,07
42	27,39	222,29
43	29,84	250,9
44	32,41	282,01
45	35,08	315,75
45,5	36,46	333,63
47	40,77	391,52

Fonte: ARA-Sul (2010)

A capacidade de armazenamento total do reservatório dos Pequenos Libombos é de 391,52 hm³, correspondendo a uma elevação do reservatório de 47 m. O armazenamento inicial em 01 de janeiro de 2005 foi de 325,26 hm³. O topo do armazenamento inativo corresponde a um volume de 10,17 hm³ e uma elevação do reservatório de 25 m. A curva de elevação de volume foi calculada para cada metro entre 25 metros e 47 metros. A curva Cota x Área x Volume do barramento é apresentada na tabela 3.2.

A equação utilizada pela ARA – Sul (2010) para calcular o volume do reservatório (V) da elevação do reservatório (h) é a seguinte:

$$V(h) = 0,018787 h^3 - 1,17037 h^2 + 26,284 h - 209 \quad (3.1)$$

3.7 DISPONIBILIDADE E DEMANDA DOS RECURSOS HÍDRICOS

3.7.1 Disponibilidade dos recursos hídricos

A área em estudo abrange sub-bacias de vários cursos de água no baixo Umbeluzi. As principais fontes de água são os principais rios que afluem desde a Suazilândia para dentro do território moçambicano, o rio Umbeluzi onde está o reservatório dos Pequenos Libombos, o rio Umbeluzi branco, e os rios Calichane e Movene que afluem a partir do território moçambicano.

Portanto, não há estimativas exatas sobre a disponibilidade de água dos rios que afluem no território moçambicano, nem das águas subterrâneas da bacia, devido a várias falhas de medição de fluxo no país (DROOGERS *et al.*, 2014). Em relação à água superficial, a água disponível, sob condições naturais, é estimada em 535 hm³/ano (SWECO; ASSOCIATES, 2005). Os mesmos autores afirmam que a parte moçambicana contribui com 117,7 hm³/ano, correspondentes a cerca de 22,0% da água disponível na bacia. Segundo Asante e Vilanculo (2009) a disponibilidade hídrica poderá ter uma queda de 60-70% devido ao crescimento da população.

De acordo com IPCC (2013) do Quinto Relatório de Avaliação para a África Austral, para padrões de temperatura e precipitação, os padrões de precipitação diminuirão em 10% e a temperatura aumentará 3 °C até 2100, considerando o RCP 6.0. Essas mudanças de temperatura e precipitação revelam necessidade urgente de adaptação no sentido de que o

aumento da temperatura causará mais evaporação, mais demanda por abastecimento de água urbano e outros usos na bacia.

Face a tendência de aumento da demanda e diminuição de disponibilidade hídrica no baixo Umbeluzi, existe proposta de construção do reservatório sobre o rio Movene, afluente do rio Umbeluzi a jusante do reservatório dos Pequenos Libombos. Estudando o desenvolvimento de operação eficaz do reservatório dos Pequenos Libombos, Levi *et al.* (2016) concluíram que a construção do reservatório de Movene poderá melhorar a capacidade de controle de enchentes na bacia e ao mesmo tempo aumentar os níveis de segurança no abastecimento de água para múltiplos usos.

3.7.2 Demanda dos recursos hídricos

A maior demanda de água em toda a bacia é a irrigação agrícola na Suazilândia, representando cerca de 70% da demanda da bacia (SWECO; ASSOCIATES, 2005). Para estes autores a demanda total estimada de água superficial em 2005 foi de 350 hm³/ano, mas prevê-se que aumente 67% para 586 hm³/ano até 2025. Este aumento pode estar relacionado ao crescimento da população, ao aumento de consumo *per capita* de água, expansão industrial (ASANTE; VILANCULO, 2009) e expansão das áreas irrigadas.

Na parte moçambicana as demandas caracterizam-se por serem majoritariamente para o abastecimento doméstico e, em segundo plano, fica o atendimento a irrigação e a indústria. O abastecimento doméstico da bacia atende as cidades Maputo e Matola e distrito de Boane cuja população é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - População observada entre 1997 e 2007

	Maputo	Matola	Boane	Total
População	1.084.636	516.734	92.461	1.693.831
Taxa de crescimento	1,2	2,1	2,6	...

Fonte: INE (2007)

A maior demanda de água é o abastecimento doméstico (Tabela 3.4) tendo em conta o número de habitantes. Observa-se o aumento da demanda de água em Moçambique, tendo passado de 97 hm³ em 2005 para cerca de 138 hm³ em 2014 (ARA-Sul, 2014). O uso *per capita* de água em Moçambique foi estimado em 2001, em cerca de 46 m³/pessoa/ano (AEP, 2014) valor usado neste estudo.

Tabela 3.4 - Demanda anual de água no baixo Umbeluzi - Moçambique (2005) (hm³)

Setor da demanda	Volume (hm³)	Percentagem
Abastecimento	75	77,3
Irrigação	17	17,6
Indústria	1,5	1,6
Ecologia	3,5	3,5
Total	97	100

Fonte: SWECO; ASSOCIATES (2005)

A Tabela 3.5 apresenta os pontos de consumo de água nos vários campos agrícolas no baixo Umbeluzi.

Tabela 3.5 - Taxa de uso e demanda de água para irrigação

Local de demanda	Taxa do uso da água	Demanda anual da água
A montante do reservatório	(m³/ha/ano)	(Hm³/ano)
Beluzi Bananas	8.714	4,36
Tropical frutos	8.714	3,05
Frutas Libombos	8.714	6,1
Nova Sun	8.714	4,36
Mafavuca Entreprise, Lda	11.619	1,74
Outras farmas a montante	13.071	2,61
A jusante do reservatório		
Citrum Olsa Citrus	8.714	1,31
Citrum 1 de maio	8.714	1,31
Rio Verde, Bloco 3 e 4	8.714	2,61
A.R. Mafuiane	8.714	1,41
A.R. Massaca	8.714	1,24
Outras farmas a jusante	8.714	2,18

Fonte: ARA-Sul (2010)

Todos os usuários de água para irrigação agrícola a montante dos Pequenos Libombos captam sua água diretamente do reservatório dos Pequenos Libombos, com exceção de pequenos campos agrícolas. Esses captam sua água no rio Umbeluzi em algum lugar a montante do reservatório dos Pequenos Libombos. Todos os locais de consumo a jusante captam sua água diretamente do rio Umbeluzi (DROOGERS *et al.*, 2014; ARA-Sul, 2016).

As vazões ecológicas apesar de não serem locais de consumo de água propriamente dita, precisam ser incorporadas na modelagem de alocação dos recursos hídricos. A quantificação da reserva ecológica para os rios envolve a determinação da quantidade de água e dos requisitos de qualidade que garantirão sua sustentação em um período pré-determinado (ADGOLIGN *et al.*, 2016).

De acordo com o manual operacional do reservatório (ARA-Sul, 2010), a partir de 2010, foi implementada a vazão ecológica na saída de Umbeluzi. A vazão mensal para fins ecológicos corresponde a 15,0% da média das entradas mensais para o reservatório dos Pequenos Libombos. Tendo resultado na seguinte vazão mínima ecológica por mês (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Requisitos de vazão mínima ecológica

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
m ³ /s	1,06	0,87	1,68	0,86	0,49	0,45	0,46	0,48	0,38	0,35	1,04	1,04
hm ³ /mês	2,80	2,10	4,50	2,20	1,30	1,20	1,20	1,30	1,00	0,90	2,70	2,80

Fonte: ARA-Sul (2010)

CAPÍTULO IV – METODOLOGIA

O trabalho consistiu nos seguintes procedimentos metodológicos: I – Obtenção e análise da base de dados; II – Desenvolvimento de cenários; III – Aplicação do modelo no sistema hídrico; e IV – Discussão dos resultados. Para o alcance dos objetivos propostos neste trabalho, a Figura 4.1 mostra os processos metodológicos adotados.

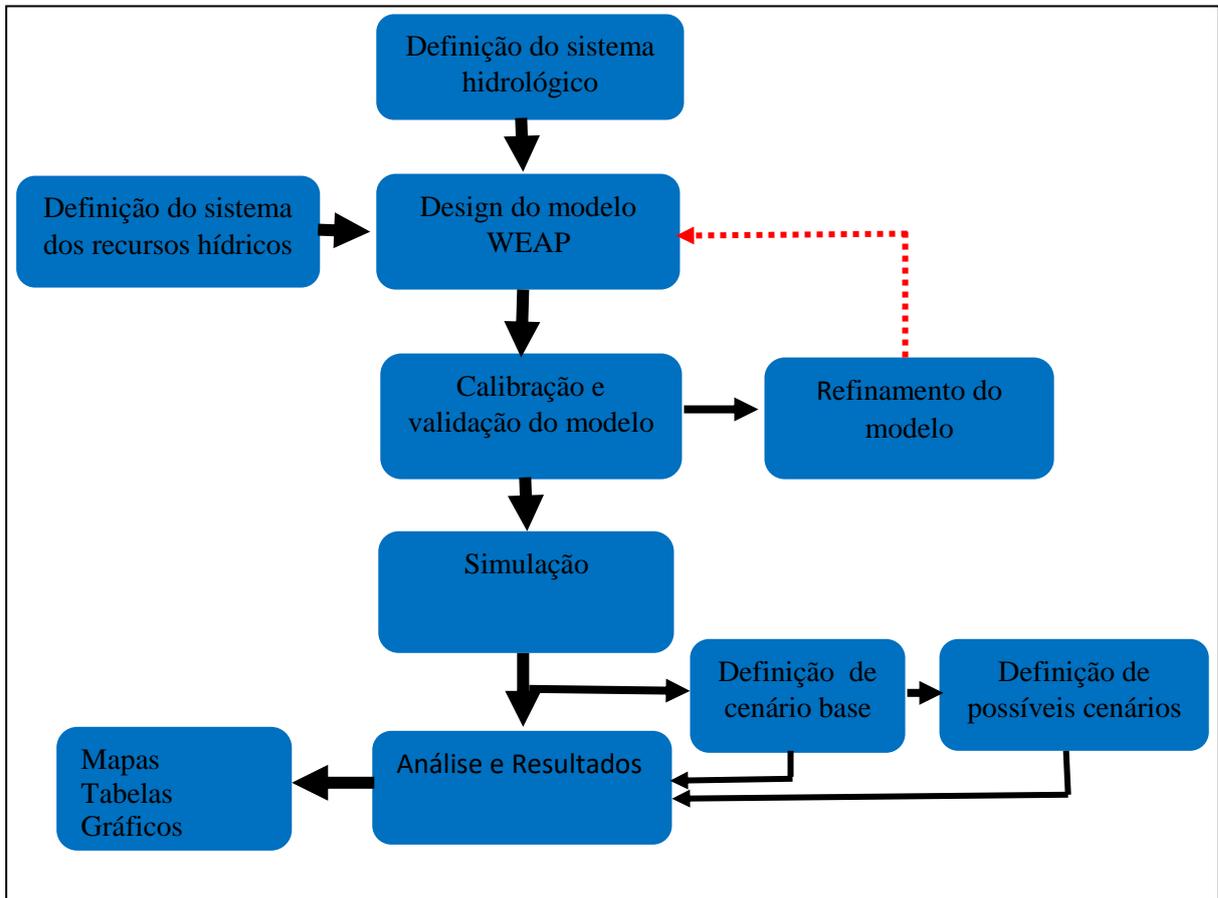


Figura 4.1 - Fluxograma do modelo WEAP adotado

4.1 OBTENÇÃO E ANÁLISE DA BASE DE DADOS

Nesta etapa do trabalho diferentes dados e informações foram solicitados junto às seguintes instituições: ARA-Sul; Direção Nacional de Recursos hídricos (DNRH) e Unidade de Gestão da Bacia de Umbeluzi (UGBU).

- na ARA-Sul e DNRH foi possível obter dados descritivos sobre a bacia de Umbeluzi; séries históricas de dados pluviométricos e fluviométricos diários com as respectivas

coordenadas dos postos de medição; dados sobre as características físicas e do balanço hídrico da barragem dos Pequenos Libombos e do reservatório sobre o rio Movene.

- na UGBU dados sobre os usuários da bacia de Umbeluzi e suas atuais demandas de água; projeções futuras de uso dos recursos hídricos; consumo per capita de água na bacia.

4.2 DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS

4.2.1 Cenários hidrológicos

O módulo de dados do WEAP disponibiliza o *Water Year Method* para gerar uma série de afluências no sistema quando não existem dados observados. Os anos hidrológicos são caracterizados por uma percentagem de precipitação em relação à média. De acordo com esse pressuposto, um ano considerado de precipitação normal apresenta coeficiente 1 e para definir os outros coeficientes basta retirar ou adicionar a diferença de precipitação que cai anualmente (CCG-UCC; SEI, 2009).

Cenário Hidrológico Muito Seco

Este cenário é aquele onde os índices de precipitação são inferiores à média anual. Na bacia do rio Umbeluzi, o período muito seco foi observado em 2016, quando foram registrados 387 mm anuais. O valor precipitado corresponde a 48,3% da média, por isso, no módulo do *Water Year Method* é usado o valor de 0,48.

Cenário Hidrológico Seco

É quando se regista pouca precipitação e conseqüentemente o escoamento para o reservatório também é menor, o que resulta no volume armazenado menor. Períodos secos são comuns em toda a bacia, em 2008 foi registrada uma precipitação de 614,7 mm, que corresponde a 76,7% da precipitação média, permitindo usar o peso de 0,77 no modelo.

Cenário Hidrológico Normal

O cenário hidrológico normal é aquele onde as condições hidrológicas apresentam-se de forma similar as condições climáticas da região, sendo representado pela precipitação média, que neste caso é de 800 mm, por isso, no modelo tem coeficiente 1,0.

Cenário Hidrológico Chuvoso

Trata-se de um cenário positivo, quando a precipitação está ligeiramente acima da média, caracterizado por maior escoamento para o reservatório que resulta geralmente em volumes elevados. Em 2004 foi registrada uma precipitação média de 1.239,2 mm, significando 54,9% mais que a média, a sua representação no modelo é de 1,55.

Cenário Hidrológico Muito Chuvoso

Este cenário apresenta valores de precipitação muito superiores à média. Os anos muito chuvosos não são comuns, caracterizam-se geralmente por maior escoamento que pode originar vertimento de barragens e pode resultar em inundações. Em 2000 foi registrada uma precipitação média de 2.047 mm, correspondendo a 255,9%, foi um ano extremamente húmido, por isso, foi usado o coeficiente 2,0 para o modelo.

4.2.2 Cenários de impacto e adaptação

O modelo WEAP faz análise do sistema hídrico no atendimento das atuais e futuras demandas de água, através da simulação de cenários. Para o alcance dos objetivos do trabalho, foram testados um cenário de Referência, três cenários de impacto e uma medida de adaptação combinada visando principalmente três demandas (i) abastecimento urbano, (ii) irrigação e (iii) indústria. O desenvolvimento de cenários teve como base, o ano de 2005.

Na componente de gestão de dados é possível realizar a gestão de cenários. Cada cenário é definido pelo período de simulação, por um conjunto de aflúências e por um conjunto de necessidades. Esses cenários mostram diferentes mudanças socioeconômicas sob o pressuposto de desenvolvimento da região.

Cenário de Referência: Avaliação da situação de referência (2005-2040)

O cenário de referência foi modelado e projetado nas condições de 2005. O tamanho e as taxas de crescimento populacional foram obtidos no Instituto Nacional de Estatística (INE). O reservatório foi considerado como tendo volume inicial de 325,26 hm³, referente ao mês de

janeiro de 2005 ano do início da simulação. Salientar que a vazão ecológica é constante para todos os cenários. Este cenário, levou em consideração os seguintes pressupostos:

- demanda de todos os usuários, incluindo vazão ecológica;
- população local e urbana agrupada em um nó de demanda de abastecimento;
- todas as áreas de irrigação agrícola agrupadas em um nó de demanda de irrigação;
- todas as indústrias agrupadas em um nó de demanda industrial;
- capacidade de armazenamento do reservatório dos Pequenos Libombos;
- crescimento populacional (1,3% por ano);
- aumento da área de irrigação (0,1% por ano); e
- aumento de indústrias (0,8% por ano).

Cenário I: Menor crescimento (2018-2040)

Este cenário reproduz as menores taxas de crescimento de todos os setores na região.

- crescimento populacional (1,4% por ano);
- aumento da área de irrigação (0,2% por ano); e
- aumento indústrias (1,2% por ano).

Cenário II: Médio Crescimento (2018-2040)

Trata-se de um cenário médio em termos de taxas utilizadas para a simulação.

- crescimento populacional (1,6%);
- aumento da área para irrigação (0,3% por ano); e
- aumento de indústrias (1,8% por ano).

Cenário III: Maior crescimento (2018 – 2040)

Representa as maiores taxas projetadas em todos os setores na região.

- crescimento populacional de (2,0% por ano);
- aumento da área para irrigação (0,6% por ano); e
- aumento de indústrias (2,5% por ano).

Medida de adaptação (2030 – 2040)

A medida de adaptação visa testar o grau de oferta de água e da demanda não atendida.

- prioridade 1 para abastecimento e vazão ecológica;

- prioridades 2 e 3 para indústria e irrigação, respectivamente; e
- implantação do reservatório sobre o rio Moveve.

As projeções utilizadas nos cenários foram obtidas na ARA-Sul, Direção Nacional de Recursos Hídricos, Unidade de Gestão da Bacia de Umbeluzi, Águas da Região de Maputo e do Instituto Nacional de Estatística.

Neste estudo, toda a demanda doméstica foi agrupada num único nó de demanda, acontecendo o mesmo com as áreas de irrigação e indústrias conforme estratégia adotada por Omar e Moussa (2016) no estudo sobre o rio Nilo e Droogers *et al.* (2014) nos consumos de abastecimento e indústria.

Para realizar as análises das afluências ao reservatório, foram necessárias futuras condições hidrológicas. Para isso, as condições hidrológicas observadas de 1986 a 2016 foram utilizadas para o futuro, selecionando para cada ano no futuro um ano aleatório no passado. Para isso, recorreu-se a distribuição empírica discreta e aplicando o método transformação inversa.

Para gerar uma variável aleatória que tenha um comportamento semelhante ao determinado por distribuição empírica discreta conhecida, é necessário que, inicialmente, se determine as frequências relativas acumuladas da distribuição. Uma vez que tais informações estejam disponíveis, aplica-se o método da transformação inversa. Os procedimentos de busca são facilitados pela construção de tabela de entrada e saída.

4.3 TENDÊNCIA HIDROLÓGICA PASSADA

Para avaliar o processo da mudança hidrológica na bacia foi analisada a tendência de precipitação anual do posto (P-425) e de vazão média anual da estação (E-10) (Figuras 4.2 e 4.3) dos últimos 49 anos (1968 – 2016) para a sub-bacia a montante do reservatório dos Pequenos Libombos (na fronteira com a Suazilândia).

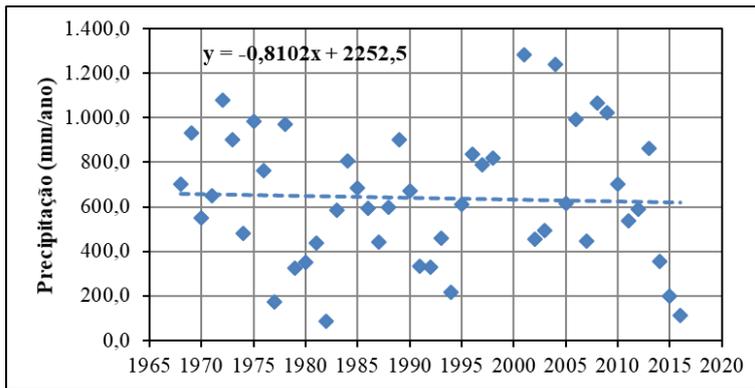


Figura 4.2- Precipitação anual

O ano 2000 foi extremamente úmido, por isso foi adotada a média histórica na análise tanto na precipitação como na vazão. A partir da visualização da Figura 4.2, nota-se uma ligeira tendência negativa na precipitação como mostrado pela reta de tendência.

Para confirmação dos resultados obtidos na análise exploratória de dados, foi adotada a abordagem estatística no software Trend considerando os níveis de significância 5% e 1%. Feita a confirmação dos resultados obtidos da análise exploratória de dados, com os resultados de testes estatísticos obtidos no Trend, considerando os dados de precipitação anual, verificou-se a não existência significativa de tendência como mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Teste de tendência de precipitação total anual

Teste estatístico	Valores críticos tabelados			Resultados
	Teste	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	
Mann-Kendall	-0,353	1,96	2,576	NS
Linear regression	-0,28	2,013	2,687	NS

Observa-se na Tabela 4.1 que todos os testes apresentaram a não significância estatística, não demonstrando, no entanto, nenhuma tendência histórica de maior variabilidade. Portanto, a não existência significativa de tendência obtida pelo Trend pode estar associada aos picos máxima de chuva que ocasionam a ocorrência de tendência crescente no período chuvoso e ocorrência de tendência decrescente associado aos valores mínimos no período seco.

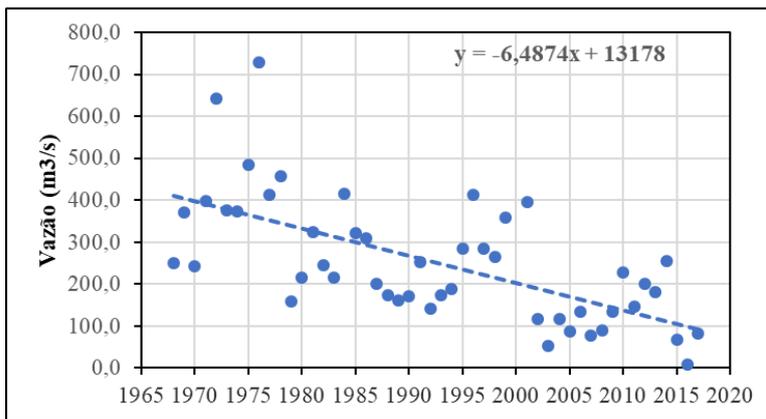


Figura 4.3 - Vazão média anual

Os dados de vazão média anual referentes à mesma sub-bacia dos dados de precipitação, apresentam uma tendência decrescente tanto na análise exploratória de dados (Figura 4.2), assim, como nos testes estatísticos obtidos pelo Trend ilustrados na Tabela 4.2. A existência significativa de tendência foi verificada nos níveis de significância de 5,0 e 1,0%.

Tabela 4.2 - Teste de tendência de vazão média anual

Teste estatístico	Valores críticos tabelados			Resultados
	Teste	$\alpha=0,05$	$\alpha=0,01$	
Mann-Kendall	-4,433	1,96	2,576	S (0,01)
Linear regression	-2,426	2,012	2,685	S (0,05)

A tendência negativa de vazão pode estar associada a maior retenção de água nos reservatórios a montante (Suazilândia) para uso no abastecimento e irrigação ou ainda devido a mudança do uso de solo. Não se sabe se esta tendência decrescente de vazão é semelhante para toda a bacia de Umbeluzi. No entanto, uma análise completa de mudança hidrológica está fora do escopo deste estudo. Se a tendência de vazão descendente for semelhante para toda a bacia e se esta tendência continuar, poderão ser esperadas condições significativamente mais secas no futuro no baixo Umbeluzi.

4.4 SELEÇÃO DE INDICADORES DE DESEMPENHO

Os indicadores são utilizados para quantificar e resumir os resultados obtidos durante o processo de simulação. Para Mitchell (2004), indicadores podem ser definidos como ferramentas para obtenção de informações sobre uma dada realidade, possuindo a

característica principal de sintetizar as informações considerando apenas significados essenciais dos vários aspectos analisados. Portanto, foram selecionados os seguintes indicadores de desempenho:

- a) Garantia mensal e anual: para o volume do reservatório dos Pequenos Libombos foi assumido um volume de 82,73 hm³ correspondendo a uma cota de 35 metros, representando 21,1% da capacidade total de armazenamento. Este volume foi escolhido como valor limiar para avaliar a situação de disponibilidade de água, sempre que o reservatório estiver acima dessa cota não haverá qualquer restrição no fornecimento de água. No que concerne a vazão ecológica, a exigência de fluxo ecológico na saída do reservatório é diferente para cada mês. A média ao longo do ano é de 1 m³/s. Este foi escolhido como valor mínimo para avaliar a magnitude de fluxo de saída.
- b) Duração média de cada falha: que é o conjunto de meses em que o fornecimento de água não foi satisfeito.
- c) Resiliência: é a capacidade do sistema recuperar após uma falha e atender satisfatoriamente a demanda.

A magnitude desses indicadores de desempenho permite identificar os problemas prioritários do sistema, portanto, a base para o diagnóstico integrado da bacia e a definição de estratégias para o planejamento e gestão do sistema (NADAL *et al.*, 2017).

4.5 APLICAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O WEAP para análise do sistema hídrico, precisa de entrada de vários parâmetros que devem ser fornecidos a todos os elementos que compõem a rede de fluxo do sistema em causa. Estabelecidos os cenários de crescimento de demanda, as condições de volume inicial do reservatório e os cenários hidrológicas, aplicou-se o modelo para simulação de impactos no balanço hídrico do sistema.

O modelo permite definir alguns nós como reservatórios atribuindo-lhes capacidade de armazenamento de água e controle de descargas para satisfação de algum ponto de consumo ou vazão ecológica. Além dos dados apresentados no capítulo 3, referentes à bacia hidrográfica, reservatório e cota-área-volume, foram fornecidos dados de evaporação mensal.

A entrada de dados da demanda de água no modelo, assume-se não haver variação mensal da demanda de água para os setores doméstico e industrial. Acredita-se também que

os fluxos de retorno para todos locais de consumo são de 10,0%. A estrutura de modelagem para este estudo inclui a estimativa de demanda e alocação de água para atender os consumos de diferentes usuários.

Foi adotado o passo de tempo mensal considerada por Hipólito e Vaz (2017) adequada para fazer a descrição considerando a variabilidade intra-anual quer da disponibilidade de água quer da procura.

A definição de prioridades é efetuada através da atribuição de um valor entre 1 (mais prioritário) e 99 (menos prioritário), aos vários pontos de consumo, necessidades ecológicas e reservatório. Este estudo seguiu as regras de operação adotadas pela UGBU e ARA – Sul na distribuição de água, por isso, todos os locais de consumo, incluindo a vazão ecológica foi assumida a prioridade 1. Foi ainda adotado para todos os cenários a prioridade de 99 para o reservatório.

As condições hidrológicas observadas, utilizadas na calibração e validação do modelo, foram obtidas na ARA-Sul, para o período de 2005 a 2017 (Tabela 4.3) e tiveram como base a precipitação anual.

Tabela 4.3 - Condições hidrológicas observadas (2005-2017)

Ano	C. hidrológicos	Ano	C. hidrológicos	Ano	C. hidrológicos
2005	Normal	2010	Seco	2014	Normal
2006	Normal	2011	Normal	2015	Muito seco
2007	Muito seco	2012	Normal	2016	Muito seco
2008	Seco	2013	Chuvoso	2017	Seco
2009	Normal				

Fonte: ARA-Sul (2016)

4.5.1 Esquema do modelo de simulação

O reservatório dos Pequenos Libombos é esquematizado por um nó do reservatório (triângulo verde na Figura 4.4) descrito com detalhes na seção (3.6.1). Os tributários dos Pequenos Libombos são representados por dois nós de fluxo (linhas azuis e pontos). Os fluxos de retorno são esboçados por linhas e setas vermelhas. Os locais de consumo são estruturados por três nós de demanda e canais de transporte (pontos vermelhos e setas verdes, respectivamente) discutidos na seção (3.7.2). Para além disso, foi incorporado ainda um nó de exigência de vazão ecológica e um nó de medição de vazão de saída do reservatório (pontos cor de vinho e azul, respectivamente) referenciado na seção (3.7.2).

A Figura 4.4 mostra uma das características do modelo WEAP utilizado que é a possibilidade de edição e visualização do sistema dos recursos hídricos através da localização geográfica.

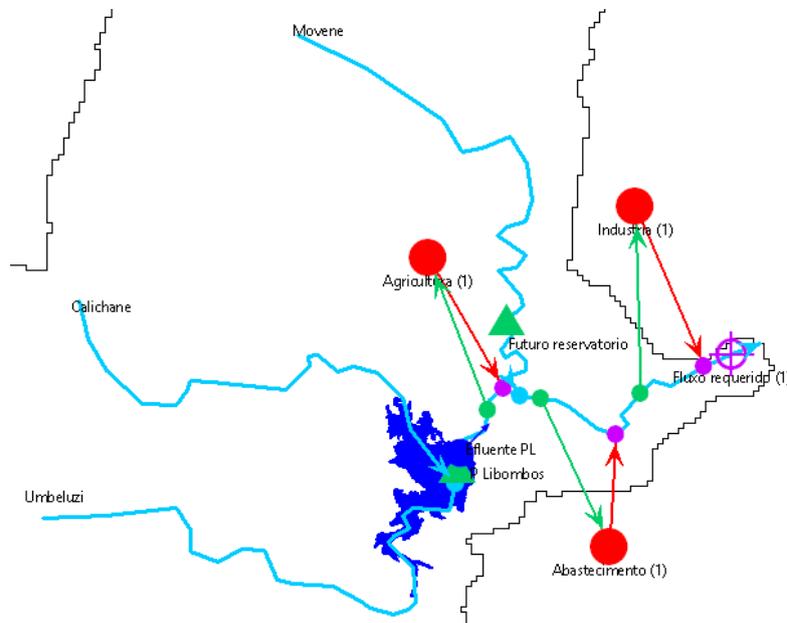


Figura 4.4 - Características de modelo de alocação de água adotado na simulação

4.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo visa obter um conjunto de parâmetros hidrológicos e operações que permitissem ter uma representação de fluxos e operações de reservatório que se assemelhassem aos dados históricos da maneira mais próxima possível (SEI, 2015). Para isso, na calibração de operação do reservatório comparou-se o volume e vazão mensal do reservatório observados versus simulados como sugerido por (METOBWA *et al.*, 2018).

Crítérios de calibração

- Calibração utilizando cerca de 40,0% da série de dados, o que permite que a restante da série seja utilizada na validação do modelo para o caso do volume. A calibração de vazão utilizando um ano, tanto para calibração assim como para validação.
- O coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) não deve ser menor que 0,65. Este coeficiente se define como:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - Q_{o,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (4.1)$$

Onde:

$Q_{o,i}$ = vazão simulada

$Q_{s,i}$ = vazão observada

\bar{Q}_o = vazão média observada no período analisado (LEONG; LAI., 2017).

- Bias (desvio relativo): quanto menor a percentagem de Bias, melhor correspondência entre os dados observados e simulados. Um Bias positivo indica superestimação e negativo subestimação. O Bias deve estar entre -5% e 5% e se define segundo CCG-UCC e SEI (2009) como:

$$Bias = 100 * [(\bar{Q}_s - \bar{Q}_o) / \bar{Q}_o] \quad (4.2)$$

Onde:

\bar{Q}_s = vazão média simulada

\bar{Q}_o = vazão média observada

4.7 LIMITAÇÕES

Embora tenha-se alcançado os objetivos propostos para este estudo, os resultados foram sujeitos à algumas incertezas e simplificações, como forma de reduzir e/ou melhorar as limitações relacionadas com as lacunas de dados utilizados e indisponibilidade de outras informações necessárias para o desenvolvimento da pesquisa.

A falta de dados sobre as dimensões dos canais de transporte de água para os locais de consumo impossibilitou estimar claramente o volume de água transportado.

A falta de dados de perda de água por infiltração durante o transporte para todos os locais de consumo, condicionou a análise de perdas de água. Todas as demandas hídricas estimadas incluem implicitamente as perdas de água nos canais de transporte.

As simplificações feitas para determinação de demandas hídricas para abastecimento devido a indisponibilidade de dados desagregados de consumo de água, impossibilitaram a análise mais precisa nesse setor.

O fato de se ter agrupado as três cidades num único nó de demanda trouxe resultados genéricos para o abastecimento e não explicitando em qual das cidades se verifica maior demanda de água ou maior cobertura de suas necessidades. O mesmo acontece para irrigação e indústria. Porém, isso não tira a validade dos resultados sobre a demanda de água e cobertura de necessidades de água de cada local de demanda como um todo.

Neste estudo não foi tomada em consideração a redução do volume útil em função da produção de sedimentos na barragem.

Ciente das limitações enfrentadas, os métodos e as simplificações adotadas permitiram a obtenção e avaliação dos objetivos do trabalho.

CAPÍTULO V – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta dissertação são avaliados quatro cenários estudados: i) o cenário de Referência; ii) o cenário Menor Crescimento; iii) o cenário Médio Crescimento; iv) o cenário Maior Crescimento; e medida de adaptação que examina a implantação do reservatório de Movene e o efeito da mudança de prioridade dos locais de consumo.

5.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Para a calibração foram utilizados os parâmetros de volume do reservatório e vazão média mensal do rio Umbeluzi a jusante do reservatório.

A calibração do modelo pode ser observada pelos gráficos de confrontação entre os volumes e vazões observadas e simuladas. Em geral, como se pode ver na Figura 5.1 os volumes simulados pelo WEAP não se ajustam aos volumes observados. O modelo apresentou problemas para simular os meses com volumes mais baixos, por exemplo, o mês de maio de 2016. Os testes estatísticos mostram que o modelo superestima em 16,0% o volume do reservatório (Tabela 5.1).

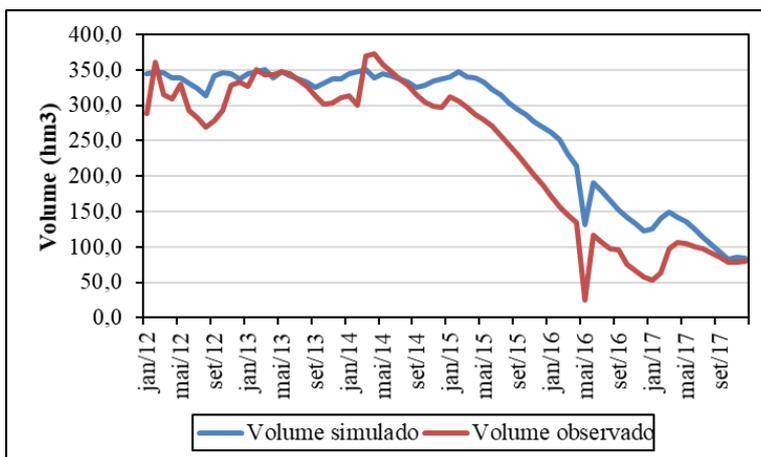


Figura 5.1 - Volume observado e simulado no reservatório dos Pequenos Libombos

À semelhança do que aconteceu com o volume, na Figura 5.2 a curva de série de vazões médias mensais simuladas se ajusta a série de vazões observadas em grande parte do ano, mas apresenta problemas para simular o mês em que a vazão mensal é alta. Isso fez com que o modelo apresentasse uma subestimação de -5,0% como se pode observar na Tabela 5.1.

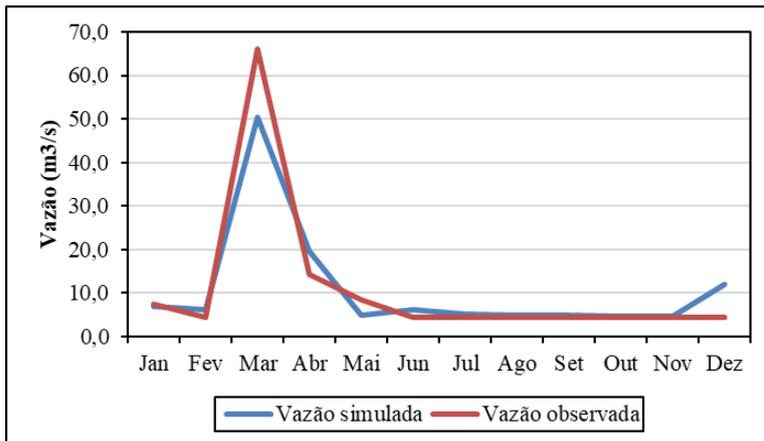


Figura 5.2 - Vazão média mensal observada e simulada (2014)

Para validação do modelo utilizou-se a série de volumes mensais do período 2005-2011 do reservatório dos Pequenos Libombos, tal como se vê na Figura 5.3 os resultados de ajuste de volumes. A Tabela 5.1 mostra que o modelo simula bem o comportamento de volumes do reservatório apresentando o NSE igual a 0,89 e Bias de 2,0%, este último significa ligeira superestimação do modelo. A literatura recomenda $NSE > 0,5$ e $Bias < 5$ para considerar o modelo satisfatório (CCG-UCC; SEI, 2009; Droogers *et al.*, 2014).

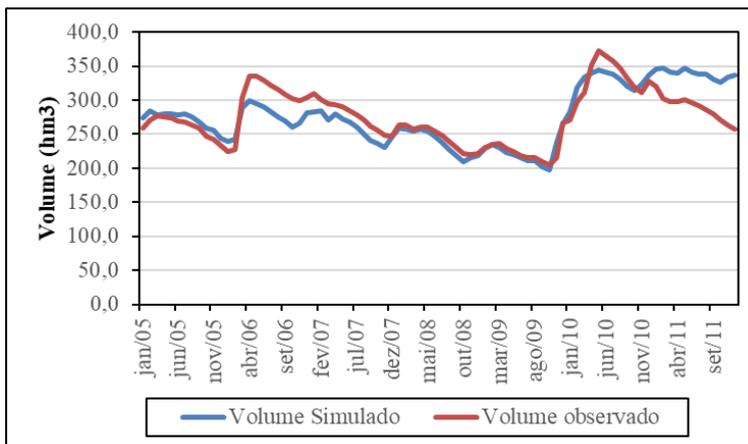


Figura 5.3- Volume observado e simulado do reservatório dos Pequenos Libombos

Tabela 5.1 - Funções objetivas de parâmetros observados e simulados

Parâmetros	Calibração		Validação	
	Bias (%)	NSE	Bias (%)	NSE
Volume do reservatório	16,0	0,76	2,0	0,89
Vazão média mensal	-5,0	0,82	2,9	0,91

Na validação da vazão média mensal utilizou-se os dados do ano 2005, cujos resultados de ajuste são apresentados na Figura 5.4. O modelo simula bem mostrando que consegue gerar o regime da bacia do baixo Umbeluzi como demonstrado pelas funções objetivas (Tabela 5.1).

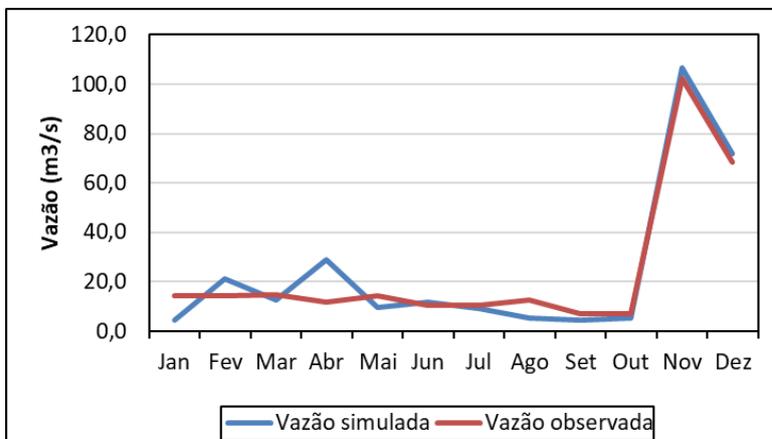


Figura 5.4 - Vazão média mensal observada e simulada (2005)

5.2 CRESCIMENTO DA POPULAÇÃO

A simulação do cenário de Referência permitiu validar o modelo e corrigir um conjunto de erros existentes nos primeiros ensaios do modelo. Após aplicar as regras de prioridade indicadas acima e correções nos dados de entrada o programa apresentou resultados válidos como mostra a Tabela 5.1. Este cenário foi testado com principal objetivo de conhecer e avaliar o nível de satisfação de demandas atual e futura para abastecimento doméstico, irrigação agrícola, industrial, bem como as necessidades hídricas para a manutenção de vazão ecológica no baixo Umbeluzi. Na simulação, considerou-se as necessidades médias mensais de cada setor; capacidade e regime operacional atuais do reservatório dos Pequenos Libombos. A partir dessa linha de base, todos os outros cenários foram criados.

A população total (Maputo, Matola e Boane) estimada pelo modelo para o ano 2017 é de 1.751.478 no cenário de Referência (Figura 5.5). Comparado com os dados do Instituto Nacional de Estatística (INE), referentes ao censo 2017, verifica-se que os resultados do modelo estão próximos da realidade, apesar da sua subestimação. Os resultados do INE (2019) apresentam 1.907.316 habitantes.

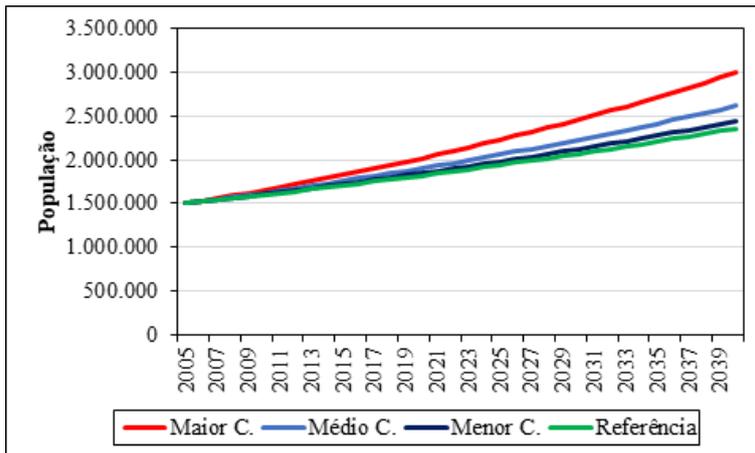


Figura 5.5 - Crescimento da população no baixo Umbeluzi

A população projetada para 2040 é de 2.440.168 e 2.614.394 para os cenários Menor Crescimento e Médio Crescimento. A Figura 5.5 mostra a projeção do crescimento da população nos quatro cenários simulados. O cenário Maior Crescimento apresenta uma população projetada de 2.999.834 em 2040, quase o dobro do ano base (2005) e maior que todos os outros cenários, enquanto o cenário de Referência apresenta o menor valor estimado (2.357.338) no mesmo ano.

5.3 AUMENTO DA ÁREA DE IRRIGAÇÃO

A área irrigada são locais de consumo de água para o desenvolvimento de culturas com necessidades hídricas diferentes e praticadas sob diversos métodos do uso de água. As necessidades crescentes de produzir mais alimentos implicam de alguma forma o aumento da área de irrigação e introdução de métodos de rega mais eficientes. Portanto, é uma das variáveis equacionadas no planejamento dos recursos hídricos da bacia.

A área irrigada foi estimada em 2.535 ha em 2014 para o cenário de Referência. Quando comparados os valores observados na Figura 5.6 com os dados da área de irrigação da ARA - Sul, no ano 2014, verifica-se que o modelo subestimou. Segundo ARA-Sul (2014) foi registrada uma área de irrigação de 3.430 ha, e, de acordo com o modelo esse número de hectares ainda não foi atingido.

A área irrigada projetada para os cenários de Referência e Maior Crescimento, em 2040, é de 4.817,6 ha e 8.010,6 ha, respectivamente, muito superior da área potencial de 3.500 ha.

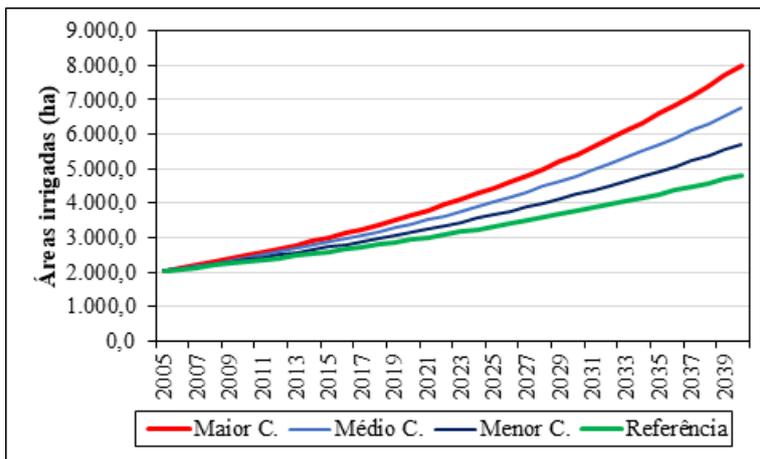


Figura 5.6 - Aumento de área de irrigação (ha)

5.5 DEMANDA DE ÁGUA

5.5.1 Demanda de água para abastecimento doméstico

As estimativas da demanda hídrica no WEAP podem ser desenvolvidas a partir de informação desagregada de locais de consumo, quando os dados disponíveis forem específicos, como por exemplo quantidade de água utilizada para cozinha, banheiro; ou ainda através de informação agregada, quando os dados são unificados, como por exemplo consumo por cidade ou vila. Portanto, devido à falta de dados desagregados na área de estudo, adotou-se a abordagem agregada para realização da simulação. A demanda hídrica projetada no setor de abastecimento se refere à demanda das cidades de Maputo, Matola e Boane. As estimativas da demanda para abastecimento foram feitas com base nos parâmetros de número de habitantes, crescimento populacional, consumo *per capita*, demanda unitária anual e consumo anual.

Em relação a demanda de água em 2014, o modelo estimou em cerca de 93,0 hm³ para o cenário de Referência (Figura 5.7). Comparado com o valor (91,0 hm³) registrados pela ARA-Sul (2014), nota-se a superestimação do modelo.

As projeções de SWECO e Associates (2005) indicam uma demanda de água de 182 hm³ em 2025, no presente estudo o cenário Maior Crescimento apresenta maior de 156 hm³. O cenário Maior Crescimento atinge 184 hm³ em 2030, enquanto o cenário de Referência só em 2037.

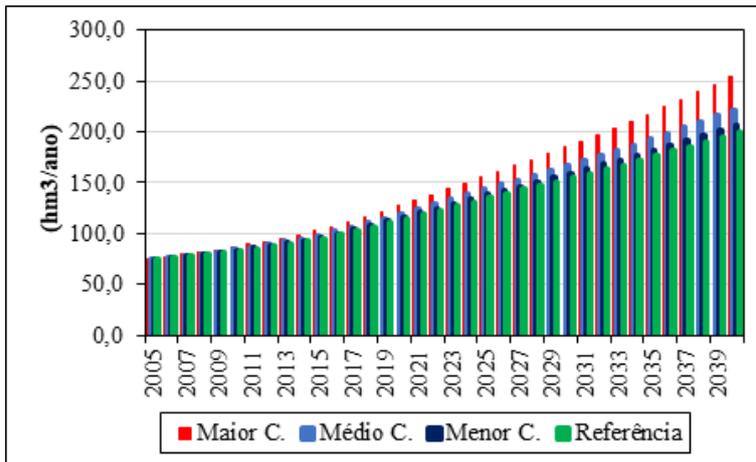


Figura 5.7 - Demanda de água para abastecimento doméstico (hm³)

Os centros urbanos continuarão a demandar mais água, por exemplo, em 2040 a demanda para abastecimento doméstico é de 255 hm³ muito superior à demanda da irrigação agrícola (67,2 hm³) para o cenário Maior Crescimento.

5.5.2 Demanda de água para irrigação

Neste trabalho adotou-se a variação mensal do consumo de água para irrigação, que se refere a forma como a água é distribuída ao longo do ano dentro de vários campos agrícolas. O WEAP considera como efeito temporário de consumo dos recursos hídricos na irrigação na irrigação. Os valores da variação mensal apresentados na Figura 5.8 mostram que há maior concentração da irrigação no inverno por se tratar de época seca e no verão a concentração é baixa. A concentração baixa da irrigação no verão pode ser justificada pela ocorrência frequente de precipitação.

O período de novembro a março de cada ano, nesses meses normalmente há chuva e o reservatório encontra-se numa fase de recuperação de reservas, portanto, as necessidades para irrigação são mínimas. O período de abril a outubro, geralmente não há chuva e o reservatório está a usar a água previamente armazenada até o próximo ciclo de chuva, por isso, a irrigação é maior. Importa ressaltar que esta variação mensal foi utilizada para todos os cenários simulados.

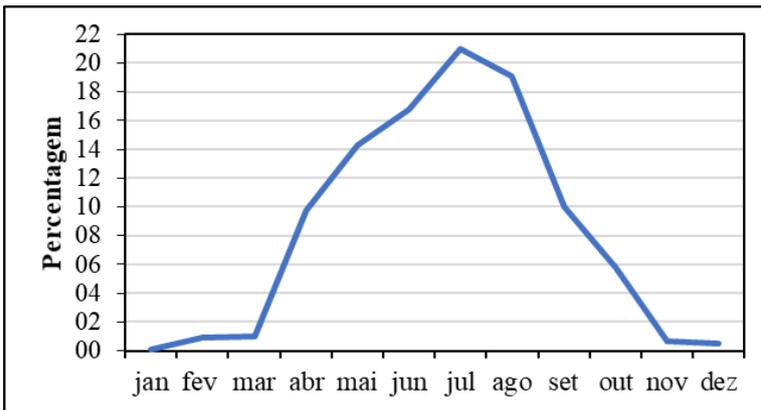


Figura 5.8 - Distribuição de consumo de água na irrigação

Os valores utilizados para gerar a Figura 5.8, estão apresentados na Tabela 5.2, e foram obtidos no estudo da SWECO e Associates.

Tabela 5.2 - Distribuição de consumo mensal de água na irrigação (porcentagem)

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Soma
Irrigação	0,07	0,9	1,0	9,78	14,31	16,8	21,0	19,1	10,0	5,83	0,67	0,54	100

Fonte: SWECO; Associates (2005)

As previsões da demanda para irrigação levaram em conta os parâmetros de área irrigada, demanda anual de água por hectare, variação mensal de uso de água e consumo anual. A demanda de água de vários campos agrícolas ao longo da bacia foi agrupada num único nó para estimar a demanda total dentro da bacia.

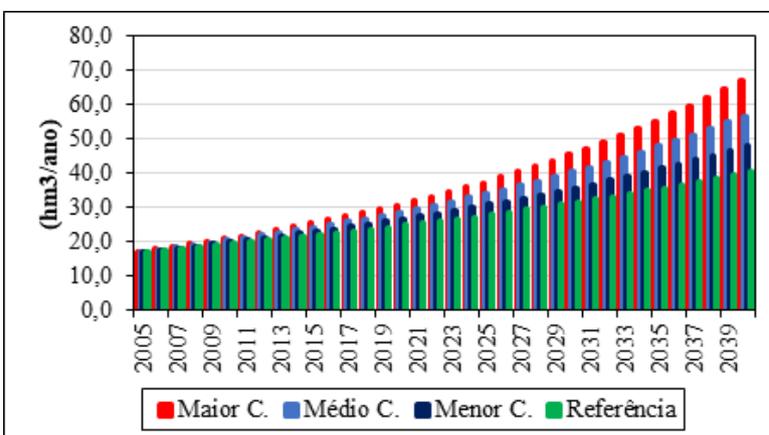


Figura 5.9 - Demanda de água para irrigação (hm³)

O modelo estimou uma demanda de 21,3 hm³ no ano 2014, comparado com o valor de 22,9 hm³ registrado pela ARA-Sul (2014), verifica-se a subestimação do modelo. Prevê-se uma demanda de 27,9 hm³ e 37,2 hm³ para os cenários de Referência e Maior Crescimento,

respectivamente (Figura 5.9) em 2025. O valor do cenário Maior Crescimento está próximo da demanda de 39 hm³ estimada pela SWECO e Associates (2005) para o ano 2025.

A área potencial para irrigação é atingida em 2028 com uma demanda de água de 30,1 hm³ no cenário de Referência. Se a área irrigada não ultrapassar a área potencial significa que a água do reservatório dos Pequenos Libombos será destinada a outros usos, especialmente ao abastecimento doméstico.

5.5.3 Demanda de água para indústria

As projeções da demanda industrial tiveram como base no número total de indústrias, demanda anual por indústria e consumo anual. Portanto, a demanda hídrica foi estimada no horizonte de 36 anos, que representa o período que vai de 2005 a 2040 (Figura 5.10).

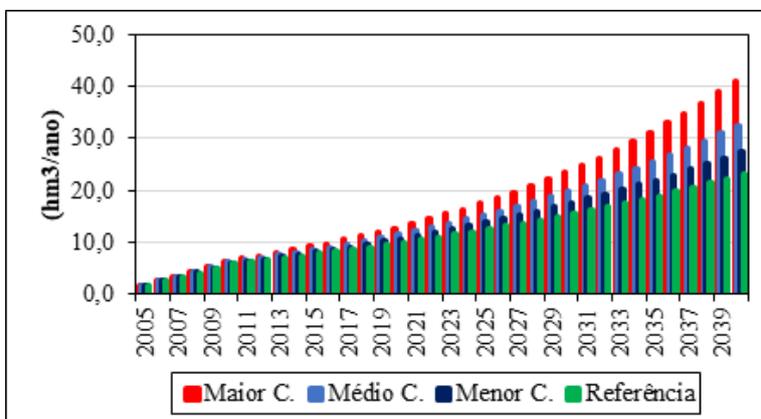


Figura 5.10 - Demanda industrial de água (hm³)

Prevê-se demanda de 12,5 hm³ e 17,4 hm³ para os cenários de Referência e Maior Crescimento, respectivamente, em 2025. O estudo da SWECO e Associates (2005) não faz distinção da projeção da demanda industrial e ecologia. Portanto, não há condições de comparação com os resultados daquele estudo.

Espera-se que em 2040 a demanda esteja em torno de 23,1 hm³ no cenário de Referência, valor superior ao do ano de referência (1,6 hm³). E uma demanda de 41,2 hm³ para o cenário Maior Crescimento, no mesmo ano, quase o dobro do valor do cenário de Referência.

5.5.4 Demanda total de água

Duma forma geral, a demanda total aumenta progressivamente como resultado do aumento populacional, área irrigada e industrial. A demanda de água projetada para o ano 2025 no cenário de Referência é de 176,3 hm³. O valor mais próximo da demanda estimada por SWECO e Associates (2005) de 252 hm³ em 2025 é encontrado no cenário Maior Crescimento no valor de 210,7 hm³. O valor de 252 hm³ espera ser atingido em 2039 e 2030 para os cenários de Referência e Maior Crescimento, respectivamente, ou seja, 14 e 5 anos mais tarde.

A demanda de água projetada se eleva a um máximo de 263,9 hm³ em 2040 comparada à demanda inferior existente de 93,6 hm³ (Figura 5.11), que é quase o triplo da demanda do ano de referência (2005) no cenário de Referência.

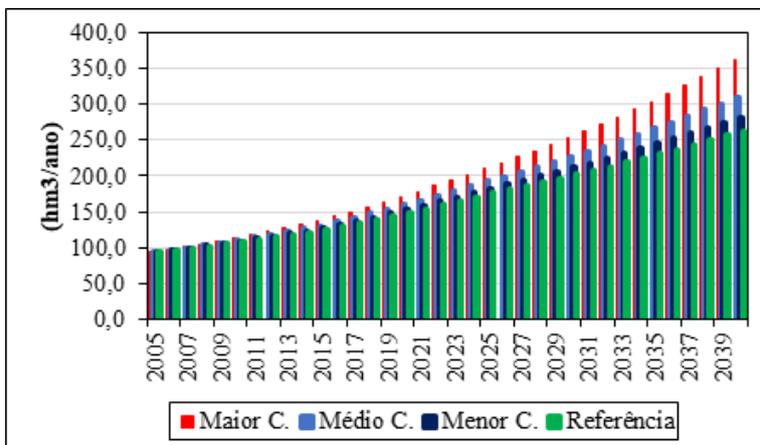


Figura 5.11 - Demanda total anual de água (hm³)

Como resultado do aumento menor dos locais de consumo, a demanda de água para o cenário Menor Crescimento é estimada em 282,8 hm³, um incremento de 7,2% se comparado com o cenário anterior. No cenário Médio Crescimento foi projetada a demanda de 311,5 hm³ em 2040, um aumento de 18% em relação ao cenário de Referência.

A demanda total de água no cenário Maior Crescimento foi projetada em 363,4 hm³ em 2040, muito superior ao valor de água disponível de 117,7 hm³. Isso sugere a necessidade de redirecionar as estratégias de gestão de água no lado da demanda. A disponibilidade hídrica limitada é o principal desafio enfrentado pelo sistema dos recursos hídricos no sul de Moçambique. Do lado da demanda, existem muitos desafios por superar como altas perdas de água na rede de distribuição e fraca conscientização pública no setor de água.

A demanda média anual de cada setor nos 23 anos (2018-2040) da simulação é apresentada na Tabela 5.3. O abastecimento doméstico é o maior consumidor de água, apresentando ligeira diminuição de 76,6% no cenário de Referência para 72,5% no cenário

Maior Crescimento. Portanto, não se espera nenhuma alteração substancial da percentagem do uso da água nos diferentes setores.

Tabela 5.3 - Média anual da demanda de água por setor (2018-2040)

Setor da demanda	Maior Cresc.		Médio Cresc.		Menor Cresc.		Referência	
	hm ³	%						
Abastecimento	181,2	72,5	164,0	73,4	156,0	74,8	152,2	76,6
Irrigação	45,2	18,1	39,9	17,8	35,3	16,9	31,2	15,7
Indústria	23,6	9,4	19,7	8,8	17,4	8,3	15,3	7,7

5.6. DEMANDA DE ÁGUA NÃO ATENDIDA

Não se espera por condições hidrológicas muito favoráveis no futuro por isso nem todas as necessidades de água futuras poderão ser satisfeitas ao longo do período de estudo em função dos pressupostos assumidos.

5.6.1 Demanda anual não atendida no abastecimento doméstico

Para o setor doméstico a demanda não atendida começou em agosto de 2015 para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento, um ano mais cedo que os cenários de Referência e Menor Crescimento (Figura 5.12). A projeção da demanda não atendida é de 33,6 hm³ e 57,3 hm³ em 2040 para os cenários de Referência e Maior Crescimento, respectivamente.

A baixa cobertura de necessidades de água a partir de 2015 se deve em parte ao fato de a irrigação agrícola se encontrar à montante do setor doméstico. E no desenho do modelo tanto a irrigação assim como o abastecimento doméstico no baixo Umbeluzi foi atribuído a prioridade 1, por isso, o modelo aloca água simultaneamente aos dois setores. O fato de se ter considerado o fluxo de retorno de 10% na irrigação pode também estar associado a baixa cobertura no setor doméstico, pois a captação de água de abastecimento doméstico é feita a jusante do setor de irrigação.

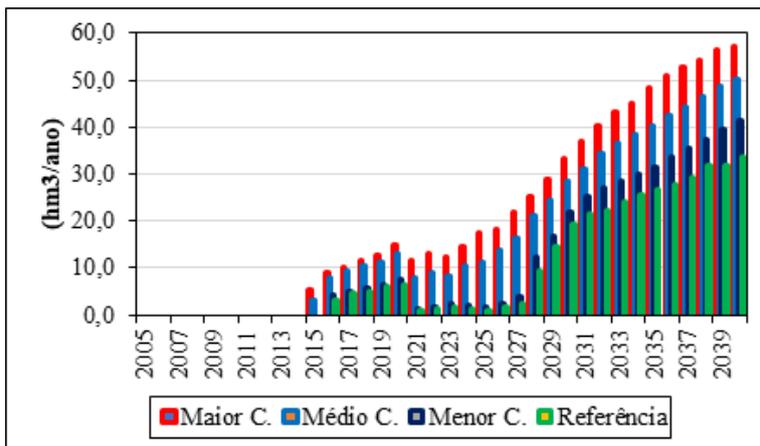


Figura 5.12 - Demanda anual não atendida para abastecimento doméstico (hm³)

A Figura 5.12 mostra crescimento da demanda não atendida, apresentando variações em função de anos previstos como chuvoso e muito chuvoso que reduzem a quantidade de água não atendida. A escassez de água para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento acontece 11 anos mais cedo se comparado ao cenário de crescimento da população no trabalho de Droogers *et al.* (2014). A cobertura das necessidades mostra níveis muito baixos do que é aceitável para o abastecimento urbano.

A escassez de água no baixo Umbeluzi pode não ser muito grave até ao ano de 2022. No entanto, a partir de 2024, a situação muda completamente, especialmente para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento, a escassez pode ser muito alta.

Para minimizar a escassez de água é preciso apostar na gestão como por exemplo redução de perdas para cerca de 25%, valor máximo recomendado pelo Banco Mundial e educação ambiental voltada ao uso eficiente de água de modo que as pessoas entendam qual é a gestão adequada e o valor da água e de outros recursos naturais numa perspectiva de médio a longo prazos.

5.6.2 Demanda anual não atendida na irrigação

A demanda não atendida na irrigação começa dois meses mais cedo que a demanda não coberta no abastecimento doméstico, no mesmo ano de 2015 para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento, e no ano 2016 nos cenários de Referência e Menor Crescimento (Figura 5.13). A demanda não atendida para o ano 2040 é estimada em 12,9 hm³ e 22,0 hm³ para os cenários de Referência e Maior Crescimento, respectivamente, apresentando variações significativas ao longo do período da simulação, em resultados de vazões afluentes originadas pelos cenários hidrológicos previstos.

A área potencial de rega pode ser atingida em 2027 e 2019 para os cenários de Referência e Maior Crescimento. Não havendo mais concessões da área irrigada, poderá reduzir substancialmente o valor da demanda não atendida. E é provável que isso venha a acontecer se considerar a pressão dos recursos hídricos por parte da agricultura.

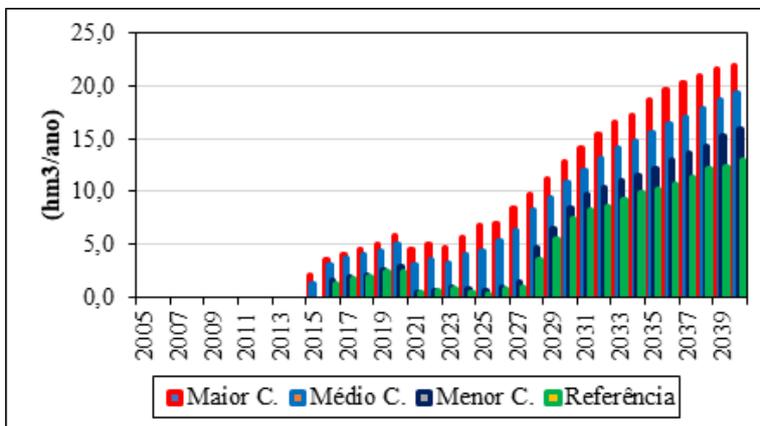


Figura 5.13 - Demanda anual não atendida para irrigação (hm³)

É preciso considerar que a simulação manteve constante o valor médio do uso de água na irrigação (8.391 m³/ha/ano). Assumindo que maior parte da irrigação é feita por gravidade e por aspersão responsáveis por eficiência de rega de 30 e 75%, respectivamente, em Moçambique. Portanto, é necessário que se adote várias medidas de redução desse valor, através do melhoramento da rega por gravidade e o incentivo da rega por gotejamento, este último com uma eficiência de 90% quando bem feita.

5.6.3 Demanda anual não atendida na indústria

A indústria é o setor onde as necessidades de água são satisfeitas na maior parte do período da simulação. A demanda não atendida no cenário Maior Crescimento começa em setembro de 2033, sete anos mais cedo que o cenário Menor Crescimento (2039).

A estimativa aponta para demanda não atendida de 3,5 hm³ e 7,4 hm³, para os cenários Menor Crescimento e Maior Crescimento, respectivamente, em 2040 (Figura 5.14). O cenário de Referência não apresenta nenhum *déficit* ao longo do período de simulação. O fato desse setor apresentar menor demanda de água pode estar na origem de satisfação de suas necessidades na maior parte do período simulado.

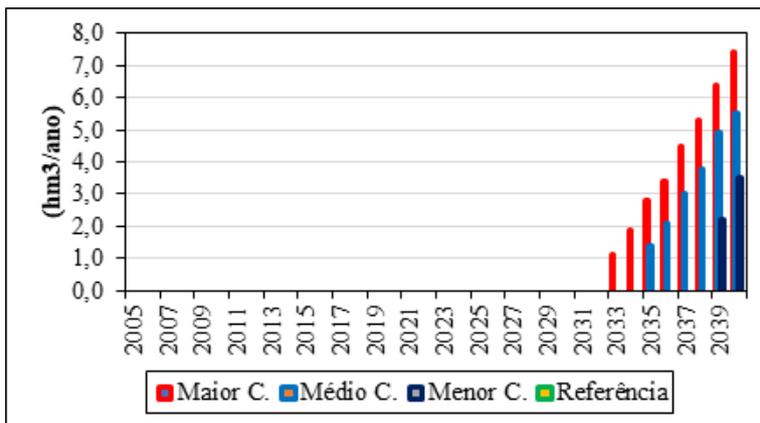


Figura 5.14 - Demanda anual não atendida na indústria (hm³)

5.6.4 Demanda total anual não atendida

A Figura 5.15 mostra a projeção da demanda total anual não atendida com base nos quatro cenários. O cenário Maior Crescimento apresenta maior demanda não atendida (88,1 hm³) em 2040 em resposta a taxas mais elevadas do aumento dos locais de consumo, enquanto o cenário de Referência a demanda não coberta é estimado em 51,7 hm³.

Observa-se variação da demanda de água não atendida ao longo do período da simulação, nos anos previstos como chuvosos e muito chuvosos a demanda não atendida tende a ser menor.

A Figura 5.15 mostra que a escassez de água começou em 2015 para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento, cinco anos mais cedo se considerar o cenário provável no estudo de Droogers *et al.* (2014). Portanto, os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento levam a grande escassez de água, por exemplo, em 2019, a demanda não atendida foi estimada em 17,5 hm³ e 19,7 hm³, respectivamente. A demanda não atendida para o cenário de Referência começou em janeiro de 2016, com um valor de 4,9 hm³.

A análise das diferentes demandas anuais não atendidas na irrigação e abastecimento doméstico indicam que a demanda não atendida aumentou em todos os cenários como resultado da expansão de terras agrícolas irrigadas e do aumento populacional. Verifica-se que o nível de satisfação diminuiu para os grandes usuários (abastecimento doméstico e irrigação) corroborando com os resultados obtidos por Juízo e Liden (2010). As diferenças nos níveis de satisfação para usuários específicos de água encontradas neste estudo provavelmente dependem das diferentes quantidades demandadas por cada setor. A variação da demanda não atendida é atribuída a variabilidade sazonal e interanual da precipitação assim como da vazão.

O abastecimento doméstico no baixo Umbeluzi está comprometido se comprovar o aumento da área de irrigação e mantidos os atuais valores do uso da água por hectare na agricultura e o crescimento da população. Isso implica que com as taxas de médio e alto crescimento da população e da área irrigada que mostram um impacto significativo na demanda de água em uma perspectiva de curto e médio prazos e reflete a necessidade de desenho de planos de gerenciamento de água do lado da demanda.

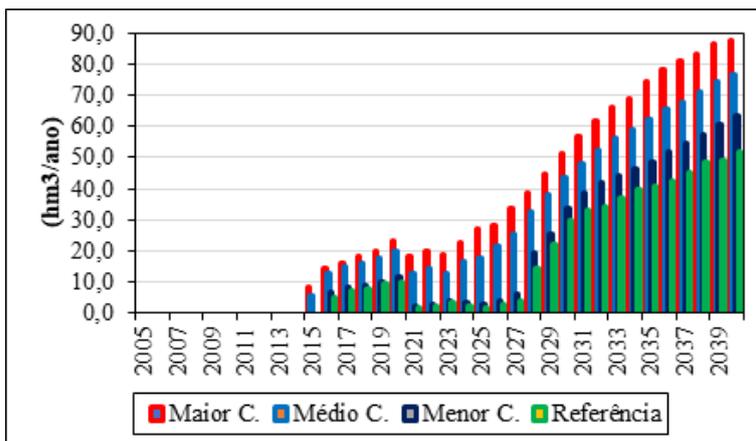


Figura 5.15 - Demanda total anual não atendida (hm³)

A demanda não atendida é observada durante todos os meses para o setor de abastecimento doméstico, com pico nos meses de agosto e setembro, enquanto para a irrigação agrícola a escassez se concentra nos meses de junho e julho.

O acordo IncoMaputo propõe que os países reorientem os usos de alta demanda para sistemas com água disponível. Neste sentido, as novas licenças para irrigação seriam direcionadas à outras bacias. A melhoria de eficiência da irrigação pode ser alcançada através da aplicação de estratégias de conservação de água para reduzir *déficits* futuros como sistema de irrigação por gotejamento que economiza 25% de água agrícola em vez de irrigação por aspersão (Metobwa *et al.*, 2018) e o revestimento do canal pode reduzir perdas de infiltração até 50% (Hassan *et al.*, 2017).

5.7 RESERVATÓRIO DOS PEQUENOS LIBOMBOS

Observando a Figura 5.16 verifica-se que com o aumento da demanda, associado à períodos seco e muito seco, existe redução do volume do reservatório, mostrando em alguns

casos dificuldades de atender à demanda nos quatro cenários. Nota-se ainda que o reservatório continua a apresentar um acréscimo do volume armazenado positivo, ou seja, com volume médio superior a 156 hm³ nos cenários de Referência e Menor Crescimento, o mesmo não acontece em relação aos cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento que apresentam valores mais baixos. Nos anos chuvosos, há picos no fluxo de entrada, que originam excedentes anuais no armazenamento do reservatório, que se esgotam no próximo ano seco ou normal nos cenários de Referência e Menor Crescimento, enquanto nos cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento os fluxos não causam nenhum aumento no atendimento à demanda.

O reservatório consegue satisfazer as necessidades de água em 70% e 63% nos cenários de Referência e Menor Crescimento. A diferença das necessidades médias do cenário de Referência para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento são 17,1 e 35,1 hm³, respectivamente. Esta variação obriga o reservatório a atingir valores de armazenamento mais baixos num menor período de tempo, quando comparando os cenários.

O reservatório abastece os locais de consumo sempre até atingir o seu volume morto. Os volumes mais baixos da figura 5.16 correspondem aos períodos em que o reservatório atinge o valor morto nos cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento. Observa-se ainda que os valores elevados do volume armazenado até 2027 são referentes aos anos chuvosos, enquanto os valores mais baixos para anos secos. A partir do ano 2028 os anos chuvoso e muito chuvoso passam a não ter influência substancial no aumento do volume armazenado e consequentemente no atendimento às demandas. Nos anos chuvoso e muito chuvoso, espera-se apenas pequenos picos de fluxo de entrada que não causam nenhum aumento no atendimento às demandas nos cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento.

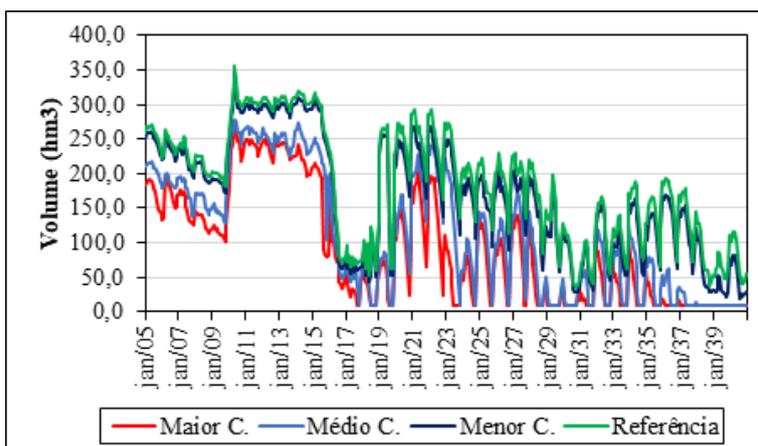


Figura 5.16 - Volume do reservatório dos Pequenos Libombos (hm³)

A partir da observação da Figura 5.16 que mostra os níveis médios mensais do reservatório, pode-se concluir que para todos os cenários, exceto os cenários de Referência e Menor Crescimento, espera-se níveis muito baixos e frequentes a partir de finais de 2023. A diminuição do volume do reservatório foi encontrada também por Droogers *et al.* (2014) por volta de 2030, embora com diferença substancial no valor médio. Em suma, o volume do reservatório mostra uma tendência decrescente, também encontrada por (Juízo; Líden, 2010; Droogers *et al.*, 2014).

Os anos hidrológicos futuros (2028, 2029 e 2030) mostram eventos de pouca afluência ao reservatório e assim, o volume do reservatório diminui tornando-se menor para manter o excedente adicional, também encontrados por Droogers *et al.* (2014). Devido a esses eventos, os influxos são insuficientes para abastecer o baixo Umbeluzi. Observa-se ainda que, com o aumento da demanda, há uma tendência de redução do volume, permanecendo metade do tempo abaixo do volume de disponibilidade nos períodos de condições hidrológicas seca e muito seca.

Da observação dos resultados da simulação da exploração do reservatório pode-se dizer que de acordo com as necessidades de água e das regras de operação do reservatório, o reservatório tem problemas para o fornecimento de água especialmente para abastecimento e irrigação. Como as necessidades anuais não são fixas assim como as condições hidrológicas responsáveis pelo escoamento afluente, conclui-se que o volume armazenado varia consoante as necessidades de locais de consumo.

5.8 VAZÃO ECOLÓGICA

A Figura 5.17 mostra a vazão no ponto de saída do Umbeluzi, com picos em anos previstos como chuvosos e muito chuvosos. Para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento, as vazões projetadas são muito baixas.

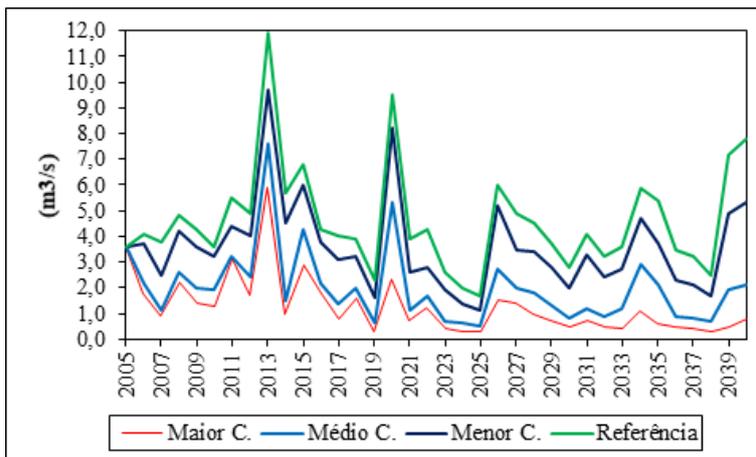


Figura 5.17 - Vazão anual de Umbeluzi no ponto de saída do oceano Índico (m^3/s)

Para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento, a vazão mínima ecológica ($1\text{m}^3/\text{s}$) é igualada ou superada em 72% e 53% do tempo, respectivamente (Figura 5.18).

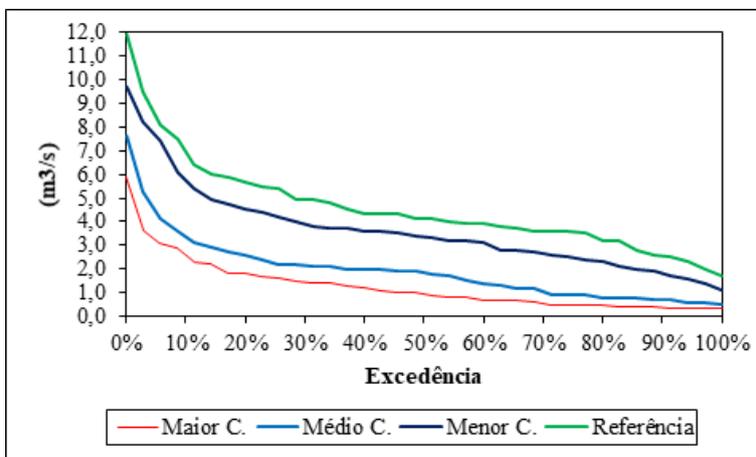


Figura 5.18 - Probabilidade de excedência de vazão de Umbeluzi no ponto de saída

5.9 INDICADORES DE DESEMPENHO

Para análise do desempenho do sistema, a cota de 21,0% da capacidade máxima adotada pela UGBU como sendo o nível limite, ou seja, abaixo desse valor o reservatório encontra-se em estado de alerta. Portanto, a análise de desempenho é feita adotando esse valor. Uma das formas de expressar como o modelo avalia a satisfação das demandas é através de garantia de oferta (Wurbs, 2005), ou seja, por quantos meses do período total a demanda foi atendida. Num horizonte de 36 anos a demanda é satisfeita em 324 meses no cenário de Referência e 165 no cenário Maior Crescimento (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Resultados de simulação do reservatório dos Pequenos Libombos (2005-2040)

	Maior Crescimento	Médio Cresc.	Menor Crescimento	Referência
Ms	165	206	291	324
Mc	267	226	141	108
Fu	1	2	5	7

Ms - Quantidade de meses em que o sistema se encontra em estado satisfatório

Mc - Quantidade de meses em que o sistema apresenta falhas

Fu - Quantidade de meses com falhas de um mês

A garantia na alocação de água é diferente nos quatro cenários, apenas o cenário de Referência apresenta garantia mensal e anual satisfatório, e insatisfatório para os restantes cenários (Tabela 5.5). À medida que o crescimento da demanda aumenta, o sistema fica mais vulnerável à escassez de água.

Tabela 5.5 - Desempenho do reservatório dos Pequenos Libombos (2005-2040)

	Maior Cresc.	Médio Cresc.	Menor Cresc.	Referência
Garantia mensal (%)	38,1	47,6	67,3	75,0
Garantia anual (%)	31,7	42,1	63,5	70,9
Duração média de falha	6,6	5,9	4,5	3,7
Resiliência (%)	2,5	5,2	16,1	24

Observa-se na Tabela 5.5 que as falhas no fornecimento de água têm duração média superior a três meses para todos os cenários.

Quanto a resiliência, capacidade de recuperação do sistema após um déficit, o reservatório apresenta valores críticos, isto devido ao número reduzido de falhas com apenas um mês, demonstrando a incapacidade de recuperação.

5.10 IMPLANTAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE MOVENE

Segundo ARA-Sul (2010), existe uma possibilidade de construção de um reservatório sobre o rio Movene, com capacidade de armazenamento de 335 hm³. Considerando a hipótese de construção do reservatório de Movene, e obedecendo os mesmos cenários hidrológicos apresentados na seção 4.2.1, foi simulada a contribuição e o comportamento do novo reservatório no sistema para auxiliar no abastecimento do baixo Umbeluzi, com início de operação estipulado para 2030, assumindo volume inicial de 247 hm³.

A Figura 5.19 mostra em destaque a esquematização do modelo de alocação incluindo o reservatório de Movene e a nova proposta de priorização de fornecimento de água, com prioridade 1 para abastecimento doméstico e vazão ecológica, prioridade 2 para indústria, prioridade 3 para irrigação e prioridade 99 para os dois reservatórios.

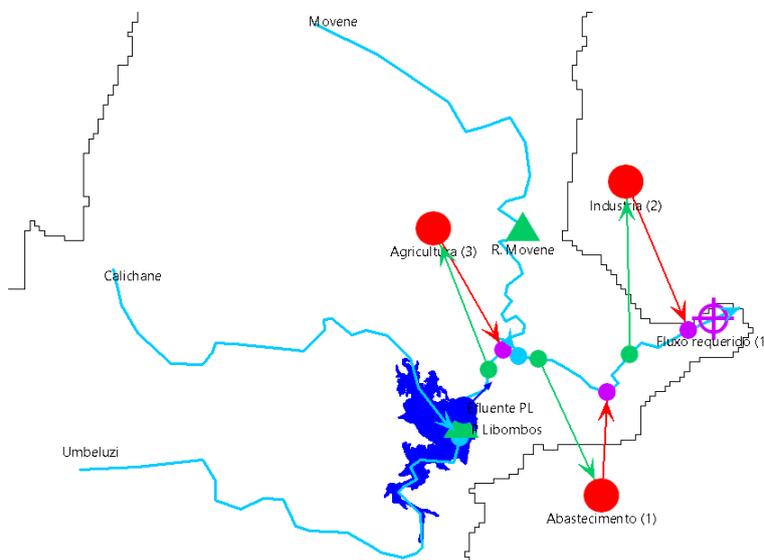


Figura 5.19 - Características de modelo de alocação de água com medida de adaptação

5.10.1 Demanda de água não atendida

Mesmo com a construção do reservatório de Movene as necessidades hídricas dos usos múltiplos no baixo Umbeluzi continuam a não ser satisfeitas na totalidade.

5.10.1.1 Demanda anual não atendida para abastecimento doméstico

Para o abastecimento doméstico que é a maior demanda de água no baixo Umbeluzi, apresenta uma diminuição na quantidade de água não atendida em todos os cenários, quando comparados os valores apresentados nas Figuras 5.12 e 5.20. No ano de 2030, a demanda não atendida no cenário de Referência sai de 19,2 hm³ para 0,7 hm³, no cenário Menor Crescimento o valor cai de 21,8 hm³ para 3,2 hm³. No cenário Médio Crescimento a demanda não atendida sai de 28,4 hm³ para 7,9 hm³ e no cenário Maior Crescimento cai de 33,4 hm³ para 9,6 hm³.

Verifica-se que em 2034, ano previsto como chuvoso, nos cenários de Referência e Menor Crescimento a demanda não atendida sai de 25,7 hm³ e 30,1 hm³ para 1,4 hm³ e 3,3 hm³, correspondente a uma redução de 95% e 89%, respectivamente.

Para o ano 2038, considerado como muito seco, a redução da demanda não atendida nos cenários de Referência e Maior Crescimento é de 22,3 hm³ e 34,6 hm³ que corresponde a 70,3% e 63,6%, respectivamente, apresentando o percentual mais baixo.

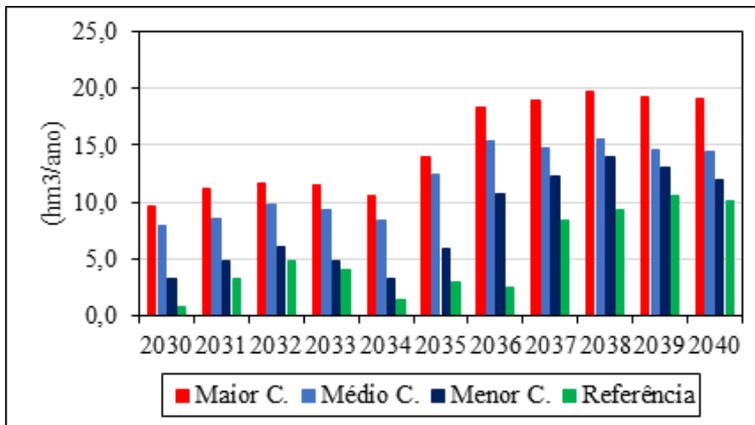


Figura 5.20 - Demanda anual não atendida para abastecimento doméstico (hm³)

Isso mostra que a capacidade adicional de armazenamento introduzida e as novas prioridades não são suficientes para equilibrar o aumento da demanda de água com a disponibilidade, resultado também encontrado por Juárez e Liden (2010).

5.10.1.2 Demanda anual não atendida para irrigação

A irrigação agrícola também apresenta redução da demanda não atendida. Em 2035 adotado como normal, nos cenários de Referência e Maior Crescimento o valor sai de 10,2 hm³ e 18,6 hm³ para 1,6 hm³ e 7,5 hm³. Observa-se que há maior redução no cenário de Referência (84,3%) se comparado com o valor de 59,7% do cenário Maior Crescimento (Figura 5.21).

Para o ano hidrológico muito chuvoso, de 2040, os ganhos são menores, nos cenários de Referência e Maior Crescimento a demanda não atendida passou de 12,9 hm³ e 22,0 hm³ para 4,1 hm³ e 10,3 hm³, que representa uma redução de 68,2% e 53,1%, respectivamente.

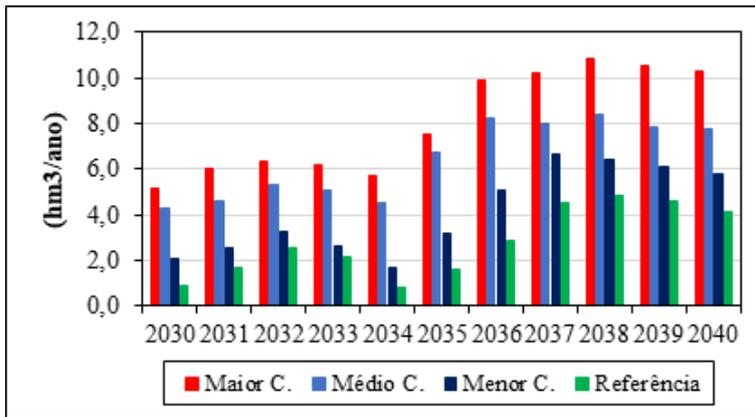


Figura 5.21 - Demanda anual não atendida na irrigação (hm³)

Os dois últimos anos da simulação, duma forma geral, mostram uma certa diminuição da demanda não atendida para todos os cenários, resultante do aumento do nível de armazenamento dos reservatórios em anos adotados como chuvoso e muito chuvoso, como é o caso de 2039 e 2040.

5.10.1.3 Demanda anual não atendida para indústria

A Figura 5.22 apresenta diferença substancial se comparada com a Figura 5.14, observa-se que nos cenários de Referência, Menor Crescimento e Médio Crescimento a satisfação das necessidades de água é total, ou seja, apresenta uma cobertura de 100%. A demanda não atendida no cenário Maior Crescimento começa em 2037, quatro anos mais tarde se comparado com a Figura 5.14.

A medida de adaptação introduzida tem impacto positivo no atendimento das necessidades industriais, pois verifica-se menor demanda não atendida. Este resultado vai de acordo com a conclusão de Juárez e Liden (2010) ao se referir ao aumento de cobertura para pequenos utentes após aplicação de medidas de adaptação.

No ano hidrológico previsto como chuvoso, de 2039, a demanda não atendida passa de 6,4 hm³ para 0,7 hm³, uma redução de 89%. Para o ano de 2040, o valor sai de 7,4 hm³ para 0,3 hm³, ano adotado como muito chuvoso, a redução da demanda não atendida é de 95,9%.

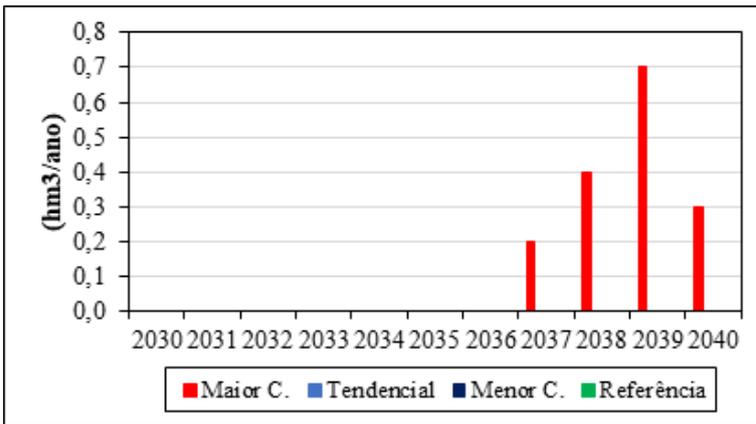


Figura 5.22 - Demanda anual não atendida na indústria (hm³)

5.10.1.4 Demanda total anual não atendida

A demanda não atendida sofre variações significativas com a implantação do reservatório de Movene. No geral, observa-se que há maior redução da demanda não atendida nos cenários de Referência e Menor Crescimento e menor diminuição nos cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento, se comparadas as Figuras 5.23 e 5.15 e, nos primeiros cinco anos da operação do reservatório.

No primeiro ano, em 2030, a demanda não atendida nos cenários de Referência e Maior Crescimento passou de 51,7 hm³ e 88,1 hm³ para 0,4 hm³ e 14,8 hm³, uma redução significativa de 99% e 83,2%, respectivamente.

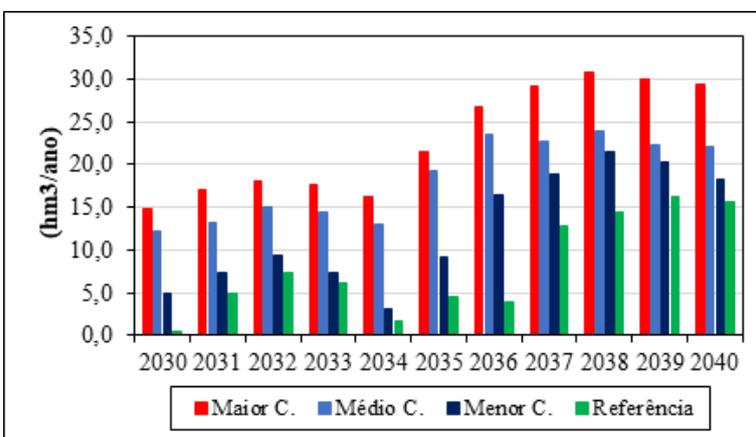


Figura 5.23 - Demanda total anual não atendida (hm³)

No ano previsto como chuvoso, de 2034, a demanda não atendida sai de 39,6 hm³ e 69,1 hm³ para 1,7 hm³ e 16,2 hm³, correspondente a uma redução de 95,7% e 76,5%, respectivamente, uma diminuição menor que a verificada em 2030, ano do início da operação do reservatório do Movene.

Em 2040, previsto como muito chuvoso, a demanda não atendida passa de 51,7 hm³ e 88,1 hm³ para 15,6 hm³ e 29,4 hm³ para os cenários de Referência e Maior Crescimento, respectivamente, verifica-se uma redução de 69,8% e 66,6%, respectivamente.

Mesmo com a implantação do reservatório de Movene e nova priorização de fornecimento de água, a demanda não é satisfeita totalmente durante todos os meses e anos. Sendo necessário que a gestão da procura de água esteja voltada para aumentar a eficiência de utilização através de medidas de carácter técnico, econômico, regulamentar e mobilização social como sugerido por (HIPÓLITO; VAZ, 2017).

5.10.2 Reservatório de Movene

Com início de operação em 2030, o reservatório apresenta diferença no volume armazenado para os quatro cenários no mês de janeiro. Esta diferença se acentua à medida que os anos vão passando, onde o ano de 2040 apresenta valores menores.

No ano chuvoso, previsto para 2034, observa-se aumento de armazenamento, atingindo valores médios para todos os cenários (Figura 5.24), como por exemplo, 137,8 hm³ e 106,7 hm³ em fevereiro para os cenários de Referência e Maior Crescimento.

Após o ano chuvoso observa-se a tendência de diminuição do armazenamento nos anos subsequentes para todos cenários.

Em 2038, ano adotado como muito seco, observa-se que todos os cenários apresentam a menor capacidade de armazenamento, cujos valores variam de 62,6 hm³ a 11,7 hm³ em outubro, para os cenários de Referência e Maior Crescimento, respectivamente.

Em nenhum momento da simulação o reservatório apresenta-se na sua capacidade máxima de armazenamento, e também nunca abaixo de 7 hm³ em todos os cenários. O resultado reforça as conclusões de Juízo e Liden (2010) e Droogers *et al.* (2014) da incapacidade de satisfazer totalmente a demanda mesmo com introdução de medidas adaptativas. Isso sugere a combinação da proposta do novo reservatório com a redução de perdas de água nos canais de transporte: reuso e uso eficiente de água. Portanto, são medidas que precisam ser testadas simultaneamente.

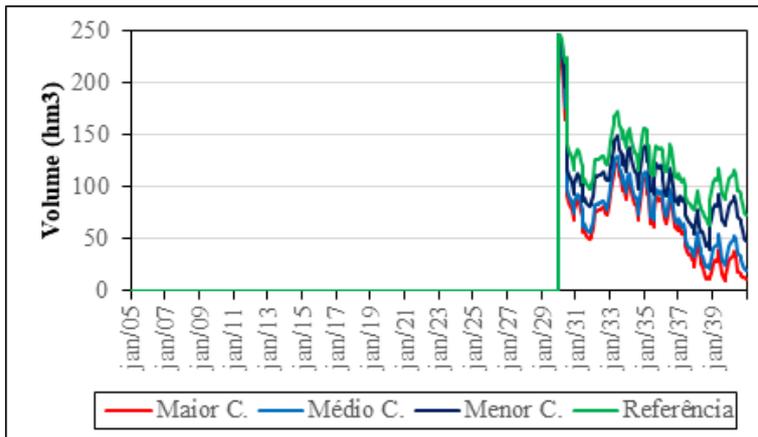


Figura 5.24 - Volume do reservatório de Movene (hm³)

5.10.2.1 Indicadores de desempenho

Para o cálculo dos indicadores de desempenho, foi considerado o volume de alerta de 62,6% da capacidade máxima do reservatório, observa-se na Figura 5.24, que o reservatório se mantém na maioria dos meses abaixo do volume de alerta. A exceção é registrada nos anos hidrológicos previstos como normal e chuvoso em 2033, 2034, 2035 e 2039.

A Tabela 5.6 apresenta os meses em que o reservatório de Movene opera no estado satisfatório e insatisfatório.

Tabela 5.6 - Resultados de simulação do reservatório de Movene (2030-2040)

	Maior Crescimento	Médio Cresc.	Menor Crescimento	Referência
Ms	26	72	91	109
Mc	106	60	41	23
Fu	0	0	2	5

Ms - Quantidade de meses em que o sistema se encontra em estado satisfatório

Mc - Quantidade de meses em que o sistema apresenta falhas

Fu - Quantidade de meses com falhas de um mês

Observa-se na Tabela 5.7 que a garantia anual é satisfatória apenas para o cenário de Referência e, sendo mais severo para o cenário Maior Crescimento. O sistema apresenta a duração média de cada falha superior a dois meses, com o cenário Maior Crescimento a apresentar maior média.

Tabela 5.7 - Desempenho do reservatório de Movene (2030-2040)

	Maior Cresc.	Médio Cresc.	Menor Cresc.	Referênci
Garantia mensal (%)	19,6	54,5	68,9	82,5
Garantia anual (%)	18,1	45,4	63,6	81,8
Duração média de falha	4,7	3,4	2,6	1,8
Resiliência (%)	29,7	43,6

A resiliência do reservatório é baixa para todos os cenários, demonstrando a incapacidade de recuperação após uma falha.

5.10.3 Reservatório dos Pequenos Libombos com operação de Movene

Caso houvesse o início de operação do reservatório de Movene em 2030, como é proposto neste trabalho, haveria diminuição na demanda do reservatório dos Pequenos Libombos. Consideradas as condições descritas acima, o reservatório dos Pequenos Libombos apresentaria o comportamento ilustrado na Figura 5.25.

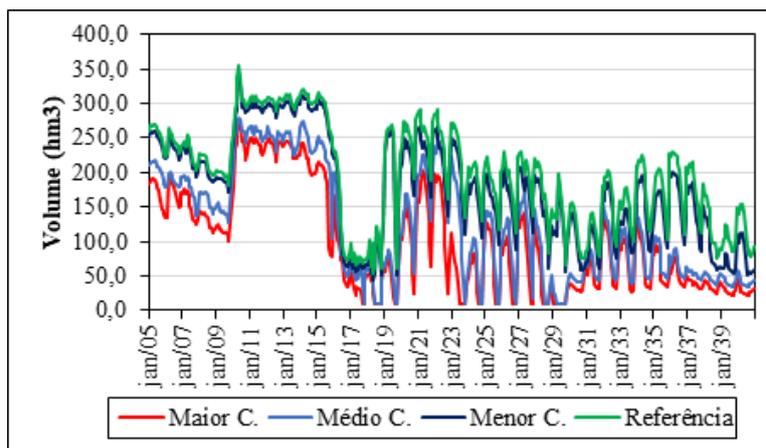


Figura 5.25 - Volume do reservatório dos Pequenos Libombos com reservatório de Movene operando (hm³)

Comparadas as Figuras 5.25 e 15.16, verifica-se que há aumento nos níveis do reservatório dos Pequenos Libombos, os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento já não apresentam volume morto. Os níveis do reservatório são superiores a 36 hm³ na maioria dos meses nos cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento.

O ano hidrológico previsto como chuvoso, de 2035, o aumento do volume é significativo para os cenários de Referência e Menor Crescimento, enquanto os outros dois mostram aumento menor.

O volume armazenado mostra diminuição para todos os cenários para o ano de 2038 adotado como muito seco, com valores abaixo de 55 hm³ no cenário Maior Crescimento, sendo os meses de agosto a novembro os que registraram valores mais baixos.

Mesmo com a operação do reservatório de Movene, o reservatório dos Pequenos Libombos não é capaz de ter volume superior a 162 hm³, nos cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento, isso demonstra que esta medida não resolve o problema de escassez de água. Contudo, o aumento de oferta de água através de construção de reservatório sobre o rio Movene é necessária.

5.10.3.1 Vazão ecológica

Com a operação dos dois reservatórios, a vazão ecológica na saída de Umbeluzi apresenta valores satisfatórios na maior parte do tempo (Figura 5.26) se comparado com a Figura 5.18. A vazão mínima ecológica é igualada ou superada em 91% e 83% para os cenários Médio Crescimento e Maior Crescimento.

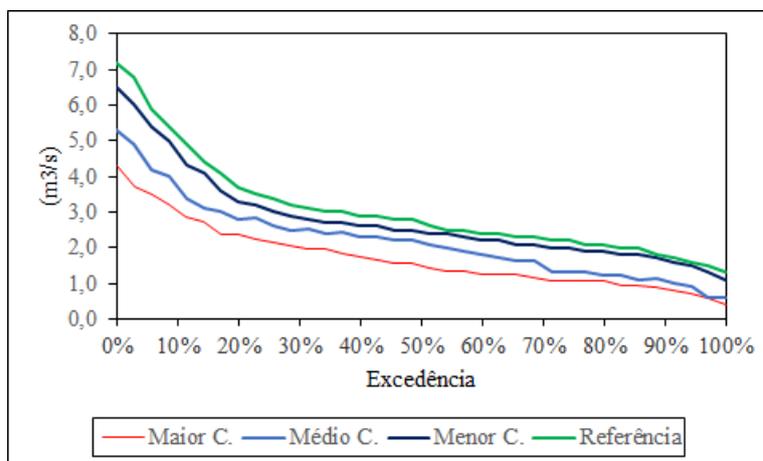


Figura 5.26 - Probabilidade de excedência de vazão de saída (m³/s)

5.10.3.2 Indicadores de desempenho

Com a entrada em operação do reservatório de Movene, houve aumento de meses em situação satisfatória em todos os cenários no reservatório dos Pequenos Libombos (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 - Resultados do reservatório dos Pequenos Libombos com operação do reservatório de Movene (2030-2040)

	Maior Crescimento	Médio Cresc.	Menor Crescimento	Referência
Ms	216,0	244,0	342,0	388,0
Mc	216,0	188,0	90,0	44,0
Fu	0	2	7	8

Ms - Quantidade de meses em que o sistema se encontra em estado satisfatório

Mc - Quantidade de meses em que o sistema apresenta falhas

Fu - Quantidade de meses com falhas de um mês

O reservatório dos Pequenos Libombos apresenta garantia anual superior a 50% para todos os cenários, com exceção do cenário Maior Crescimento como mostrado na Tabela 5.9. O cenário de Referência apresentou valor médio de recuperação do volume do reservatório, significando dificuldades após falha.

Tabela 5.9 - Desempenho do reservatório dos Pequenos Libombos com operação do reservatório de Movene (2030-2040)

	Maior Cresc.	Médio Cresc.	Menor Cresc.	Referência
Garantia mensal (%)	50,0	56,4	79,2	89,8
Garantia anual (%)	47,5	51,2	74,8	86,3
Duração média de cada falha	4,8	4,3	2,6	2,1
Resiliência (%)	11,5	32,9	51,4

5.11 SÉRIE HIDROLÓGICA PREVISTA

O estudo ao pretender conhecer a dinâmica hídrica futura socorreu-se de modelos de simulação para previsões de acontecimentos futuros, por isso é preciso que se faça uso de alguns critérios para a escolha de cenários hidrológicos, uma vez que é a partir de dados de precipitação que se determinará os influxos aos reservatórios.

Segundo estudo de Asante e Vilanculo (2009) os períodos de precipitação extrema (muito chuvoso), ocorrem com menor frequência, aproximadamente uma vez entre 15 a 20 anos. Para garantir que a seleção de ano aleatório gere condições futuras realistas, os anos mais chuvosos no período histórico não foram incluídos na seleção do ano aleatório.

As condições hidrológicas assumidas neste trabalho (Tabela 5.10) resultam da escolha aleatória das condições hidrológicas observadas nos últimos 30 anos (seção 4.2).

Tabela 5.10 - Condições hidrológicas previstas (2018-2040)

Ano	C. hidrológicos	Ano	C. hidrológicos	Ano	C. hidrológicos
2018	Muito Seco	2026	Chuvoso	2034	Chuvoso
2019	Seco	2027	Normal	2035	Normal
2020	Chuvoso	2028	Muito Seco	2036	Seco
2021	Normal	2029	Muito Seco	2037	Seco
2022	Normal	2030	Muito Seco	2038	Muito Seco
2023	Muito Seco	2031	Normal	2039	Chuvoso
2024	Normal	2032	Seco	2040	Muito Chuvoso
2025	Seco	2033	Normal		

CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO

6.1 Considerações finais

O reservatório dos Pequenos Libombos é principal responsável pelo abastecimento urbano, agrícola e industrial no baixo Umbeluzi. Na dissertação simulou-se quatro cenários: o cenário de Referência, que representa a exploração atual do sistema, os cenários de impacto (Menor Crescimento, Médio Crescimento e Maior Crescimento), que correspondem a expansão do anterior em vários graus e medida de adaptação, que corresponde à mudança de prioridade dos locais de demanda e construção do reservatório de Movene.

As previsões indicam que não será possível suprir todas as necessidades de água para os próximos anos independentemente do cenário utilizado. Os impactos mais significativos atingirão a população e agricultura sendo a indústria o setor menos prejudicado. A construção do reservatório sobre o rio Movene é necessária, mas não irá suprir a demanda.

Nas condições de referência o sistema mostra-se incapaz de satisfazer totalmente as necessidades de água na região, com os indicadores de desempenho a indicarem uma garantia anual de 70,9%, considerada satisfatória. Apresentando uma resiliência baixa de 24% demonstrando incapacidade de recuperação após falha.

Os principais resultados mostram que o cenário Menor Crescimento apresenta os resultados mais positivos para a manutenção dos sistemas dos recursos hídricos. Porém, esse cenário de desenvolvimento futuro dificilmente será concretizado, pois a taxa utilizada é inferior ao histórico da região. Os indicadores do desempenho do reservatório são insatisfatórios, pois apresentam um valor de 63,5% de garantia anual e uma resiliência baixa de 16,1%. Os resultados apresentados com a construção do reservatório de Movene e mudança de prioridade no sistema, continuam insatisfatórios no atendimento à demanda. A garantia anual situa-se em 63,6% e valor de resiliência de 29,7%. Verifica-se que o reservatório dos Pequenos Libombos apresenta resultados satisfatórios 74,8% de garantia anual com a entrada em operação do reservatório de Movene.

O cenário Médio Crescimento apresenta resultados preocupantes a médio e longo prazos com uma garantia anual de 42,1% e valor de resiliência de 5,2%. Com o aumento da oferta hídrica, o reservatório de Movene apresentou valores insatisfatórios com garantia anual de 45,4%. Observa-se que o reservatório dos Pequenos Libombos apesar da melhoria no atendimento à demanda, continua na situação insatisfatória. Os valores obtidos de garantia anual de 51,2% não satisfazem a demanda da água na região.

Os resultados obtidos no cenário Maior Crescimento, constituem os mais negativos neste estudo, apresentando garantia anual de 31,7% e resiliência de 2,5% devido a elevada demanda da água do reservatório. O efeito da construção do reservatório de Movene e mudança de prioridade é menor, apresentando o reservatório de Movene uma garantia anual de 19,6%. Os resultados dos Pequenos Libombos resultantes da operação do reservatório de Movene também são insatisfatórios, estando na ordem de 47,5% de garantia anual.

A medida de adaptação testada neste estudo não foi significativa, uma vez que resultou em uma redução menor na demanda total não atendida. Estes resultados enfatizam a necessidade de reduzir a pressão sobre os recursos hídricos da bacia através da combinação de aumento de oferta e gestão do lado da demanda

6.2 Recomendações

Com base nos resultados obtidos e limitações enfrentadas neste estudo, uma série de ações são necessárias:

Estudos detalhados com dados desagregados.

Medidas de gestão e cooperação com os países a montante.

Medidas de gestão voltadas para o lado da demanda como redução de perda de água durante o transporte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADGOLIGN, T.B.; Rao, G. V. R. S.; Y. Abbulu. WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustain. Water Resour. Manag.* n. 2, p. 55–70, dez. 2015.

AEP - Associação Empresarial de Portugal. Cluster da Água Moçambique. Uma Estratégia Coletiva. Manual de Boas Práticas. *Projecto Água Global - Internacionalização do Setor Português da Água.* 2014.

ANDREU, J.; Capilla, J.; E. Sanchis. AQUATOOL: A Computer-Assisted Support System for Water Resources Research Management Including Conjunctive Use, Decision Support Systems, *NATO ASI Series*, v.26, p.333-355, 1991.

ARA-Sul. Informação para a operação da barragem dos Pequenos Libombos. 2016.

ARNOLD, J.G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S.; J.R. Williams. Large area hydrologic modelling and assessment Part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* v. 34, n. 1, p.73–89, 1998.

ARRANZ, R.; M.P. McCartney. Application of the Water Evaluation and Planning (WEAP) model to assess future water demands and resources in the Oliphant Catchment, South Africa. *International Water Management Institute.* v.1, n.116, p. 1-103, 2007.

ASANTE, K.; A. Vilanculo. Análise da hidrologia e das bacias hidrográficas. INGC. Relatório das Alterações Climáticas. 2009.

BHAVE, A.J.; Conway, D.; Dessai, S.; D.A. Stainforth. Water Resource Planning Under Future Climate and Socioeconomic Uncertainty in the Cauvery River Basin in Karnataka, India. *Water Resources Research*, n.54, p.708–728, fev. 2018.

CCG -UCC – Centro de Cambio Global -Universidade Católica de Chile; SEI - Stockholm Environment Institute. Guia Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos com el Modelo WEAP. 2009. Disponível: <http://weap21.org>. Acesso: 18 abr. 2018.

CHAMBEL-LEITÃO, P.; Almeida, C.; Neves, R.; Cayrol, P.; Timóteo, G.; H. Coelho. Quantificação do impacto da agricultura na qualidade da água do Umbeluzi (Moçambique) usando modelos e imagens de satélite: **Anais.** XIV Simpósio Luso-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2010.

CHEN, Z.; S. Wei. Application of System Dynamics to Water Security Research. *Water Resour Manage.* v.28, p.287–300, nov. 2014.

DE CARVALHO, M.A.; Júnior, A.V.M.; André Schardong, A.; R. L. L. Porto. Sistema de suporte à decisão para alocação de água em projetos de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental.* v. 13, n.1, pa. 10-17, 13 jun. 2008.

DROOGERS, P.; De Boer, F.; W. Terink. Water Allocation Models for the Umbeluzi River Basin, Mozambique. *Report Future Water:* 132, v.1, dez. 2014.

DROOGERS, P.; Immerzeel, W.W.; Terink, W.; Hoogeveen, J.; Bierkens, M.F.P.; van Beek, L.P.H.; B. Debele. Water Resources Trends in Middle East and North Africa Towards 2050. *Hydrology and Earth Systems Sciences*. n.16, p. 3101–3114, set. 2012.

FANG, H.Y. Analysis of the concept of regional water resources security. *Yangtze River*, v.38, n.6, p.29–32, dez. 2007.

HASSAN, D.; Bano, R.; Burian, S.J.; K. Ansari. Modeling water demand and supply for future water resources management. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. v. 8, n. 5, p. 175-1750, mai. 2017.

HUSSEN, B.; Mekonnen, A.; S.M. Pingale. Integrated water resources management under climate change scenarios in the sub-basin of Abaya-Chamo, Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. n. 4, p. 221–240, mar. 2018.

Instituto Nacional de Estatística – INE. Resultados definitivos do censo 2017. Maputo. 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. The Scientific Base. Fifth Assessment Report, 2013

JIANG, Y. China's water security: Current status, emerging challenges and future prospects. *Environmental Science & Policy*, v. 54, p.106–125, set. 2015.

JOHANNSEN, I. M.; Hengst, J.C.; Goll, A.; Höllermann, B.; B, Diekkrüger. Future of Water Supply and Demand in the Middle Drâa Valley, Morocco, under Climate and Land Use Change. *Water*. v. 8, n. 313, p. 1-18, jul. 2016.

JUIZO, D.; R. Liden. Modeling for transboundary water resources planning and allocation: the case of Southern Africa. *Hydrology and Earth Systems Sciences*. n.14, p. 2343–2354, nov. 2010.

LE ROY, Edouard. A study of the development of water resources in the Olifants catchment, South Africa: Application of the WEAP model. 2005. Thesis of Master of Science and for the Diploma of Imperial College London.

LEONG, W.K.; S.H. Lai. Application of Water Evaluation and Planning Model for Integrated Water Resources Management: Case Study of Langat River Basin, Malaysia. IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering*. 210 (2017).

LEVI, D.; Miyamoto, M.; Ushiyama, T.; M. Tsuda. Development of an Effective Operation of Pequenos Libombos Dam in the Context of Climate Change in Mozambique. MEE 16723. 2016.

MACKENZIE, R. S.; P.G. van Rooyen. Management large water resources systems, *Water Supp*. v.3, n.3, p.297–304, out. 2003.

MCCARTNEY, M.P.; Yawson, D.; Magagula, T.F.; J. Seshoka. Hydrology and water resources development in the Olifants river catchment. Working Paper 76. Colombo, Sri Lanka: *International Water Management Institute*. 2004.

MERREY, D.J. African Models for Transnational River Basin Organisations in Africa: An Unexplored Dimension. *Water Alternatives*. v. 2, 2009, p.183-204. Disponível: www.water-alternatives.org.

METOBWA, O.G.M.; Mourad, K.A.; L. Ribbe. Water Demand Simulation Using WEAP 21: A Case Study of the Mara River Basin, Kenya. *International Journal of Natural Resource Ecology and Management*. v. 3, n. 1, p. 9-18, jan. 2018.

Ministério para a Coordenação da Acção Ambiental – MICOA. Estudo de Impacto Ambiental e Plano de Gestão Ambiental. Relatório do estudo de impacto ambiental. Maputo. 2006.

MOÇAMBIQUE. Estratégia Nacional de Gestão de recursos hídricos, Agosto de 2007. Disponível em <http://www.anaguas.gov.mz/lib/legislacao/Estrategia_Nacional_Gestao_Recursos_Hidricos%20-%20Brochura.pdf>. Acesso em 18/05/2018

MOÇAMBIQUE. Lei de Água nº16/91, de 3 de Agosto de 1991. Boletim da República – Imprensa Nacional de Moçambique. Assembleia da República. Maputo, 3 de Ago. 1991.

MOÇAMBIQUE. Resolução – Política Nacional de Águas nº 7/95, de 8 de Agosto de 1995. Boletim da República – Imprensa Nacional de Moçambique. Conselho de Ministros. Maputo, 23 de Ago. 1995.

MOÇAMBIQUE. Resolução – Políticas Tarifárias de Água nº 60/98, de 23 de Dezembro de 1998. Boletim da República – Imprensa Nacional de Moçambique. Conselho de Ministros. Maputo, 29 de Dez. 1998.

MUCHANDOS, A. Moçambique: Paisagens e Regiões Naturais. Maputo. 1999.

NADAL, G.; Girardin, O.; Losano, F.; Marizza, M.; Cello, P.; Bucciarelli, L.; Forni, L.; Camilloni, I.; Bravo, G.; Lallana, F.; N. Di Sbroiavacca. La planificación del manejo de los recursos hídricos en el contexto del cambio climático. Una aplicación a la región del Comahue, Patagonia , Argentina. *Aqua-LAC*. v. 9, n. 2, p. 59-72, set. 2017.

OMAR, M.E.D.M.; A.M.A. Moussa. Water management in Egypt for facing the future challenges. *Journal of Advanced Research*. n.7, p. 403–412, fev. 2016.

SADC – Comunidade de Desenvolvimento de África Austral. Protocolo sobre os Cursos de Água Partilhados, Revisado, 2000.

SAVENIJE. H.H.G.; P. Van der Zaag. Integrated water resources management: Concepts and issues. *Physics and Chemistry of the Earth*. v. 33, p. 290–297, 15 fev. 2008.

SEI - Stockholm Environment Institute. USER GUIDE.2015. Disponível: <http://weap21.org>. Acesso: 11 abr. 2018.

SHAO, D.; Yang, F.; Xiao, C.; X. Tan. Evaluation of water security: an integrated approach applied in Wuhan urban agglomeration, China. *Water Science & Technology*, v. 66, n.1, p. 1-9, ago. 2012.

SIMÕES, J.; Oliveira, R. Modelos de gestão de bacias hidrográficas: o desempenho dos modelos IRAS-2010 e AQUATOOL na simulação do aproveitamento hidroagrícola do Vale do Sorraia. 2010. *Revista de Recursos Hídricos*. v. 35, n.2, p. 29-39, 20 nov. 2014.

SLINGER, J.H.; Hilders, M.; D. Juárez. The Practice of Transboundary Decision Making on the Incomati River: Elucidating Underlying Factors and their Implications for Institutional Design. *Ecoligy and Society*. v.15, n.1, p. 1-17. 2010.

SUN, F.; Staddon, C.; M. Chen. Developing and applying water security metrics in China: Experience and challenges. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* v. 21, p.29–36, mar. 2016.

SWECO; Associates. Estudo conjunto da bacia do Rio Umbeluzi. NDF197, Primeiro projecto nacional de desenvolvimento do sector de águas. 2005.

TRAMBAUER, P.; Werner, M.; Winsemius, H.C.; Maskey, S.; Dutra, E.; S. Uhlenbrook. 2015. Hydrological drought forecasting and skill assessment for the Limpopo River basin, southern Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*. v.19, p.1695–1711, 13 abr. 2015.

TURTON, A. A South African Perspective on a Possible Benefit-Sharing Approach for Transboundary Waters in the SADC Region. *Water Alternatives*. v.1, 2008, p.180-200. Disponível: www.water-alternatives.org.

TURTON, A.R. Water as a Source of Conflict or Cooperation: The Case of South Africa and its Transboundary Rivers. Gibb-SERA Chair in Integrated Water Resource Management Universities Partnership for Transboundary Waters (UPTW). CSIR Report No: ENV-P-CONF 2005-002.

VAN EEKELEN, M.W.; Bastiaanssen, W.G.M.; C. Jarman, C.; Jackson, B.; Ferreira, F.; van der Zaag, P.; Okello, A.S.; Bosch J.; Dyeh, P.; Bastidas-Obando, E.; Dost, R.J.J.; W.M.J. Luxemburg. 2015. A novel approach to estimate direct and indirect water withdrawals from satellite measurements: A case study from the Incomati basin. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. v.200, p. 126-142, 29 nov.2015. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.023>.

WEAP. Water Evaluation and Planning Model.Tutorial. Uma coleção de modelos independentes para ensinar o software WEAP, 2009. Disponível em: <http://www.weap21.org/index.asp?action=213>. Acesso em: 6 mai. 2018.

Wilk, J.; A.C. Jonsson. From water poverty to water prosperity-a more participatory approach to studying local water resources management, *Water Resour Manag.* v. 27, n.3, p.695–713, abr. 2013.

WURBS, R. Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System model, Texas. *Water Resources Institute*, Texas, EUA. 2005.

YATES, D.; Sieber, J.; Purkey, D.; A. Lee. WEAP21: A demand, priority, and preference-driven water planning model-part 1: model characteristics. *Int. Water Res. Assoc.* v.30, n.4, p. 487–500, dez. 2005a.

YATES, D; Sieber,J.; Purkey, D.; Lee, A.; H. Galbraith. WEAP21: A demand, priority and preference driven water planning model: part 2, aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Int. Water Res. Assoc.* v.30, n.4, p.501–512, dez. 2005b.

ZHAO, S. H.; Chen, J. F.; Y.A. Weng. Research on urban water security evaluation based on unascertained measure model. Iccit: 2009 Fourth International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, v 1, 2, p. 620–623, 2009.