

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

VALERIA ALBÁN DOMÍNGUEZ

**DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO HÍDRICA DE
MACRO SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA PARA PEQUENOS
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS**

VITÓRIA

2018

VALERIA ALBÁN DOMÍNGUEZ

**DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO HÍDRICA DE
MACRO SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA PARA PEQUENOS
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração Recursos Hídricos.

Orientador: Edmilson Costa Teixeira

Coorientador: Diogo Costa Buarque

VITÓRIA

2018

Dedicada aos camponeses que por tradição e subsistência trabalham a terra, lutando com as adversidades do clima e com os interesses alheios a eles. Em especial, aos camponeses flagelados e sem terra pela violência e indiferença da sociedade.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, dou graças a Deus pelas oportunidades oferecidas e por me inspirar nas decisões que me levaram à culminação de um mestrado em Engenharia Ambiental na linha de recursos hídricos na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), na cidade de Vitória, estado do Espírito Santo-Brasil, onde não só aprofundei conhecimentos sobre a minha área de interesse, mas também tive um grande crescimento como pessoa e como profissional.

Agradeço o apoio prestado por minha família: a meu pai, Gonzalo, e a minha mãe, Adriana, que sempre me brindaram com seu apoio e acreditaram nas minhas capacidades e talentos; a meus colegas da vida, meus irmãos Daniela e Juan, pela torcida e pela companhia incondicional.

Agradeço também à Organização dos Estados Americanos (OEA) e ao grupo Coimbra de Universidades Brasileiras (GCUB), que através do Programa de Alianças para Educação e Capacitação (PAEC), permitiram o meu ingresso no supracitado programa de pós-graduação. Também agradeço a meus professores de graduação Joana Husserl, Manuel Rodriguez e Juan Pablo Ramos que me conduziram à essa oportunidade.

Agradecimentos especiais a meu orientador, Edmilson Costa Teixeira, que com seu exemplo e a sua confiança conseguiu com que me apaixonasse pelo meu assunto de pesquisa. Também agradeço a meu coorientador, Diogo Costa Buarque, que direcionou os aspectos técnicos da pesquisa, cuja contribuição no desenvolvimento do projeto foi fundamental. Agradeço a ambos pelo tempo investido no meu projeto, pela paciência e pela amizade.

Agradeço também a pessoas que com sua experiência contribuíram no desenvolvimento de meu trabalho: a Jean Carlos Da Re, vinculado à instituição Incaper/ES, deu apoio técnico à aplicação experimental de procedimento metodológico desenvolvimento no âmbito da pesquisa à bacia hidrográfica do Córrego Sossego, bacia do rio Santa Joana/ES; aos colegas Anna Paula, Paulo Eduardo, Núbia e Felipe, do Laboratório de Gestão de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Regional (LABGEST), da UFES, que disponibilizaram informações para a execução de meu projeto; aos colegas do LABGEST Aaron, Karla, Andresa, Eliane, Bruno e

Taísa pela troca de conhecimentos. A todos esses colegas do LABGEST pela amizade, que foi fundamental no desenvolvimento do meu mestrado.

Agradeço especialmente aos professores José Antônio Tosta dos Reis/UFES e Demétrius David da Silva/UFV, membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições oferecidas a meu trabalho.

Agradeço o grupo Beribazu/UFES, especialmente ao Mestre Fabio e ao professor Vinícius, por trazerem a capoeira à minha vida; suas boas energias me ajudaram a lidar com as pressões do mestrado.

Por último, agradeço: aos professores e trabalhadores do PPGEA/UFES que contribuíram com minha formação; ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos; e ao povo brasileiro por sua hospitalidade.

RESUMO

As tecnologias de armazenamento de água em reservatórios, entre elas os sistemas de macro captação de água de chuva (Macro-WHS), constituem-se numa das soluções recomendadas para mitigar os efeitos do déficit hídrico de forma coletiva (uma unidade de reservação para abastecer dois ou mais usuários) em comunidades rurais que praticam a agricultura irrigada em pequena escala. No entanto, a literatura apresenta poucas informações sistematizadas referentes ao dimensionamento de Macro-WHS, particularmente para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas, assim como também apontam para limitações quanto à disponibilidade de dados em subsídio ao referido dimensionamento. Assim, a pesquisa voltou-se ao desenvolvimento de procedimento metodológico em suporte ao dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de Macro-WHS para pequenos sistemas de irrigação, em pequenas bacias hidrográficas, o qual contempla a determinação do volume potencial total de reservação do Macro-WHS (VR), bem como de alguns indicadores que permitam a qualificação deste volume no contexto da bacia hidrográfica ou de sub-regiões que a compõem. O procedimento metodológico foi aplicado experimentalmente na bacia do Córrego Sossego/bacia do rio Santa Joana – afluente do rio Doce no estado do Espírito Santo, apontando, entre os resultados: 1- diferenças de até 50% na estimativa da capacidade de reservação hídrica ao se empregar diferentes fontes de dados potencialmente disponíveis, os quais requereram a aplicação diferenciada dos métodos oferecidos pelo procedimento metodológico para determinação dos parâmetros agroclimatológicos; 2- diferenças significativas na estimativa do volume anual de reservação hídrica (VR), função da discretização espacial (bacia / global ou sub-regiões hidrográficas) da disponibilidade e demanda hídricas - de até 92% e 42%, respectivamente; 3- o uso mais adequado de três indicadores propostos para avaliação da capacidade de reservação hídrica de Macro WHS – um deles para avaliação direta do próprio potencial de armazenamento de água (CCRideal) e dois outros para identificação de pressões sobre as demandas hídricas do sistema (CCR e SI). Esta aplicação experimental, por um lado, demonstra ser promissor o emprego do procedimento metodológico proposto, bem como, por outro lado, orienta quanto a aspectos do procedimento que se deve dar mais atenção visando maior desempenho no seu emprego de forma mais extensiva.

Palavras-chave: Capacidade de reservação hídrica; sistema de macro captação; água de chuva; agricultura irrigada de pequena escala.

RESUMEN

Las tecnologías de almacenamiento de agua en reservorios, entre ellas, los sistemas de Macro-captación de aguas de lluvia (Macro-WHS), constituyen una de las soluciones recomendadas para mitigar los efectos del déficit hídrico de forma colectiva (una unidad de reservación para dos o más usuarios) en comunidades rurales que practican la agricultura de riego en pequeña escala. Sin embargo, la literatura apunta pocas informaciones sistematizadas sobre el dimensionamiento de Macro WHS, particularmente para pequeños sistemas de riego en pequeñas cuencas hidrográficas, así como también señala limitaciones sobre la disponibilidad de datos que subsidien el referido dimensionamiento. De esta manera, la investigación se encaminó al desarrollo de un procedimiento metodológico que auxilie el dimensionamiento de la capacidad de reservación hídrica de Macro WHS para pequeños sistemas de riego en pequeñas cuencas hidrográficas, lo que contempla la determinación del volumen potencial de reservación del Macro-WHS (VR), así como de algunos indicadores que permiten la evaluación de este volumen en el contexto de cuenca hidrográfica o de las sub-regiones hidrológicas que la componen. El procedimiento metodológico fue aplicado experimentalmente en la cuenca hidrográfica Córrego Sossego/cuenca del río Santa Joana – afluente del río Doce en el estado de Espírito Santo, apuntando, entre los resultados: 1- diferencias de hasta un 50% en la determinación de la capacidad de reservación hídrica al utilizar diferentes fuentes de datos potencialmente disponibles, que requieren una aplicación diferenciada de los métodos ofrecidos por el procedimiento metodológico para la determinación de los parámetros agro-climáticos; 2- diferencias significativas en la determinación del volumen anual de reservación hídrica (VR), en función de la discretización espacial (cuenca/global o subregiones hidrográficas) de la disponibilidad y demanda hídrica - de hasta 92% y 42%, respectivamente-; 3. el uso más adecuado de tres indicadores propuestos para la evaluación de la capacidad de reservación hídrica de Macro WHS, uno que evalúa directamente el propio potencial de almacenamiento hídrico (CCR_{ideal}), y los otros que permiten identificar las presiones hídricas del sistema (CCR y SI). La aplicación experimental, por un lado, demuestra que el procedimiento metodológico propuesto tiene potencial para ser utilizado en la práctica, así como, por otro lado, orienta sobre los aspectos del procedimiento a los que se debe dar mayor atención buscando mayor desempeño en su empleo de forma más extensiva.

Palabras claves: Capacidad de reservación hídrica; sistema de macro captación de agua de lluvia; agricultura de riego en pequeña escala.

ABSTRACT

Reservoirs and water storage technologies, including the Macro water harvesting systems (Macro WHS), are one of the recommended solutions to mitigate the effects of water deficit in a collective way (a reservation unit to supply two or more users) in rural communities that practice small-scale irrigated agriculture. However, the literature presents little systematized information regarding the design of Macro-WHS, particularly for small irrigation systems in small hydrographic basins, as well as limitations on the availability of data in subsidy to this design. Thus, this research turned to the development of a methodology procedure in support the design of the water storage capacity of Macro WHS for small irrigation systems, in small hydrographic basins, which includes the determination of the total potential volume of the Macro WHS (VR), as well as some indicators to qualify this volume in the context of the catchment area or subregions. The methodological procedure was applied in the Córrego Sossego/Santa Joana river basin – affluent of the Doce river in the state of Espírito Santo, pointing out, among the results: 1. differences of up to 50% of the estimation of the water storage capacity when using different sources of data potentially available, which required the different application of the methods offered by the methodological procedure to determine the agroclimatic parameters; 2. significant differences in the estimated annual volume of water storage (VR), as a function of spatial discretization (local/global or sub-river basins) of water availability and demand – up to 92% and 42%, respectively; 3. The most appropriated use of three proposed indicators that evaluated the water reserve capacity of Macro-WHS, one for direct evaluation of the water storage potential (CCRideal) and two others for the identification of pressures on the water demands of the system (CCR and SI). This experimental, on the one hand, demonstrates the promising use of the proposed methodological procedure, as well as, on the other hand, it gives orientation on aspects of the procedure that should be given more attention aiming at greater performance in its use in a more extensive way.

Keywords: Water storage capacity; rainwater harvesting macro-system; small-scale irrigation agriculture.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional das Águas

AMC - Conteúdo de umidade antecedente

AWM - *Agriculture Water Management*

FAO - *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

GHS - Grupos Hidrológicos de Solos

GIRH - Gestão Integrada de Recursos Hídricos

GWP - *Global Water Partnership*

HS - Hargreaves Samani

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural

IWMI - International Water Manager Institute

LabGest - Laboratório de Gestão de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal do Espírito Santo

NRCS - Natural Resources Conservation Service

PM - Penman Monteith

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

SCS - *Soil Conservation Service*

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

USDA - *U.S. Department of agriculture*

WHS - Sistemas de captação de água de chuva

LISTA DE SIMBOLOS

A_{cap}	Área de captação (km^2)
A_{irr}	Área irrigada (ha)
A_{re}	Área do reservatório (ha)
A_{TOTAL}	Refere-se à área da bacia ou da sub-região para a qual é aplicada a metodologia
AMC	Conteúdo de umidade antecedente do solo
AMC I	Conteúdo de umidade antecedente do solo para condições secas
AMC II	Conteúdo de umidade antecedente do solo para condições normais
AMC III	Conteúdo de umidade antecedente do solo para condições úmidas
CC	Capacidade de campo
CCR	Relação área de captação - área de irrigação
CCR_{ideal}	Relação área de captação - área de irrigação (ideal)
CSR	Relação área de captação - área de reservação
CN	Número de Curva
CN I	Número de curva para as condições secas de umidade antecedente do solo
CN II	Número de curva para as condições normais de umidade antecedente do solo
CN III	Número de curva para as condições úmidas de umidade antecedente do solo
D	Volume demandado para fins de irrigação em um dado período
D'	Volume anual demandado de irrigação por hectare
D_t	Volume da demanda hídrica de irrigação no mês t

e_a	Pressão real de vapor (kPa)
e_s	Pressão de saturação de vapor(kPa)
ET	Evapotranspiração (mm) para um intervalo de tempo dado
ET_0	Evapotranspiração de referência para um intervalo de tempo
$\overline{ET_0}$	Evapotranspiração de referência anual
ET_c	Evapotranspiração da cultura para um intervalo de tempo
G	Fluxo de calor no solo ($MJ\ m^{-2}d^{-1}$)
HR	Umidade relativa (%)
Incl	Inclinação do terreno (%)
k_c	Coeficiente da cultura para um determinado intervalo de tempo
$\overline{k_c}$	Coeficiente de cultura médio anual
LI	Lâmina de irrigação
LI_t	Lâmina de irrigação para o intervalo ou mês t (mm)
LI_a	Lâmina de irrigação no ano simulado
m	Faixa de valor de um evento de precipitação (toma valores de 1 a N)
N	Número total de observações
NHL	Necessidade hídrica da cultura (mm) para um intervalo de tempo dado
O_t	Volume potencial de água a ser armazenado no mês t
p_t	Volume perdido por infiltração ou percolação no mês t (
P	Precipitação para um intervalo de tempo dado
P_a	Precipitação anual
P_{ANUAL}	Valor médio anual da precipitação

$P(\%)$	Corresponde a probabilidade em que o valor de um evento de precipitação pode ser excedido
$P(80)$	Precipitação com probabilidade de 80% de garantia para um intervalo de tempo dado
$P(80)_{ANUAL}$	Precipitação com probabilidade de 80% de garantia para eventos anuais
$P(80)_t$	Precipitação com probabilidade de 80% de garantia para um mês do ano simulado
P_{ef}	Precipitação efetiva (mm) para um intervalo de tempo dado
PMP	Ponto de murcha permanente
Q	Lâmina de escoamento para um intervalo de tempo dado
Q_a	Lâmina média anual de escoamento simulada
Q_t	Lâmina de escoamento para o mês t (mm/mês)
R_n	Saldo de radiação na superfície da cultura ($MJ\ m^{-2}d^{-1}$)
t	meses do ano; pode tomar valores inteiros de 1 a 12
T_{max}	Temperatura máxima do ar
T_{med}	Temperatura média do ar
T_{min}	Temperatura mínima do ar
U_2	Velocidade do vento a 2 m do solo (ms^{-1})
V_0	Volume disponibilizado no ano simulado
V_D	Volume demandado anual
V_E	Volume escoado anual
V_R	Volume de regularização anual (m^3)
V_t	Volume acumulado para reservação no tempo t
ε	Eficiência de irrigação (%)

Δ Declividade da curva de pressão de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

γ Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)

ΔCN Variação normalizada do CN

$\Delta\text{D}'$ Variação normalizada de D'

$\Delta\overline{ET_0}$ Variação normalizada da $\overline{ET_0}$

$\Delta\overline{k_c}$ Variação normalizada do $\overline{k_c}$

ΔS Armazenamento de água no solo

ΔVR Variação normalizada do $\overline{k_c}$

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procedimento proposto para subsidiar o dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de Macro WHS.	56
Figura 2. Procedimento para estimar a demanda hídrica de Macro WHS para fins de irrigação.	58
Figura 3. Procedimento para estimar a disponibilidade hídrica de Macro-WHS	62
Figura 4. Localização da Bacia hidrográfica do Córrego Sossego e suas sub-regiões hidrográficas	74
Figura 5. Localização das estações meteorológicas utilizadas.....	76
Figura 6. Resultados do modelo chuva-vazão para a bacia do Córrego Sossego ...	87
Figura 7. Relação entre os indicadores CCR_{ideal} , CCR e SI (representados no eixo secundário) na bacia do Córrego Sossego e as sub-regiões	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens associadas à implementação de reservatórios de pequeno porte de WHS.	30
Tabela 2. Fatores que podem influenciar no processo de dimensionamento de unidades de reservação de Macro-WHS para pequenos sistemas de irrigação (Autoria própria)	55
Tabela 3. Características das fontes de dados climatológicos	75
Tabela 4. Caracterização da irrigação das categorias de cultivos por sub-região hidrográfica.....	77
Tabela 5. Categorias das culturas da bacia do Córrego Sossego para calcular k_c pelo método detalhado	82
Tabela 6. Influência da variação da ET_0 na estimativa da D' e do VR na bacia do Córrego Sossego	85
Tabela 7. Variação de $\overline{k_c}$, $\overline{ET_c}$, D' e VR na bacia do Córrego Sossego.....	85
Tabela 8. Estatísticas anuais da precipitação (P_a) e da lâmina de escoamento simulado (Q_a) na bacia do Córrego Sossego	87
Tabela 9. Variação de $\overline{k_c}$, $\overline{ET_c}$, e $V_{D'}$ por sub-região hidrográfica na bacia do Córrego Sossego.....	88
Tabela 10. Parâmetros para aplicação do modelo chuva-vazão SCS por sub-região hidrográfica e a lâmina de escoamento anual resultante.....	89
Tabela 11. Indicadores que avaliam a capacidade de reservação do sistema	91

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	OBJETIVOS.....	22
2.1	OBJETIVO GERAL.....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1	GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA AGRICULTURA IRRIGADA EM PEQUENOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO.....	23
3.2	SISTEMAS DE RESERVAÇÃO PARA PEQUENOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO.....	25
3.3	DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS.....	32
3.4	MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	35
3.5	DEMANDA HÍDRICA DAS CULTURAS.....	39
3.5.1	Evapotranspiração.....	42
3.5.2	Lâmina de irrigação.....	45
3.5.3	<i>Software CROPWAT</i>	46
3.6	DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	47
4	ARTIGO 1: CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO HÍDRICA DE SISTEMAS DE MACRO CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA PARA PEQUENOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	51
4.1	RESUMO.....	51
4.2	INTRODUÇÃO.....	51

4.3	FATORES INTERVENIENTES NO DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO PARA PEQUENOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO.....	54
4.4	A PROPOSTA METODOLÓGICA.....	56
4.4.1	<i>Demanda hídrica.....</i>	57
4.4.2	<i>Disponibilidade hídrica.....</i>	61
4.4.3	<i>Volume de Regularização.....</i>	64
4.4.4	<i>Indicadores para Interpretação da Capacidade de Reserva.....</i>	65
4.5	DISCUSSÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	66
4.6	CONCLUSÕES.....	68
5	ARTIGO 2: DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO HÍDRICA DE SISTEMAS DE MACRO CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA: APLICAÇÃO NA BACIA DO CÓRREGO SOSSEGO, ITARANA-ES.....	69
5.1	RESUMO.....	69
5.2	INTRODUÇÃO.....	70
5.3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	71
5.3.1	<i>Caracterização da área de estudo.....</i>	73
5.3.2	<i>Base de dados.....</i>	74
5.3.3	<i>Análises.....</i>	77
5.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
5.4.1	<i>Análises da demanda de irrigação na bacia do Córrego Sossego.....</i>	84
5.4.2	<i>Análises de produção de Escoamento na Bacia do Córrego Sossego.....</i>	86

5.4.3	<i>Análises da variação espacial das características físicas.....</i>	87
5.5	CONCLUSÕES.....	93
6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	95
6.1	Conclusão.....	95
6.2	Recomendações para Estudos Futuros.....	96
7	REFERENCIAS.....	98

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população, o desenvolvimento dos diferentes setores da sociedade, e, as mudanças dos padrões globais de distribuição de massas de água incrementaram a pressão sobre os recursos hídricos, colocando em perigo a sustentabilidade hídrica. Isso explica a importante redução da disponibilidade hídrica em muitas regiões do globo, em especial naquelas com climas áridos e semiáridos, que se caracterizam por baixos volumes de precipitação, alta variabilidade pluviométrica ao longo do ano e altas taxas de evapotranspiração (GHEYI et al., 2012). Logo, justifica-se a intenção de fortalecer a gestão de recursos hídricos nessas regiões, por meio do estabelecimento de políticas públicas e diretrizes voltadas a um planejamento integrado do território que consiga reduzir os efeitos gerados pela escassez hídrica (LANNA,1995; LOPES,2011; FAO,2015a).

Dentre os setores da economia, um dos mais vulneráveis ao déficit hídrico é a agricultura irrigada. Por isso, tecnologias de manejo e conservação da água neste setor têm sido foco de pesquisas dentro da gestão dos recursos hídricos. A agricultura irrigada consome cerca de 70% da água de uso consultivo e contribui com aproximadamente 40% da produção de alimentos no mundo (FAO, 2015a). O impacto do déficit hídrico sobre a agricultura irrigada coloca em risco a segurança alimentar mundial (PANDEY et al., 2013), e, portanto, é necessário contribuir com medidas que permitam reduzir esse déficit para dar cumprimento a alguns dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS). Este fato afeta especialmente os países em desenvolvimento, que dependem fortemente da agricultura irrigada, representada em sua maioria por pequenos sistemas de irrigação.

As áreas rurais com pequenos sistemas de irrigação são mais vulneráveis ao déficit hídrico pela: falta de assistência técnica e institucional; baixa capacidade de capacitação técnica e renda; e falta de comunicação entre os diferentes agentes e atores envolvidos, tanto no planejamento de recursos hídricos nesta escala como na implementação das ações (ROCKSTRÖM, 2000; VENOT; DE FRAITURE; ACHEAMPONG, 2012). Dado que os pequenos sistemas de irrigação são particularmente vulneráveis a eventos de déficit hídrico (MUTEKWA; KUSANGAYA, 2006), procura-se melhorar o gerenciamento da água a fim de contribuir com a segurança hídrica e alimentar e com o alívio da pobreza nos países em

desenvolvimento (FAO, 2015b). Neste sentido, a gestão agrícola da água (AWM da abreviação do termo em inglês: Agricultural Water Management) volta-se ao aperfeiçoamento de estratégias visando aumentar a produtividade da água em pequenos sistemas agrícolas (BARRON et al., 2015).

Para subsidiar a gestão agrícola da água para pequenos sistemas de irrigação, identifica-se que o uso de pequenas bacias hidrográficas como unidade de planejamento de água para fins de irrigação promove a integração entre a gestão formal de recursos hídricos e a autogestão comunitária da água em regiões de base agrícola familiar, ou seja, cogestão. No entanto, o sucesso dessa integração depende da disponibilidade de dados e informações, bem como de metodologias de tratamento e análise de dados nesta escala geográfica, que, por um lado, tem sido uma deficiência apontada na literatura especializada e, por outro, contribuído para um aumento do número de estudos / pesquisas nessas áreas (POGIAN, 2016; MARQUEZ, 2015).

Entre as diferentes estratégias de AWM, a construção de infraestrutura de reservação hídrica, tanto individuais como coletivos, tem atraído o interesse de pesquisadores na solução de problemas de déficit hídrico, com o argumento de que estes sistemas favorecem o aumento da disponibilidade hídrica em regiões vulneráveis ao déficit hídrico (ANDREINI et al., 2009; PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012; VENOT; DE FRAITURE; ACHEAMPONG, 2012). Desse modo, os reservatórios hídricos são conhecidos como estruturas que permitem combater a escassez hídrica em regiões com variabilidade sazonal, já que conseguem armazenar volumes de água em tempos de chuva e garantir o abastecimento das demandas hídricas para irrigação em períodos de estiagem (GOMIDE, 2012).

Os sistemas de macro captação de água de chuva (Macro-WHS) foram identificados como uma das tecnologias com potencial de armazenar água em nível de pequena bacia hidrográfica para pequenos sistemas de irrigação de forma coletiva, pois permitem captar a água escoada por áreas de captação naturais para armazenamento em reservatórios superficiais capazes de atender até alguns quilômetros quadrados de área irrigada (ZAKARIA et al., 2013). Porém, poucas informações são encontradas na literatura referentes ao dimensionamento de WHS coletivos (LASAGE; VERBURG,

2015), e as que aparecem estão de forma não consolidada, em alguns poucos modelos, como os utilizados por Zakaria et al. (2013) e Adham et al. (2016).

Face ao aqui exposto é que foram definidos os objetivos do presente trabalho, que são apresentados no próximo capítulo.

A presente dissertação foi elaborada em formato de Artigo Científico¹. Apresenta-se, a seguir, uma breve descrição dos capítulos que constituem a dissertação: Capítulo 1 - INTRODUÇÃO: O presente capítulo, que busca contextualizar o tema da pesquisa, bem como justificar seus objetivos; Capítulo 2 - OBJETIVOS: Em que os objetivos geral e específicos são apresentados; Capítulo 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: Busca dar fundamentação teórica e prática necessários para o desenvolvimento da pesquisa; Capítulo 4 - ARTIGO 1: Da resposta ao objetivo específico 1 (inclui resumo, introdução, conteúdo e conclusões como qualquer artigo científico); Capítulo 5 - ARTIGO 2: Da resposta ao objetivo específico 2 (inclui resumo, introdução, conteúdo e conclusões como qualquer artigo científico); Capítulo 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES: Recopila as principais conclusões dos artigos e formula recomendações para futuras pesquisas; e REFERÊNCIAS - todas as referências bibliográficas citadas no corpo da dissertação são apresentadas com o devido detalhe.

¹ A formatação da dissertação em artigo científico está prevista no regimento interno do PPGEA/UFES e possui diretriz geral própria para a sua elaboração.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Contribuir para o dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de macro sistemas de captação de água de chuva (Macro WHS) para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar fatores intervenientes na e métodos potencialmente aplicáveis à determinação e a avaliação da capacidade de reservação hídrica para Macro WHS.
2. Para uma bacia piloto, avaliar os fatores intervenientes no e métodos-suporte à determinação e avaliação da capacidade de reservação hídrica para Macro WHS.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA AGRICULTURA IRRIGADA EM PEQUENOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

A gestão integrada de recursos hídricos (GIRH) promove o desenvolvimento coordenado da água, da terra e dos recursos relacionados para maximizar o bem-estar ambiental, social e econômico (HASSING et al., 2009). A GIRH procura garantir a disponibilidade de água para as futuras gerações promovendo o uso racional da água, o gerenciamento integrado e participativo dos recursos hídricos, a mitigação dos efeitos dos eventos extremos, utilizando a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento (LANNA, 1995).

No que concerne ao gerenciamento de recursos hídricos, destaca-se o setor agrícola pelo fato deste, no geral, impactar significativamente a qualidade e disponibilidade da água e do solo no mundo (USAID, 2015). E para potencializar a aplicabilidade da GIRH em bacias hidrográficas com uso de água na agricultura irrigada, Leporati et al., 2014 recomendam a incorporação de ferramentas políticas e tecnológicas que permitam o acesso à informação, fontes de financiamento e assistência técnica em comunidades rurais.

A disponibilidade hídrica em algumas regiões pode não atender integralmente as necessidades da agricultura em períodos de estiagem, gerando consequências negativas no desenvolvimento do setor, como a redução da produção de alimentos. A fim de incrementar a disponibilidade hídrica para o setor agrícola, devem ser dirigidos investimentos na promoção do uso racional dos recursos hídricos, na implementação de tecnologias de conservação de água e do solo, e na adoção de técnicas de reuso de águas de qualidade inferior para utilizar na agricultura (GHEYI et al., 2012).

Na atualidade, a gestão agrícola da água (neste trabalho referida por AWM) foca no aperfeiçoamento de estratégias para melhorar a gestão em regiões rurais de países em desenvolvimento (IFAD, 2012). A AWM compreende um conjunto de práticas de gestão nos níveis de bacia hidrográfica e de propriedade, cujo planejamento precisa de análises holísticas dos fatores envolvidos no sistema. A AWM procura o desenvolvimento planejado, a distribuição justa e o uso adequado dos recursos naturais, a fim de aumentar a produtividade de culturas agrícolas sob estresse

climático. Barron et al. (2015) caracterizam 3 das estratégias mais empregadas por proprietários rurais na AWM:

(i) Tecnologias *in-situ*² de conservação do solo e da água, que têm como objetivo a maximização da utilização da água da chuva através da retenção do escoamento superficial, melhorando a infiltração e a capacidade de retenção de água no solo;

(ii) Irrigação em pequena escala, referindo-se a sistemas de irrigação desenvolvidos e administrados por agricultores individuais, requerendo uma combinação de infraestrutura de armazenamento e distribuição da água;

(iii) Pequenos reservatórios, que são estruturas de armazenamento de água *ex-situ*³ de usos múltiplos, desenvolvidos e administrados pelas comunidades. Unidades de armazenamento com capacidade inferior a 1 milhão de m³, geralmente construídos com apoio externo, podendo ser técnico ou econômico (geralmente de organizações governamentais ou privadas).

A melhoria das práticas de gestão da água deve ser abordada em vários níveis: desde a propriedade até a bacia hidrográfica, passando pela legislação nacional e pela política de utilização da água. Por um lado, a gestão da água em nível de bacia hidrográfica é fundamental para mitigar os riscos de inundações e secas, aumentando, assim, a resiliência à variabilidade climática. Por outro lado, o aperfeiçoamento da gestão da água para irrigação em cada propriedade causa impacto positivo na gestão do recurso hídrico na bacia. Por isso, é de vital importância uma capacitação continuada dos irrigantes quanto ao adequado uso da água, com vistas a elevar a eficiência de aplicação e armazenamento da água, e possibilitar sua disponibilidade para outros usuários (USAID, 2015).

Nesse sentido, as escalas de pequenas e micro bacias permitem considerar melhor as causas, consequências e medidas de mitigação do déficit hídrico em pequenos

²*In-situ*: tecnologia que através de vários tipos de barreiras, captam e armazenam o escoamento das águas pluviais em campos inclinados, para uso imediato pela cultura.

³ *Ex-situ*: tecnologias que não armazenam a água na mesma área onde ela é captada; a água é armazenada em reservatórios naturais ou artificiais.

sistemas de irrigação em comparação às escalas de grandes bacias (LANNA, 1995). Desse modo, o nível de detalhe em escala de pequena e micro bacia permite uma melhor compreensão e resolução dos conflitos gerados pelo déficit hídrico entre os diferentes usuários do recurso hídrico. No presente trabalho: são consideradas pequenas bacias hidrográficas aquelas com áreas em torno de 100 km² (BATISTA, 2016); e as microbacias são sub-regiões das pequenas bacias hidrográficas. Ambas, pequenas e micro bacias, possibilitam um maior detalhamento na identificação de focos de degradação de recursos naturais e facilitam a organização comunitária por suas condições geográficas e sociais (TEODORO, 2007).

No contexto de pequenas e micro bacias tendo a agricultura irrigada como uso preponderante da água, as estratégias convencionais para minimizar os impactos potenciais dos períodos de estiagem, incluindo os conflitos entre seus usuários, baseiam-se no uso eficiente deste recurso natural, bem como no investimento em infraestrutura de reservação. Porém, a literatura reconhece que os problemas em recursos hídricos, como a escassez hídrica, são, em muito, influenciados por razões humanas comportamentais, de atitude entre os diferentes atores do sistema; por graves deficiências de gestão (LANNA, 1995; LOPES, 2011; TEIXEIRA et al., 2007). Nesse sentido, soluções para tais problemas demandam a implementação de programas de gestão integrada e participativa, contemplando o suporte institucional e de ferramentas de apoio à tomada de decisões.

Além disso, existem frequentes discussões sobre a capacidade dos pequenos produtores rurais estruturarem suas vidas em torno de um conjunto de normas próprias, em que a unidade de produção individual encontra-se subordinada às regras da comunidade onde está inserida (SCOTT, CHRISTOPHER; SILVA, 2001). Desta forma, a autogestão comunitária é uma ferramenta informal de gestão em nível local, que pode ser fundamental para o sucesso da implementação, em pequenas e micro bacias, das práticas da AWM anteriormente descritas (LANNA, 1995; LOPES, 2011; MARQUES, 2015).

3.2 SISTEMAS DE RESERVAÇÃO PARA PEQUENOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Observa-se que sistemas agrícolas, localizados geralmente em pequenas propriedades, podem receber água para irrigação de diferentes fontes: precipitação,

água do solo, aquíferos, fontes superficiais, umidade da atmosfera, e de projetos de distribuição de água. Dentre essas, as mais comuns e economicamente acessíveis são a precipitação e os fluxos de córregos e rios. Porém, em regiões áridas ou semiáridas essas fontes não atendem as demandas hídricas em alguns períodos de tempo (VAN-WAMBEKE; PRIETO-CELI; VIEYRA, 2013). Desse modo, em situações que as condições climáticas, em particular a precipitação, variem significativamente ao longo do ano, prejudicando as atividades econômicas e sociais, reservar água para pequenos sistemas de irrigação se torna uma ação de extrema importância.

Os sistemas de captação de água de chuva (WHS: do inglês Water Harvesting System) têm se tornado muito popular para a reservação de água em pequenos sistemas de irrigação com alta variabilidade hidrológica. Os WHS incluem mecanismos para concentrar, coletar e armazenar água de escoamento em diferentes tipos de estruturas de reservação como cisternas, tanques, barragens e, mesmo, o solo (LASAGE; VERBURG, 2015). Alguns dos autores consideraram os WHS como tecnologias que se ajustam de forma flexível às condições locais de pequenos sistemas agrícolas, que em sua maioria estão localizados em países em desenvolvimento (HAI, 1998; OWEIS; HACHUM, 2006; PANDEY et al., 2013; SCOTT, CHRISTOPHER; SILVA, 2001; VAN-WAMBEKE; PRIETO-CELI; VIEYRA, 2013; WISSER et al., 2010).

Lasage e Verbug (2015) classificam as técnicas de WHS que são aplicáveis para regiões áridas ou semiáridas em 4 tipos, segundo o tamanho do sistema e forma de armazenamento. São elas:

- Estruturas de reservação de água superficial de pequeno porte. São estruturas que coletam água de áreas de captação, como tetos ou superfícies cobertas de cimento. Sua capacidade de armazenamento varia entre $0,2 \text{ m}^3$ e 6 m^3 . As tecnologias podem ser tanques de ferro ou pedra, e demandam, para a sua construção, mão de obra de nível médio de qualificação.
- Estruturas de reservação de água superficial de grande porte. Podem coletar água de qualquer superfície, e possuem capacidade de armazenamento entre 5 m^3 e 20.000 m^3 . Podem ser barragens ou cisternas. As barragens necessitam de mão de obra de maior qualificação para sua construção.

- Estruturas com baixa capacidade de reservação de água no solo. Aumentam a infiltração da água no solo, e caracterizam-se pelos baixos investimentos econômicos e baixa durabilidade. Entre essas estratégias destacam-se técnicas como terraços e cultivos em curvas do nível.
- Estruturas com elevada capacidade de reservação de água no solo. As barragens subterrâneas e barragens de areia se inserem nesta categoria, que cumprem a função de aumentar o potencial de armazenamento dos aquíferos e/ou criar aquíferos artificiais. Estas tecnologias reduzem as perdas por evaporação e a contaminação da água.

São diversas as variáveis que devem ser consideradas no processo de planejamento e dimensionamento de WHS, desde as variáveis físicas e econômicas até variáveis culturais e políticas (LASAGE; VERBURG, 2015; OWEIS; HACHUM, 2006; PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012). Entre elas, as variáveis físicas estão diretamente relacionadas com o balanço hídrico e a estimativa da disponibilidade hídrica, e sua influência pode ser quantificada pelas relações analíticas e/o empíricas que governam esses fenômenos. Porém, as influências no dimensionamento de reservatórios das variáveis sociais, econômicas, políticas e culturais são mais difíceis de se quantificar e comparar, e geralmente não são contempladas no processo de dimensionamento de WHS.

Entre as características sociais, políticas e culturais que podem viabilizar ou inviabilizar projetos de WHS, identificaram-se a definição dos direitos do uso da água e da terra, a percepção dos usuários sobre os benefícios dos reservatórios, e a capacidade de gerenciamento do sistema (MUTEKWA; KUSANGAYA, 2006; OWEIS; HACHUM, 2006; SCOTT, CHRISTOPHER; SILVA, 2001). Além disso, os hábitos de alimentação da população e as políticas de mercado em nível local, nacional e internacional podem determinar o impacto dos sistemas de reservação sobre o local de interesse (MDEMU, 2008; PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012; SCOTT, CHRISTOPHER; SILVA, 2001). Embora reconheça-se que esses fatores não são, no geral, incluídos em processos de dimensionamento de WHS, destaca-se, nesse sentido, o esforço do projeto *“Planning and Evaluating Ensembles of Small, Multi-purpose for the improvement of Smallholder Livelihoods and Food security: Tools and*

Procedures” (ANDREINI et al., 2009), no qual foram desenvolvidas ferramentas para incluir os fatores socioeconômicos no dimensionamento de reservatórios.

Na seleção da melhor técnica de WHS, Lasage e Verbug (2015) assinalam que os critérios físicos, culturais e socioeconômicos devem ser considerados. Por exemplo, o armazenamento de água de chuva no perfil do solo para o uso de culturas é mais barato e eficiente do que o armazenamento do escoamento em tanques escavados. Entretanto, é importante ressaltar que a implantação da unidade de reservação de forma individual (em nível de propriedade) ou coletiva (em nível de comunidade) influencia o tamanho da estrutura e as diferenças nos custos de inversão e de operação. Por isso é necessário considerar, conjuntamente, vários critérios para selecionar a melhor tecnologia para um sistema específico.

Apresentam-se, a seguir, algumas considerações para selecionar o tipo de WHS mais apropriado para aumentar a disponibilidade hídrica para pequenos sistemas de irrigação organizados em pequenas bacias hidrográficas:

- Alguns autores ressaltam a importância de implementar sistemas de reservação de água no solo, por serem tecnologias de baixo custo (HAI, 1998; LASAGE; VERBURG, 2015; SHINDE; SMOUT; GORANTIWAR, 2004; VAN-WAMBEKE; PRIETO-CELI; VIEYRA, 2013). Porém, reconhecem que a capacidade de armazenamento do solo é limitada, e destacam a necessidade de se implementar reservatórios que colem e armazenem o escoamento superficial, aumentando assim a disponibilidade hídrica em uma região com alta variabilidade hidrológica ao longo do ano.
- Reservatórios de grande a pequeno porte podem ser implementados com o propósito de aumentar a disponibilidade hídrica e a produtividade agrícola. Vários autores reconhecem os grandes benefícios da implementação de grandes reservatórios multiusos, porém, ressaltam que os mesmos podem ser desfavoráveis em pequenos sistemas de irrigação, pelos conflitos com outros usuários (como o industrial ou o doméstico) e pela falta de assistência institucional característica nessa escala (PANDEY et al., 2013; PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012; VENOT, de FRAITURE; ACHEAMPONG, 2012; NGIGI et al., 2005; e SCOTT; SILVA, 2001). Por isso, recomendam implementar tecnologias de armazenamento de pequeno porte, que promovam

a desconcentração dos pequenos sistemas de irrigação e facilitem a participação da comunidade no seu planejamento e operação.

- Identificou-se que poucas vezes os reservatórios em pequenos sistemas de irrigação são considerados como unidades de armazenamento de um sistema integrado (VENOT; DE FRAITURE; ACHEAMPONG, 2012), uma vez que, frequentemente, essas unidades são construídas de forma individual, por projetos distintos e diferentes agentes, sem nenhum tipo de integração e que, pelo número e densidade de suas estruturas, podem provocar diferentes compensações e impactos ao sistema (ABDELMAHMOOD; ELRAMLAWI; MOHAMED, 2015; ADHAM et al., 2016; ANDREINI et al., 2009; ZAKARIA et al., 2013). Dessa maneira, esses autores têm considerado o planejamento em nível de bacia hidrográfica para identificar essas compensações e impactos do sistema.
- Venot, de Fraiture e Acheampong (2012) ressaltam que os altos custos de construção, os baixos rendimentos, a baixa capacidade de gestão e a baixa sustentabilidade de investimentos são algumas das desvantagens características da implementação de pequenos reservatórios para fins de irrigação. Entretanto, alguns autores identificam que o planejamento de reservatórios coletivos traz maiores benefícios técnicos, econômicos e sociais ao sistema em comparação ao planejamento isolado, especialmente em nível de propriedade (ANDREINI et al., 2009; LASAGE; VERBURG, 2015; PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012; SCOTT, CHRISTOPHER; SILVA, 2001).

O presente trabalho volta-se para os WHS de pequeno porte - aqueles definidos por terem capacidade de armazenamento de água inferior a 1 milhão de m³ (Lasage e Verburg, 2015; Payen; Faurès e Vallée, 2012) – onde: cada unidade de reservação será considera como unidade de armazenamento de um sistema integrado de WHS em nível de bacia hidrográfica; e os problemas relativos a custos de construção, baixa capacidade de gestão e baixa sustentabilidade serão mitigados mediante o uso coletivo das unidades de armazenamento (um reservatório para dois ou mais usuários). Na Tabela 1 apresentam-se vantagens e desvantagens associadas à implementação de reservatórios de pequeno porte.

Tabela 1. Vantagens e desvantagens associadas à implementação de reservatórios de pequeno porte de WHS.

Vantagens	Desvantagens
- Compatível com a realidade econômica e social de pequenos sistemas agrícolas¹. - Flexível às condições físicas, sociais e econômicas locais, bem como ao gerenciamento e alocação das demandas^{1,5}. - Baixo custo por reservatório (valor absoluto \$/reservatório); materiais e mão de obra acessíveis; e requerem uma estrutura institucional e organizacional simples². - Facilita a desconcentração das unidades de reservação de água e a participação da comunidade tanto no dimensionamento como na operação das unidades/dos sistemas de reservação¹. - Diversifica usos e atividades econômicas; diversifica as culturas e melhora a qualidade nutricional da população^{1,2}. - Reduz externalidades sociais e ambientais em comparação com reservatórios de grande porte¹. - Favorece a percolação e a recarga aquíferos, bem como retarda o processo de escoamento³. - Operacionalmente eficiente devido aos baixos períodos de resposta, às reduzidas perdas de transpote de água e à capacidade de acumular água mais de uma vez ao ano⁵. - Mitiga os efeitos do déficit hídrico e da variabilidade climática^{1,2}.	- Múltiplos enfoques (cultural, social, econômico, político, institucional, ambiental, etc.) e alta complexidade dos sistemas (diferentes usuários e cultivos). Isso dificulta a integração dos enfoques e a inclusão de todos os atores no planejamento de reservatórios^{1,3}. - Altos custos por unidade de volume armazenado (valor relativo \$/m³ de água reservado), recursos econômicos limitados, baixa sustentabilidade dos investimentos e baixa visibilidade dos benefícios^{1,2}. - Dificuldade de ser replicada indiscriminadamente, pela diversidade dos contextos^{1,2,3}. - Compromissos inconsistentes entre usuários e instituições, práticas de corrupção e ilegalidade relacionadas com os investimentos para a implementação das estruturas de reservação^{1,2}. - Baixa capacitação técnica para o planejamento e operação dos reservatórios, têm apontado baixos desempenhos dos mesmos^{1,2}. - Sensível a eventos extremos: em anos úmidos podem ter vazamentos e em anos secos podem não atingir a demanda do sistema⁵. - Altas perdas por evaporação devido à alta relação Área-Volume das estruturas de reservação de pequeno porte, que também são sensíveis à sedimentação, com redução da vida útil⁵. - Conflitos pelo uso da terra: os reservatórios geralmente são aproveitados por elites locais². - Dificuldade de monitoramento e controle pela autoridade, por serem muitas estruturas, pequenas e dispersas⁴.

Referências:

- 1: VENOT, J.-P.; DE FRAITURE, C.; ACHEAMPONG, E. N. **Revisiting Dominant Notions: A Review of Costs Performance and Institutions of Small Reservoirs in Sub-Saharan Africa.** (IWMI Research Report 144). International Water Management Institute, Colombo- Sri Lanka, 2012, 39 p.
- 2: PAYEN, J.; FAURÈS, J.; VALLÉE, D. **Small Reservoirs and Water Storage for Smallholder Farming: The case for a New Approach.** AGWATER solutions. Agriculture Water Management Business Proposal Document. 2012, 60 p.
- 3: ROCKSTRÖM, J. **Water Resources Management in Smallholder Farms in Eastern and Southern África: an Overview.** Earth, p. 1–20, 2000.
- 4: ANDREINI, M. et al. Small Multi-Purpose Reservoir Ensemble Planning. Pn46, 2009, 55 p.
- 5: SHINDE, M.; SMOUT, I.; GORANTIWAR, S. D. **Algorithms for sizing reservoirs for rainwater harvesting and supplementary irrigation.** Hydrology: Science {&} Practice for the 21st Century, v. II, p. 480–486, 2004.

A seguir, são descritas algumas diferenças da implementação coletiva de reservatórios de WHS em comparação com a implementação individual dessas estruturas:

1. Econômicas (considerando os custos de implementação e operação, a capacidade de armazenamento e a vida útil dos reservatórios). Lasage e Verbug (2015) destacam que as estruturas com capacidade maior que 5.000 m^3 têm custos relativos menores. Dessa forma, o planejamento coletivo traz benefícios econômicos explicados pelas economias de escala.
2. Uso da terra. Os reservatórios planejados em nível de propriedade não superam algumas centenas de m^2 e precisam de área de reservação de aproximadamente 20% da propriedade (PANDEY; PANDA; PANIGRAHI, 2006; PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012), enquanto que o tamanho de reservatórios coletivos depende da área irrigada e das áreas disponíveis para reservação e captação (que podem ser de magnitudes de alguns km^2). O planejamento coletivo depende fortemente dos direitos sobre as águas e as terras do local, o que pode gerar conflitos pelos usos das terras e assim dificultar o desenvolvimento de projetos de reservação de água de forma coletiva (OWEIS; HACHUM, 2006; SCOTT, CHRISTOPHER; SILVA, 2001; SRIVASTAVA, 1996).
3. Desempenho. Espera-se diferenças no desempenho de um WHS quando eles são planejados individualmente ou coletivamente. No planejamento coletivo os reservatórios são implementados em série, onde a área de captação do primeiro servirá como área de captação do seguinte (ABDELMAHMOOD; ELRAMLAWI; MOHAMED, 2015; ADHAM et al., 2016; SRIVASTAVA, 1996). Adham et al. (2016) compararam, através de um modelo hidrológico, o rendimento de 25 reservatórios em uma bacia de montanha de 50 ha na Tunísia considerando 2 cenários: no primeiro assumiu-se que os reservatórios não tinham relação entre si (realidade atual); e no outro que os reservatórios trabalhavam de forma integrada. Como resultado, a porcentagem de reservatórios que conseguem atender a demanda hídrica das culturas do local é significativamente maior para o cenário coletivo. Além disso, reservatórios planejados coletivamente tendem a ter volumes maiores, reduzindo as perdas por evaporação e infiltração, pela relação área/volume que implica a

geométrica dessas estruturas, e melhorando sua eficiência em pequena escala (PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012).

4. Governança. A implementação de reservatórios coletivos precisa maior capacidade de gerenciamento comparado com os reservatórios individuais, sendo fundamental a participação das comunidades e o fortalecimento das relações interinstitucionais (LASAGE; VERBURG, 2015).

Dentro das diferentes tecnologias de reservação disponíveis como WHS, destaca-se a implementação de macro sistemas de captação de água chuva (Macro WHS), que captam a água escoada por grandes áreas de captação naturais para armazenamento em reservatórios escavados. Os Macro WHS são eficientes para aumentar a disponibilidade de água em sistemas de irrigação de alguns km² de área irrigada e por isso podem ser utilizados para planejamento coletivo de reservatórios em nível de bacia hidrográfica (ZAKARIA et al., 2013). Por isso, recomenda-se a aplicação de macro WHS como uma das estratégias para aumentar a disponibilidade hídrica anual em pequenos sistemas de irrigação. Esta consideração permite implementar um reservatório de milhares de metros cúbicos para irrigar centenas de km² de cultivo de diferentes propriedades, reduzindo os custos de inversão e as perdas de água, e melhorando seu desempenho (ADHAM et al., 2016; ANDREINI et al., 2009; PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012; SCOTT, CHRISTOPHER; SILVA, 2001).

3.3 DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS

O dimensionamento de reservatórios é um processo complexo, dependente de fatores físicos, econômicos, sociais e culturais. O processo de dimensionamento leva em consideração, entre outros, a densidade, configuração e dimensões dos reservatórios, a forma em que suas águas serão transportadas e os sistemas de irrigação que serão abastecidos (SRIVASTAVA, 1996).

Em muitos casos, a capacidade de armazenamento de água para um dado local é calculada como o volume anual regularizado (VR), que é entendido como aquele programado para ser retirado anualmente do reservatório, sempre que houver disponibilidade (STUDART, TICIANA; CAMPOS, 2001). Portanto, sua determinação depende, diretamente, das séries temporais de disponibilidade de água e de demanda hídrica do sistema de irrigação.

Segundo o uso e tratamento de dados, os métodos para definição do volume útil dos reservatórios podem ser classificados como: estocásticos e determinísticos (PLÍNIO, 2013).

Os métodos estocásticos são governados por teorias desenvolvidas por matemáticos e hidrólogos que estabeleceram os princípios básicos para o dimensionamento de reservatórios: 1 - o volume de armazenamento deve ser proporcional ao desvio padrão das afluências aos reservatórios; e 2 - existe uma curva de regularização da vazão que fornece o armazenamento recomendado para cada nível de regularização (razão entre o volume de água saindo do reservatório, para irrigação, e volume de entrada no reservatório). Neste sentido, destaca-se que os reservatórios devem ser dimensionados de forma proporcional ao desvio padrão das afluências, e que se deve considerar o fator de risco e o horizonte de planejamento (GOMIDE, 2012).

Os métodos determinísticos calculam a diferença entre as vazões regularizada de um reservatório e a de entrada no mesmo, para cada intervalo de tempo, ao longo do horizonte de planejamento. Para estes métodos são necessárias séries de vazões, que podem ser geradas por modelos ou medidas em campo. Em pequenas bacias hidrográficas, o emprego de métodos determinísticos no dimensionamento de reservatórios de água é recomendado pela simplicidade de seus processos, e pode se dar na etapa de planejamento de qualquer projeto de reservação de água (Lopez e Santos, 2002).

O dimensionamento apropriado de sistemas de reservação deve indicar o número, a capacidade e a localização espacial dos reservatórios (SRIVASTAVA, 1996), o que será denominado como configuração do Macro-WHS. Do ponto de vista econômico, Srivasta (1996) ressalta a importância de definir apropriadamente a configuração do sistema de reservatórios, já que a mesma impacta a eficiência tanto do transporte da água no sistema como da tecnologia de irrigação, sendo, com isso, definidora dos custos de inversão e da viabilidade do próprio sistema de reservação. Nos trabalhos de Srivastava (1996) e Shinde, Smout e Gorantiwar (2004) a configuração do sistema de reservação foi a seguinte: um número de reservatórios posicionados em série, em que, de montante para jusante, o primeiro reservatório tem uma área de captação não irrigada; a área de captação do segundo reservatório corresponde à área de irrigação do primeiro, e assim, sucessivamente, até o último reservatório.

No sentido de contribuir com o planejamento de reservatórios em pequenos sistemas de irrigação, alguns autores desenvolveram diferentes modelos hidrológicos e indicadores que tentam dar resposta à definição da configuração para sistemas de reservação de água (ANDREINI et al., 2009; SHINDE; GORANTIWAR; SMOUT, 2004; SHINDE; SMOUT; GORANTIWAR, 2004; SRIVASTAVA, 1996). Para isso foram desenvolvidos modelos de otimização que permitem avaliar diferentes alternativas de configurações, utilizando técnicas de programação linear, não linear e otimização multiobjectivo (GEORGIU E PAPAMICHAIL, 2008, HACHUM; AHMED E MOHAMMAD, 2007; SHINDE; SMOUT E GORANTIWAR, 2004; SRIVASTAVA, 1996). Porém, não foram identificados métodos que permitam a definição da configuração a partir das características do sistema. Entretanto, alguns autores utilizam indicadores para avaliar a densidade dos reservatórios e seu potencial de armazenamento hídrico (SHINDE; GORANTIWAR; SMOUT, 2004; SRIVASTAVA, 1996; WISSER et al., 2010).

Os indicadores utilizados para avaliar a densidade dos reservatórios e o potencial de armazenamento são relações das componentes chaves de um Macro-WHS para sistemas de irrigação: área de captação; área ocupada pelas unidades de reservação ou reservatórios; e área de irrigação (SRIVASTAVA, 1996). A área de captação permite coletar a água proveniente da chuva para armazená-la nas unidades de reservação ou reservatórios, para posterior utilização no suprimento do déficit hídrico dos cultivos na área de irrigação. Os indicadores identificados foram: razão entre a área de captação e a área irrigada (CCR); razão entre a área de captação e a área de reservação (CSR); e razão entre a área de reservação e a área de irrigação (SCR).

Shinde, Gorantiwar e Smout (2004) estudaram as relações entre CCR, CSR e SCR dos reservatórios existentes em 9 regiões agroclimáticas na Índia, concluindo que existem grandes variações nos valores desses indicadores e que falta informações para comparar e compreender os resultados. Wisser et al. (2010) discutiram a importância de definir CCR para adotar uma configuração de reservatórios, e indicaram que essa configuração deverá ser função da variabilidade sazonal e da capacidade de reservação do sistema. Além disso, Wisser et al. (2010), Shinde, Smout e Gorantiwar (2004), e Srivastava (1996), apontam que o aperfeiçoamento da configuração de reservatórios resulta da minimização de CCR, já que esse é proporcional às perdas por evapotranspiração e percolação. Portanto, são

recomendados valores de CCR entre 3 e 5. Enquanto Wisser et al. (2010) utilizaram valores específicos de CCR (entre 1 a 5), para definir a densidade de reservatórios por célula de 10 km² de área de reservação, Hai (1998) utilizou uma expressão analítica para estimar a CCR ideal em função da disponibilidade hídrica e da demanda hídrica das culturas.

3.4 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Os modelos computacionais são ferramentas de auxílio à tomada de decisões, baseada na utilização de informações de dados externas e de relações matemáticas, que representam os fenômenos físicos característicos para um dado sistema. No caso da gestão dos recursos hídricos, os modelos matemáticos relacionados ao dimensionamento de reservação hídrica são utilizados para compreender as dinâmicas e os impactos dos recursos hídricos em alguma região. Recorrendo-se, nesses casos, a tratamento de informações geográficas, tratamento estatísticos de séries temporais, modelos chuva vazão, determinação de variáveis agroclimatologias, programação linear e não linear, entre outras técnicas pertinentes (GEORGIU; PAPAMICHAIL, 2008; PANDEY et al., 2013; SHINDE; SMOUT; GORANTIWAR, 2004; SRIVASTAVA, 1996).

No caso de dimensionamento de reservatórios, a complexidade do modelo computacional e as técnicas a implementar dependerão tanto da definição das variáveis de entrada como de suas relações interdependentes, e da definição das condições de simulação - tempo de simulação, intervalo de tempo, escala e objetivo do modelo (SRIVASTAVA, 1996).

Dessa maneira, as variáveis selecionadas para alimentar modelos computacionais em suporte ao dimensionamento de sistemas de reservação para pequenos sistemas de irrigação diferem de um estudo para outro, segundo o objetivo de estudo. Por exemplo, em estudos em que se procura avaliar a capacidade de reservação de uma região para atender os requerimentos hídricos de irrigação em diferentes condições climáticas, são incluídas variáveis referentes a funções de produção água-cultura e seu impacto com a variação climática (GEORGIU; PAPAMICHAIL, 2008; WISSER et al., 2010). Em outros estudos incluíram-se variáveis relativas ao material

construtivo, às dimensões do reservatório e à produção de sedimentos (ABDELMAHMOOD; ELRAMLAWI; MOHAMED, 2015; NGIGI et al., 2005; PANDEY; PANDA; PANIGRAHI, 2006) para avaliar os custos e a vida útil dos reservatórios. Não entanto, outros autores consideraram variáveis como: as práticas de manejo de irrigação, as perdas de água por transporte, e o número e a localização dos reservatórios (SHINDE; SMOUT; GORANTIWAR, 2004; SRIVASTAVA, 1996) para otimizar o dimensionamento dos sistemas de reservação.

As condições do modelo computacional - à escala de planejamento, o intervalo de tempo e o horizonte de planejamento - também diferem nos trabalhos que contribuem ao dimensionamento de reservatórios. Na sequência são descritas algumas considerações feitas em alguns estudos na definição do intervalo de tempo e do tempo de simulação.

- O intervalo de tempo pode ser definido como diário, decendial, mensal ou sazonal; levando em consideração que os pequenos reservatórios são apropriados para suprir o déficit hídrico sazonal e não o déficit interanual que se dá pela ocorrência de eventos extremos (NGIGI et al., 2005; PANDEY et al., 2013; WISSER et al., 2010). Entretanto, a definição do intervalo de tempo diário ou decendial é preferida para o balanço hídrico do solo (em caso de se desejar incluir a umidade do solo) e para executar os modelos chuva-vazão. Porém, as séries diárias e decendias podem ser agregadas em séries mensais ou sazonais para facilitar o balanço hídrico e para aumentar a representatividade da sazonalidade do regime pluviométrico ao longo do ano (GEORGIU; PAPAMICHAIL, 2008; ZAKARIA et al., 2013). Identificou-se também uma preferência quanto ao uso de intervalos diários de tempos para planejamento em nível de propriedade (COHIM et al., 2007; MDEMU, 2008; NGIGI et al., 2005; PANDEY et al., 2013; PANDEY; PANDA; PANIGRAHI, 2006) e intervalos mensais de tempo para planejamento em bacia hidrográfica ou regional (ADHAM et al., 2016; AL-ANSARI et al., 2012; SHINDE; SMOUT; GORANTIWAR, 2004; SRIVASTAVA, 1996; ZAKARIA et al., 2013).
- Quanto ao tempo de simulação, para o dimensionamento de reservatórios é recomendável contar com séries históricas de precipitação maiores que 10 anos, sendo preferíveis séries mais longas (HAI, 1998). Porém, é difícil obter

séries extensas em locais onde são implementados pequenos sistemas de irrigação, sendo necessário definir o horizonte de planejamento considerando os custos e a vida útil dos pequenos reservatórios (PANDEY; PANDA; PANIGRAHI, 2006). Nesse sentido, foram identificados trabalhos com simulações para diferentes extensões de séries históricas, variando de 1 a 30 anos. Por exemplo, Pandey et al. (2013) utilizaram registros diários por três anos em suas simulações, enquanto Ngigi et al. (2005) e Roy, Panda e Panigrahi (2009) utilizaram registros de precipitação diários com extensão de 16 e 26 anos, respectivamente. No entanto, alguns autores recomendam estabelecer um tempo mínimo de simulação de 5 anos (ROY; PANDA; PANIGRAHI, 2009; WISSER et al., 2010).

Dado que a precipitação é uma das variáveis físicas de maior relevância dentro dos modelos computacionais relacionados ao dimensionamento de reservatórios - porque é entrada para o balanço hídrico dos reservatórios, para a estimativa da demanda hídrica de irrigação e para a estimativa das séries de escoamento superficial (GEORGIU; PAPAMICHAIL, 2008) – apresentam-se, a seguir, algumas observações a respeito desta variável que podem ser úteis para a modelagem:

- Em relação à fonte de dados, é recomendável monitorar a precipitação com um pluviômetro localizado na área de implantação do reservatório, cujos registros devem ser corrigidos com informações de estações de monitoramento próximas (VAN-WAMBEKE; PRIETO-CELI; VIEYRA, 2013). Porém, à exceção de alguns estudos (Mdemu; 2008 e Roy, Panda e Panigrahi; 2009), em pequenos sistemas de irrigação não se costuma ter disponível dados de precipitação monitorados nesse nível de escala local, mas, sim, registros históricos de precipitação de estações vizinhas ou base de dados globais para definir as séries de precipitação, o que implica em maior grau de incerteza nas simulações de modelos computacionais.
- É importante considerar a variabilidade temporal da chuva e estabelecer que condições de precipitação devem ser utilizadas nas simulações hidrológicas, guiando-se pelo objetivo do projeto. Georgiou e Papamichail (2008), Pandey et al. (2013) e Abdelmahmood, Elramlawi e Mohamed (2015) reconhecem que uma análise simples da precipitação ajuda a entender o impacto sazonal, das

condições secas e úmidas, no dimensionamento do reservatório. Entretanto, para efeito de exemplificação: em seu estudo, Pandey et al. (2013) concluíram haver maiores benefícios na implementação de reservatórios quando a simulação do modelo desenvolvido por eles é realizada em épocas secas e não em épocas úmidas; já no caso de Abdelmahmoos, Elramlawi e Mahamed (2015), foi concluído que a área de irrigação e a capacidade de armazenamento do reservatório aumentam consideravelmente quando a simulação é realizada para condições úmidas em comparação com as condições normais e secas.

- Contudo, a definição das condições de precipitação para consideração no dimensionamento de reservatórios também pode ser ambígua. Pandey et al. (2013) define as condições normais, médias e úmidas com base numa porcentagem da média da série de precipitações: para condições moderadamente secas e secas (70% e 40% da precipitação normal, respectivamente) e para condições moderadamente úmidas e úmidas (130% e 160% da precipitação normal, respectivamente). Por outro lado, Georgiou e Papamichail (2008), Van-Wambeke, Prieto-Celi e Vieyra (2013), Hai (1998) e Pandey, Panda e Panigrahi (2006) utilizam a probabilidade de garantia, que se refere à probabilidade específica de ocorrência de uma precipitação mínima provável, como uma forma de considerar a variabilidade interanual das chuvas considerando o risco de eventos secos. Van-Wambeke, Prieto-Celi e Vieyra (2013) recomendam utilizar níveis de garantia de precipitação entre 50 e 75% para situações onde se tem confiança nos registros de precipitação e onde a variabilidade espacial é pequena. Porém, em situações de alta variabilidade e vulnerabilidade hídrica, esses autores recomendam o emprego de probabilidades de garantia de precipitação na faixa de 80-90%. Probabilidades de garantia entre 75% e 80% são empregadas comumente para dimensionar os sistemas de captação de água de chuva, já que representam um ano seco com um período de retorno de cinco anos (HAI, 1998; ROY; PANDA; PANIGRAHI, 2009; WISSER et al., 2010). Georgiou e Papamichail (2008) ressaltam a importância de se escolher apropriadamente o nível de garantia da chuva para dimensionar reservatórios, uma vez que isto afetará nos custos de implementação do sistema e em suas regras de operação: níveis de garantia baixos conduzem a reservatórios de grandes capacidades de reservação,

porém com baixas ou menores oportunidades de enchimento; por outro lado, reservatórios planejados com base em altos níveis de garantia de chuva possuirão menores capacidades e altas probabilidades de enchimento.

3.5 DEMANDA HÍDRICA DAS CULTURAS

A água armazenada nos reservatórios é utilizada para prover a demanda hídrica de irrigação, que corresponde ao volume mínimo necessário para suprir o déficit hídrico dos cultivos. A estimativa da demanda hídrica de irrigação dependerá do clima, do tipo e área da cultura a irrigar, do calendário de cultivo, das práticas de manejo e conservação do solo e do tipo de sistema de irrigação adotado (GEORGIU; PAPAMICHAIL, 2008). Quando a demanda é superestimada, o volume de regularização é maior que o necessário, trazendo custos maiores de investimento e aumentando as perdas por evaporação. Quando a demanda hídrica é subestimada, o reservatório não conseguirá atender as demandas do sistema, podendo provocar perdas econômicas e aumentar os conflitos entre os diferentes usuários. Neste sentido, uma boa estimativa da demanda hídrica é necessária para definir com certa precisão o volume de água necessário para suprir o déficit hídrico em pequenos sistemas de irrigação.

Apesar da importância da demanda hídrica, poucas vezes são conhecidos e monitorados os volumes de água captados para irrigação numa bacia hidrográfica, especialmente em sistemas de irrigação de pequena escala, onde as culturas e os manejos variam significativamente de um local para outro em função das práticas adotadas por cada produtor. E, dada a escassez dessas informações, e com o propósito de prover séries de demanda para a execução dos modelos hidrológicos que darão resposta ao dimensionamento de reservatório, a demanda hídrica, em geral, se calcula a partir de relações empírico-analíticas e de informação disponível nesta escala (ALLEN et al., 2006).

Na sequência, são feitas algumas considerações para a determinação de demanda hídrica de irrigação:

- O intervalo de tempo para o balanço hídrico do solo pode ser diário, decendial ou mensal, sendo o intervalo diário o mais utilizado para pequenos sistemas de irrigação, já que o mesmo permite avaliar as práticas de irrigação e de manejo

do solo (GEORGIOU; PAPAMICHAIL, 2008). Porém, Van-Wambeke, Prieto-Celi, Vieyra (2013) recomendam utilizar balanços de longo prazo, que não levam em consideração a influência do solo como reservatório de armazenamento de água, e onde a lâmina a irrigar é definida como o déficit acumulado entre a precipitação efetiva e a evapotranspiração da cultura.

- Ao que se refere às características fisiológicas da cultura, diferentes estudos calcularam a evapotranspiração - variável de interesse para a determinação da demanda hídrica, ver item 3.3.1 - para cada uma das culturas e para cada um de seus estágios de desenvolvimento, utilizando o método da FAO (ALLEN et al., 2006) (PANDEY et al., 2013; SHINDE; SMOUT; GORANTIWAR, 2004; WISSER et al., 2010). Porém, em bacias hidrográficas com alta diversidade de cultivos e de produtores, a definição dos calendários de cultivos e a identificação dos coeficientes de cultura se torna uma tarefa difícil de se resolver, acrescentando incertezas nesta etapa do processo de planejamento. Por isso, Van-Wambeke, Prieto-Celi e Vieyra (2013) sugerem que em caso de se ter diversas culturas presentes, a estimativa da demanda hídrica seja feita de forma simplificada, assumindo ser a evapotranspiração a mesma para todas as culturas, de valor equivalente à evapotranspiração de referência de um cultivo padrão. Cohim et al. (2007) optaram por adotar o maior coeficiente de cultivo entre as diferentes etapas de desenvolvimento e as diferentes culturas do sistema, tomando o coeficiente de cultura para o maior estágio de desenvolvimento da cultura da banana (cultura de maior necessidade hídrica). Pandey et al. (2013) utilizaram os coeficientes das 4 fases de desenvolvimento da cultura de feijão para simular o balanço hídrico do solo numa propriedade da Índia com diferentes culturas temporárias. Já Wisser et al. (2010) estimaram a demanda hídrica a nível global para quantificar o potencial da implementação de pequenos reservatórios na agricultura irrigada - para isso, foram identificadas e caracterizadas 172 culturas por meio da análise de imagens de satélites e informação secundária de usos do solo, onde o coeficiente para cada cultura e estágio de desenvolvimento foi definido por meio da base de dados disponibilizadas pela FAO (ALLEN et al., 2006).
- Muitas são as características e as implicações do tipo de cultura sobre a gestão da demanda de irrigação e, portanto, sobre o dimensionamento e desempenho

de reservatórios. Entre elas, destacam-se: a sensibilidade das culturas ao déficit hídrico; a profundidade radicular; a duração, a produtividade e o valor comercial e nutricional dos cultivos. Abdelmahmood, Elramlawi e Mohamed (2015), Georgiou e Papamichail (2008) e Mdemu (2008) avaliaram como a seleção e a distribuição de culturas pode afetar o rendimento dos reservatórios, manifestando evidências relevantes sobre a importância da distribuição e tipo de culturas na modelagem de reservatórios. Por outro lado, Van-Wambeke, Prieto-Celi e Vieyra (2013) e Pandey et al. (2013) destacam a importância de conhecer e compreender as informações sobre o déficit hídrico vegetal para orientar e modificar as datas de plantio e diminuir o déficit hídrico. Além disso, reconhece-se que uma adequada seleção de culturas e o estabelecimento apropriado de calendários de cultivo podem reduzir a demanda para irrigação e dar pautas para a operacionalização e rendimento de pequenos reservatórios (GEORGIOU; PAPAMICHAIL, 2008; NGIGI et al., 2005; PANDEY et al., 2013). Por outro lado, as análises de versatilidade realizada por Srivastava (1996) mostram que as alterações na afinidade das culturas não modificam significativamente os parâmetros de dimensionamento de sistemas de reservação.

- No que se refere às condições climáticas, existem muitos métodos para estimar a evapotranspiração de referência (ver item 3.3.1) que se diferenciam entre si, seja pelos parâmetros climatológicos necessários ao seu emprego, seja pelo seu embasamento físico. Alguns estudos calcularam essa variável através da implementação do método padrão da FAO, Penman-Monteith, usando dados climáticos de estações vizinhas (ABDELMAHMOOD; ELRAMLAWI; MOHAMED, 2015; ROY; PANDA; PANIGRAHI, 2009; MDEMU, 2008). Outros autores obtiveram dados de bases de estações climatológicas e usaram softwares para interpolar valores para o local de interesse (Wisser et al., 2010).
- Dentre as características do solo que influenciam o balanço hídrico e, por consequência, o cálculo da lâmina de irrigação têm-se: a capacidade de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP), e a disponibilidade total de água no solo (DTA). Estas características definem a quantidade de água no solo disponível para as plantas e permitem estudar os diferentes manejos de irrigação. Por exemplo, no algoritmo de Shinde, Smouth e Gorantiwar (2004)

são consideradas diferentes combinações e estratégias de irrigação conforme o nível de umidade antecedente no solo e à profundidade de irrigação. Ngigi et al. (2005) ressaltaram que as práticas de manejo por parte dos produtores do seu estudo causaram perdas de 50% do volume da água, e que os ajustes dessas práticas em épocas de estiagem poderiam aumentar o desempenho dos reservatórios. Nesse sentido, Gerorgiou e Papamichail (2008) desenvolveram um modelo de otimização que permite determinar as políticas apropriadas para operar reservatórios, entre elas a de alocação de água para irrigação dos diferentes cultivos e sobre os padrões de cultivo. Os mesmos autores demonstraram que a estratégia preferida pelo modelo de otimização é a irrigação deficitária, que consiste em aplicar deliberadamente lâminas de irrigação inferiores às necessidades hídricas reais da cultura, afetando consequentemente a sua produção.

3.5.1 Evapotranspiração

Para estimar a demanda hídrica da cultura é necessário calcular a evapotranspiração (ET), que equivale, conjuntamente, à perda da água pela evaporação na superfície do solo e pela transpiração das plantas. A evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente, por isso não é simples estimar cada uma por separado. Por um lado, a evaporação pode ser definida por meio da informação referente à quantidade de água disponível nos horizontes do solo e da radiação que entra no sistema, e pode ser estimada por variáveis climatológicas. Por outro lado, a transpiração é função do tipo, densidade, dos padrões e da fase de crescimento da cultura, bem como da água disponível no solo e dos métodos de manejo de irrigação (ALLEN et al., 2006).

A evapotranspiração de referência (ET_0) é um parâmetro que permite relacionar as variáveis climatológicas com ET, e é definida como a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, sob condições padronizadas (o teor de água do solo fica próximo da capacidade de campo para uma superfície de referência semelhante à grama), para um dado intervalo de tempo. Os métodos para calcular ET_0 variam desde aqueles mais simples, com base puramente empírica, até aqueles que apresentam embasamento físico consistente sobre o fenômeno. A seleção dos métodos vai depender da precisão que se deseje obter e da disponibilidade de dados

climatológicos (Allen et al., 2006). Porém, a FAO recomenda utilizar o método Penman-Monheit, pela consistência mostrada em diferentes experimentos.

Considerando a grande variedade de modelos disponíveis para a obtenção de ET_0 , há aqueles que têm uma boa base física e teórica, mas que requerem vários parâmetros que nem sempre estão disponíveis. A FAO recomendou a adoção do método Penman-Monteith, tornando-se método padrão para o cálculo das necessidades hídricas das culturas. A estimativa de ET_0 pelo método Penman-Monteith se aproxima de ET padrão da grama nos locais avaliados e apresenta estimativas mais representativas da realidade em relação aos outros métodos (Allen et al., 2006). Este método, além de procurar representar de maneira consistente o fenômeno biofísico da evapotranspiração, alimenta-se de várias variáveis climatológicas, como se pode observar na Equação 1.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Onde, ET_0 é a evapotranspiração de referência (mmd-1), Rn é o saldo de radiação na superfície da cultura (MJ m⁻²d⁻¹), G é o fluxo de calor no solo (MJ m⁻²d⁻¹), U_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura do solo (ms⁻¹), e_s é pressão de saturação de vapor (kPa), e_a é a pressão real de vapor (kPa), $e_s - e_a$ é o déficit de pressão de vapor (kPa), Δ é a declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹), e γ a constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

A FAO desenvolveu uma metodologia que permite calcular ET_0 pelo método Penman-Monteith com os seguintes dados: temperatura mínima e máxima do ar (T_{min} e T_{max}); umidade relativa do ar (HR), velocidade do vento (U_2) e radiação extraterrestre (R_a ; podendo ser calculada pelas coordenadas do local). Os passos para calcular ET_0 encontram-se descritos no guia de evaporação de culturas da FAO (ALLEN G. et al., 2006). Muitos programas computacionais estimam ET_0 utilizando a metodologia da FAO, entre eles o programa CROPWAT ⁴- neste caso podendo oferecer valores de

⁴ FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. *CropWat*. Disponível em: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>. Acesso em: 29 jul. 18.

ET₀ diários, mensais e decendiais, a partir dos dados climáticos mensais já mencionados.

Entretanto, em situações em que se disponha de poucos tipos de dados climatológicos, como apenas temperatura do ar (média, mínima e máxima) e precipitação, Allen et al. (2006) recomendam utilizar o método Hargreaves Samani como alternativa para estimativa da ET₀, dado pela Equação 2.

$$ET_0 = 0,0023(T_{med} + 17,8) * (T_{max} - T_{min})^{0,5} R_a \quad (2)$$

Onde T_{med} é a temperatura média do ar; T_{med}, T_{min} e T_{max} em °C; e R_a em mm/dia.

A evapotranspiração da cultura (ET_c) equivale à ET para uma cultura específica, em um determinado estágio de desenvolvimento, e sem restrição hídrica para um dado intervalo de tempo. Ressalta-se que ET_c varia durante o ciclo das culturas. Na prática, esse parâmetro é estimado alterando a evapotranspiração de referência (ET₀) por meio de sua multiplicação por um coeficiente que caracteriza o tipo e a fase de desenvolvimento da cultura, denominado coeficientes de cultura (k_c) (ALLEN et al., 2006).

ET_c pode ser calculado para as condições padrão (campos extensos, boas condições agronômicas e sem limitações de umidade no solo) com emprego do método descrito pelo FAO (ALLEN et al., 2006). Nele, ET_c é obtido pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET₀) pelo coeficiente de cultivo (k_c), como mencionado anteriormente.

Segundo Allen et al. (2006), a seleção do método para determinação de k_c deve ser realizada de acordo com os objetivos do projeto, a precisão desejada, a disponibilidade de dados climáticos e o horizonte de tempo de planejamento.

Para calcular k_c em função da etapa de desenvolvimento da cultura, Allen et al. (2006) recomendam construir uma curva a partir de valores de k_c para as etapas inicial, média e final da cultura, que podem ser calculados experimentalmente ou podem ser consultados na base de dados da FAO. Os valores de k_c para as etapas inicial, média e final e a duração de cada fase de desenvolvimento são apresentados no capítulo 6 do Boletim n° 56 da FAO (Allen et.al, 2006), para diferentes culturas em condições

climáticas padrão, que são definidas para climas subúmidos (umidade relativa mínima aproximada de 45%), com velocidades de vento moderadas (menores que 2m/s).

Programas como CROPWAT e a planilha para outorga da ANA (2014) ajudam a realizar os cálculos e correções para a obtenção de ET_c para intervalos de tempo diário, decendial ou mensal. Porém, para utilização de ambos os programas é necessário conhecer as datas de plantio, os coeficientes de cultura e a duração de cada estágio de desenvolvimento, informações que, geralmente, não estão disponíveis em pequenas bacias hidrográficas com pequenos sistemas de irrigação, onde múltiplos usuários irrigam diversas áreas de cultivo em diferentes períodos.

3.5.2 Lâmina de irrigação

Em sistemas de irrigação, a demanda hídrica é estimada por meio da necessidade hídrica das culturas (NHL). O cálculo de NHL depende do volume de água necessário e da frequência de irrigação para compensar o déficit hídrico do solo no período vegetativo. Para balanços de longo prazo, com intervalos de tempo de simulação mensal ou anual, presume-se que o armazenamento de água no solo (ΔS) é desprezível. Nesse caso, NHL corresponde ao déficit entre a precipitação efetiva (P_{ef}) e ET_c . Para balanços de curto prazo com intervalos de tempo de simulação inferiores a 10 dias, é necessário considerar ΔS no cálculo de NHL, para o qual é preciso incluir as práticas de manejo e a capacidade de infiltração de água no solo como variáveis do balanço (NGIGI et al., 2005; PANDEY et al., 2013).

P_{ef} corresponde à porcentagem da precipitação armazenada no solo até a profundidade das raízes, que fica disponível para as culturas (ANA, 2014). Na prática, é difícil determinar P_{ef} , que é estimado a partir de fórmulas empíricas. Para sua estimativa, ANA (2014) considerou: a precipitação provável mensal - que equivale a uma precipitação específica de ocorrência com base em séries históricas (foi tomada como aquela com nível de garantia de 80%, $P(80)$, e calculada por meio da análise de frequências da série histórica); e a precipitação efetiva P_{ef} - definida como a parte da precipitação que fica disponível para os cultivos (foi determinada utilizando a Equação 3, desenvolvida pelo SCS-USDA; nela P_{ef} e $P(80)$ são representados em mm):

$$P_{ef} = \begin{cases} \frac{P(80) * (125 - 0,2 * P(80))}{125} & \text{Para } P(80) < 250 \text{ mm} \\ 125 + 0,1 * P(80) & \text{Para } P(80) > 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

Tendo em vista que todo sistema de irrigação apresenta perdas no seu processo, é necessário incluí-las na estimativa da demanda hídrica. Dessa forma, a lâmina de irrigação (LI) é definida como o valor de NHL dividido pela eficiência do sistema de irrigação.

Para obter P(80) é necessário realizar análise de frequência, método analítico para determinar variáveis hidrológicas como a precipitação e a vazão, para os períodos de retorno desejados. As curvas de frequência são uma expressão dos dados hidrológicos sobre uma base probabilística, já que permitem estimar a frequência com que uma variável é igualada ou excedida (FAO, 2000).

Para estimar o volume da chuva para diferentes níveis de garantia Critchley e Siebert (1996, apud VAN-WAMBEKE; PRIETO-CELI; VIEYRA, 2013) propõem um método que permite calcular esse valor em função do nível de probabilidade e do número de observações ou amostras disponíveis. Para isso, os valores da série são ordenados do maior ao menor, para, em seguida, se calcular a probabilidade sazonal, mensal ou anual, como dado na Equação 4:

$$P(\%) = (m-0,375)/(N+0.25)*100 \quad (4)$$

Onde P (%) corresponde a probabilidade em que o valor do evento pode ser excedido, m é a faixa do valor do evento (1 para o menor valor, N para o maior valor), e N é o número total de observações (meses, anos, dias).

Com os valores de probabilidade, estabelece-se uma curva de correlação entre a garantia do evento e a precipitação, que também é conhecida por função de probabilidade acumulada. Por meio dessa curva, podem ser interpolados os valores de precipitação para um dado nível de garantia.

3.5.3 Software CROPWAT

CROPWAT 8.0⁵ é um software computacional que permite calcular os valores da necessidade hídrica das culturas (NHL) e da lâmina de irrigação (LI) em intervalos de

⁵ FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. *CropWat*.

tempo diário ou decendial, para cada sistema de irrigação presente na região de estudo.

O software é prático, e pode ser executado tendo-se dados específicos sobre os solos, o clima e as culturas da área de aplicação. Além disso, o programa é capaz de realizar simulações para diferentes padrões de cultura. Os parâmetros de entrada do software são: coordenadas do local, precipitação e variáveis climatológicas mensais, tipo de culturas, duração das fases de desenvolvimento e datas de plantio por cultura.

O software inclui bases de dados sobre parâmetros das culturas e climáticos a nível global (CLIMWAT). Essas características são úteis em regiões sem ou com pouca informação. Além disso, o software faz as correções referentes às condições locais com a informação climatológica e com os calendários de cultivos segundo a recomendação da FAO.

3.6 DISPONIBILIDADE HÍDRICA

A disponibilidade hídrica é a vazão ou o volume de água que pode ser utilizado nas diversas atividades de consumo e desenvolvimento da sociedade, em determinado período de tempo (SOARES; PINHEIRO; HEIL, 2010). É uma variável de grande importância no planejamento regional, porém de difícil determinação/caracterização, pela natureza estocástica das variáveis climatológicas e pela complexidade dos subprocessos envolvidos (infiltração, evapotranspiração, escoamento).

As incertezas sobre a disponibilidade hídrica podem inviabilizar, por exemplo, um projeto de reservatório para fins de irrigação, em especial, quando a disponibilidade real é menor que a estimada, já que isso pode provocar falhas no sistema de reservação, colocando em risco a produção agrícola do local de interesse.

A definição da disponibilidade hídrica em corpos de águas superficiais depende, entre outros, das condições climáticas e físicas (como tipo de solo e relevo) do local, e, geralmente, é estimada a partir da interpolação de séries históricas obtidas de estações fluviométricas (OEA, 2004). Para alguns lugares, a densidade de estações no local e o comprimento das séries limita o emprego da interpolação para estimar a disponibilidade hídrica. Logo, métodos indiretos como a regionalização (relações entre o escoamento e variáveis climáticas ou morfológicas), modelos chuva-vazão e o

balanço hídrico são empregados nesses casos (OEA, 2004; SILVEIRA; TUCCI, 1998; SOARES; PINHEIRO; HEIL, 2010).

A estimativa da disponibilidade hídrica continua sendo um tema atual de pesquisa na área do gerenciamento / da gestão de recursos hídricos, em particular em regiões com escassez de dados, aí se inserindo, no geral, as pequenas e micro bacias hidrográficas rurais no Brasil com uso preponderante da agricultura irrigada (POGIAN, 2016; SARAIVA; FERNANDES; NAGHETINI, 2011).

Silveira e Tucci (1998) identificaram três métodos para estimar a disponibilidade hídrica em pequenas bacias com escassez de dados fluviométricos: 1- a construção de modelos chuva-vazão; 2- a definição de equações de regionalização; e 3- medições diretas no local de interesse. Por um lado, as equações de regionalização não são recomendadas para pequenas bacias (menores que 100 km²) pelas divergências entre as escalas espaciais e temporais das bacias de referência nos modelos de regionalização, já que estas bacias de referência, geralmente, são de magnitudes maiores que aquelas (SARAIVA; FERNANDES; NAGHETINI, 2011; SILVEIRA; TUCCI, 1998). Por outro lado, as medidas diretas no local não apresentam um bom potencial para projetos ou planejamentos a médio e longo prazos, como nos casos de reservatórios. Portanto, muitos guias para o dimensionamento de reservatório para pequenos sistemas de irrigação recomendam o emprego de modelos chuva-vazão (HAI, 1998; PAYEN; FAURÈS; VALLÉE, 2012; VAN-WAMBEKE; PRIETO-CELI; VIEYRA, 2013).

Um modelo chuva-vazão é uma representação matemática simplificada dos processos que ocorrem no ciclo da água em uma bacia hidrográfica, sendo utilizado para simular as respostas da bacia a eventos de precipitação (SARAIVA; FERNANDES; NAGHETINI, 2011). Em outras palavras, o modelo chuva-vazão estabelece uma relação entre o volume precipitado e o volume escoado produzido em uma dada área de drenagem/de captação. Os modelos chuva-vazão variam em função da complexidade das suas formulações e processos representados, tais como tipo de clima, escala espacial, número de parâmetros, disponibilidade de dados, entre outros (SILVEIRA; TUCCI, 1998; STEENHUIS et al., 2009).

Os métodos mais utilizados para estimar o volume escoado em situação de escassez de dados são os modelos chuva-vazão. Entre eles, o mais utilizado é o método do

Número de Curva do Soil Conservation Service – SCS, atualmente National Resources Conservation Service (NRCS), do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (COHIM et al., 2007; PANDEY et al., 2013; ZAKARIA et al., 2013), que define a porcentagem da chuva que produz escoamento superficial a partir de dados do tipo, manejo e cobertura do solo. Porém, outros métodos, como o WBMplus ou o Racional, foram utilizados por alguns autores para o cálculo da disponibilidade hídrica: O método WBMplus foi usado por Wisser et al. (2010) em função das condições do local, incluindo o uso e a textura do solo, topografia e fatores socioeconômicos; o método Racional, que define um coeficiente de transformação da chuva em escoamento para cada bacia em particular, foi utilizado, por exemplo, por Mdemu (2008), que estimou o coeficiente de escoamento para a região de estudo através de informação experimental.

O método do Número da Curva (CN) foi desenvolvido para pequenas bacias rurais dos Estados Unidos e incorpora o efeito das características de infiltração de água no solo, uso da terra e práticas agrícolas. Este método estima o escoamento superficial produzido por um evento de chuva de intensidade conhecida. Baseia-se no uso de coeficientes tabulados (Número de Curva ou CN) que definem o comportamento do complexo hidrológico tipo-cobertura do solo relacionado nas tabelas do NRCS (NRCS, 2004). O parâmetro CN, que pode variar entre 0 e 100, procura definir o potencial de escoamento superficial produzido por uma bacia em função do tipo e cobertura do solo, e do conteúdo de umidade antecedente (AMC). Modificações do método incluem a influência da declividade sobre a produção de escoamento (1995 apud Williams; NEITSCH et al., 2005, p.102).

Em nível de bacia hidrográfica, nessa temática, destacam-se os trabalhos de Zakaria et al. (2013) e Adham et al. (2016). Zakaria et al. (2013) utilizaram um modelo hidrológico (modificação do método do Número de Curva do SCS) que permite quantificar o volume potencial da água a ser armazenado por um sistema de captação de águas chuvas, no qual CN é ajustado às condições de umidade antecedente do solo e à inclinação do terreno – os resultados mostraram que cada sub-região hidrológica considerada no estudo, para os mesmos eventos de chuva, comparativamente, produziu diferentes lâminas de escoamento. Adham et al., 2016 chegaram à mesma conclusão, calculando diferentes coeficientes de escoamento para cada uma das áreas de captação de 25 reservatórios.

Van-Wambeke, Prieto-Celi e Vieyra (2013) reconhecem que a seleção do método chuva-vazão deve ser cuidadosa, e recomendam a área de captação como critério principal de definição do método. Nesse sentido, para macro WHS, dá-se preferência ao método SCS em relação ao método racional, pela extensão da área de captação.

4 ARTIGO 1: CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO HÍDRICA DE SISTEMAS DE MACRO CAPTAÇÃO DE ÁGUAS DE CHUVA PARA PEQUENOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS

4.1 RESUMO

Os sistemas de macro captação de água de chuva (Macro-WHS), constituem-se numa das soluções recomendadas para mitigar os efeitos do déficit hídrico de forma coletiva (uma unidade de reservação para abastecer dois ou mais usuários) em comunidades rurais que praticam a agricultura irrigada em pequena escala. No entanto, a literatura apresenta poucas informações sistematizadas referentes ao dimensionamento de Macro-WHS, particularmente para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas, assim como também aponta para as limitações quanto à disponibilidade de dados em subsídio ao referido dimensionamento. Dessa forma, apresenta-se uma proposta metodológica desenvolvida com o objetivo de subsidiar a avaliação da capacidade de reservação hídrica de Macro-WHS para pequenos sistemas de irrigação, em pequenas bacias hidrográficas, a qual contempla procedimentos para a determinação do volume potencial total de reservação (VR), bem como de alguns indicadores que permitam a qualificação deste volume no contexto da bacia hidrográfica ou de sub-regiões que a compõem. A metodologia contempla apenas fatores físicos para a determinação de alguns parâmetros hidroclimatológicos e relativos às culturas agrícolas demandantes de irrigação, e sugere métodos alternativos aplicáveis em pequena bacia hidrográfica, visando atender, de forma coletiva, as necessidades de reservação hídrica anuais para pequenos sistemas de irrigação.

PALAVRAS-CHAVE: sistemas de macro captação; água de chuva; reservação hídrica; pequenos sistemas de irrigação; metodologias de dimensionamento e avaliação.

4.2 INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para o desenvolvimento econômico e social das civilizações, porém limitado em termos de disponibilidade quantitativa e qualitativa, tanto espacial como temporal, devido, entre outros, ao aumento das demandas hídricas e à variabilidade hidrológica. A redução da disponibilidade hídrica pode

impactar o desenvolvimento de diferentes setores econômicos, dentre eles a agricultura irrigada.

A agricultura irrigada consome cerca de 70% da água de uso consultivo e contribui com, aproximadamente, 40% da produção de alimentos no mundo (FAO, 2015a). O impacto do déficit hídrico sobre a agricultura irrigada coloca em risco o crescimento econômico e a segurança alimentar mundial, especialmente em países em desenvolvimento que dependem da agricultura familiar, a qual se utiliza, em sua maioria, de pequenos sistemas de irrigação (PANDEY et al., 2013; LASAGE; VERBURG, 2015). Dado que os pequenos sistemas de irrigação são, particularmente, vulneráveis a eventos de déficit hídrico (XIE; YOU; TAKESHIMA, 2017), faz-se necessário fortalecê-los por meio do gerenciamento da água na agricultura irrigada nesta escala e, assim, contribuir com a segurança alimentar e com o alívio da pobreza (FAO, 2015b).

Neste contexto, o armazenamento de água se torna uma ferramenta de suporte ao gerenciamento da água na agricultura, permitindo aumentar a disponibilidade hídrica e mitigar os efeitos do déficit hídrico em pequenos sistemas de irrigação, contribuindo com o desenvolvimento da agricultura. Os sistemas de captação de água de chuva (WHS siglas em inglês para Water Harvesting Systems) foram identificados entre as tecnologias com potencial de aumentar a disponibilidade hídrica em regiões caracterizadas pela agricultura irrigada (VAN-WAMBEKE; PRIETO-CELI; VIEYRA, 2013; LASAGE; VERBURG, 2015).

Para pequenos sistemas de irrigação, alguns autores identificaram que o planejamento de sistemas de reservação coletivos (uma unidade de reservação abastecendo dois ou mais usuários) traz maiores benefícios técnicos, econômicos e/ou sociais ao sistema, em comparação com o planejamento de unidades individualizadas (ZAKARIA et al., 2013; LASAGE; VERBURG, 2015; ABDELMAHMOOD; ELRAMLAWI; MOHAMED, 2015; ADHAM et al., 2016). Os sistemas de macro captação de água de chuva (Macro-WHS) foram identificados como uma das tecnologias com potencial de armazenar água para pequenos sistemas de irrigação de forma coletiva, pois permitem captar a água escoada por áreas de captação naturais para armazenamento em reservatórios superficiais capazes de atender até alguns quilômetros quadrados de área irrigada (ZAKARIA et al., 2013).

Porém, poucas informações são encontradas na literatura referentes ao dimensionamento de WHS coletivos (LASAGE; VERBURG, 2015), e as que aparecem estão de forma não consolidada, em alguns poucos modelos, como os utilizados por Zakaria et al. (2013) e Adham et al. (2016).

A determinação da capacidade de reservação de um WHS se baseia no princípio do balanço hídrico, armazenando o excedente de água em tempos de chuva para disponibilização em tempos de estiagem. Porém, a disponibilidade de dados (séries históricas de vazões e de demandas hídricas) que permitem executar o balanço hídrico tem se mostrado limitada em regiões caracterizadas por pequenos sistemas de irrigação (ANDREINI et al., 2009; WISSER et al., 2010). Diferentes métodos têm sido desenvolvidos para estimar o volume escoado e/ou a demanda de irrigação a partir da informação disponível nessa escala (AL-ANSARI et al., 2012; ZAKARIA et al., 2013; ADHAM et al., 2016). Contudo, esses métodos não são flexíveis à qualidade de dados potencialmente disponíveis em pequenos sistemas de irrigação.

O uso de pequenas bacias hidrográficas como unidade de planejamento de água para fins de irrigação promove a integração entre a gestão formal de recursos hídricos e a autogestão comunitária da água em regiões de base agrícola familiar, ou seja, cogestão. No entanto, o sucesso dessa integração depende da disponibilidade de dados e informações, bem como de metodologias de tratamento e análise de dados nesta escala geográfica, que, por um lado, tem sido uma deficiência apontada na literatura especializada e, por outro, contribuído para um aumento do número de estudos / pesquisas sobre o assunto (POGIAN, 2016; MARQUEZ, 2015).

Nesse sentido, o presente artigo pretende subsidiar o dimensionamento da capacidade de reservação hídrica para Macro-WHS- considerado como uma etapa preliminar no dimensionamento desses sistemas de reservação- em pequenas bacias hidrográficas caracterizadas pelo uso de pequenos sistemas de irrigação por meio da:

- 1- identificação de fatores intervenientes (físicos, socioeconômicos, etc.) nessa escala; e
- 2- proposição de uma metodologia que permita tanto o dimensionamento da capacidade de reservação do Sistema, considerando a diversidade e a qualidade de dados potencialmente disponíveis nos pequenos sistemas de irrigação, bem como disponibiliza indicadores para interpretação dessa capacidade de reservação.

4.3 FATORES INTERVENIENTES NO DIMENSIONAMENTO DA CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO PARA PEQUENOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

O dimensionamento da capacidade de reservação de água para uma bacia hidrográfica é um processo complexo, dependente de fatores físicos, econômicos, sociais e culturais (LASAGE; VERBURG, 2015), e que deve levar em consideração, entre outros, a necessidade hídrica das culturas (denominada demanda hídrica) e a capacidade do sistema de produzir escoamento (denominada disponibilidade hídrica).

Para a definição da capacidade de armazenamento, usualmente são realizadas simulações computacionais que utilizam o princípio do balanço hídrico entre as séries históricas de disponibilidade e demanda hídricas do sistema para um dado intervalo de tempo, ao longo do período de planejamento. Porém, a falta de dados e a natureza estocástica das variáveis hidrológicas de interesse dificultam o dimensionamento dos sistemas de reservação hídrica.

Identificaram-se diferentes métodos para estimar séries de disponibilidade e de demanda de água para irrigação, entre eles: monitoramento dos parâmetros físicos no local (NGIGI et al., 2005); utilização de base de dados globais; e análises estatísticas (WISSER et al., 2010). Outras ferramentas, como as metodologias participativas, têm sido utilizadas para incorporar o conhecimento local no processo de dimensionamento (ANDREINI et al., 2009), enquanto que o processamento de imagens de satélites e o emprego de sistemas de informação geográfica são usados para compreender a variação espacial de alguns dos parâmetros de interesse (WISSER et al., 2010; BARRON et al., 2015). Alguns autores utilizam a relação entre a área de captação e a área irrigada (CCR) como indicador para avaliar o potencial de armazenamento hídrico do local (SRIVASTAVA, 1996; SHINDE; GORANTIWAR; SMOUT, 2004; WISSER et al., 2010).

Sabe-se que são vários os fatores envolvidos no dimensionamento da capacidade de reservação para pequenos sistemas de irrigação, e que esses podem influenciar na viabilização técnica, social e econômica dos Macro-WHS. Os fatores mais empregados nos modelos de simulação são do tipo físico e econômico, mas também se reconhece que fatores socioeconômicos e culturais, bem como relacionados a modelagem podem influenciar no dimensionamento da capacidade de reservação do sistema. A Tabela 2 descreve alguns desses fatores.

Tabela 2. Fatores que podem influenciar no processo de dimensionamento de unidades de reservação de Macro-WHS para pequenos sistemas de irrigação (Autoria própria)

Fator	Descrição
<i>Fatores Físicos</i>	
Clima	Inclui diferentes variáveis climatológicas como radiação solar, temperatura do ar, umidade, velocidade do vento. Os fatores climáticos influenciam na demanda hídrica requerida pelas plantas e no balanço hídrico do reservatório.
Precipitação	A precipitação é uma variável temporal e influencia tanto no cálculo do déficit hídrico das culturas ⁶ , como na estimativa de escoamento e no balanço hídrico do reservatório.
Uso e tipo do Solo	O uso do e tipo de solo podem influenciar no balanço hídrico do solo e na estimativa do escoamento superficial, alterando a determinação das séries de demanda e disponibilidade hídrica.
Manejo da irrigação	As práticas de manejo como a densidade do cultivo, a frequências de irrigação e/ou os calendários de cultivos influenciam diretamente no cálculo da demanda de irrigação e, portanto, no balanço hídrico do reservatório.
Características das culturas	As culturas podem ser caracterizadas pelos seus requerimentos hídricos, pela sua sensibilidade ao déficit hídrico, pelos padrões de cultivo e por seus estágios de desenvolvimento. Influenciam diretamente na estimativa da demanda hídrica para irrigação.
<i>Fatores sócio econômicos e culturais</i>	
Governança	Refere-se às instituições e seu nível de formalidade para gerenciar e coordenar o planejamento dos sistemas de reservação. Influencia na acessibilidade de dados, na inclusão dos usuários e na integração de outros sistemas e medidas. Em outras palavras influencia na definição dos atores e fatores do modelo.
Econômicos	Os fatores econômicos vão influenciar no tipo de tecnologias de irrigação e reservação e, portanto, na sua eficiência e na estimativa das séries de demanda e disponibilidade hídrica.
Culturais	As preferências alimentares e os conhecimentos locais, como as preferencias nutricionais e a relação das comunidades como os recursos naturais, incidem na estimativa da demanda hídrica.
<i>Fatores da Modelagem</i>	
Intervalo de tempo	A escolha do intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Em geral, quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados.
Escala geográfica de planejamento	A escala de planejamento dependa da resolução e da disponibilidade dos dados e das restrições dos métodos utilizados. Afeta a precisão dos resultados, quanto menor a escala de planejamento, maior a precisão dos resultados.
Horizonte de tempo	O horizonte do tempo, depende dos dados disponíveis e do período de planejamento do modelo: curto, médio e longo prazos. Vai afetar a determinação do valor da capacidade de reservação.
Enfoque	Refere-se ao tratamento dado às séries medidas ou sintéticas, podendo ser determinístico ou estocástico. Isso vai afetar a determinação das séries de demanda e disponibilidade hídrica.

⁶ É a diferença entre a quantidade demanda pelas plantas para o seu crescimento (necessidade hídrica das plantas) e a água disponível em forma de precipitação, sempre que o valor seja positivo.

4.4 A PROPOSTA METODOLÓGICA

A metodologia proposta é capaz de estimar o volume de regularização anual (VR) para subsidiar o processo de dimensionamento de sistemas de reservação de água por meio da implementação de Macro-WHS, de forma coletiva, para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas. O VR é entendido como aquele volume de água programado para ser retirado anualmente do sistema de reservação, sempre que houver disponibilidade (CAMPOS; SOUZA; LIMA, 2014); e é utilizado para estimar a capacidade de reservação hídrica de um sistema. No presente trabalho VR representa o volume capaz de atender 100% das demandas hídricas anuais para irrigação de culturas dos pequenos sistemas de irrigação, em uma bacia hidrográfica específica.

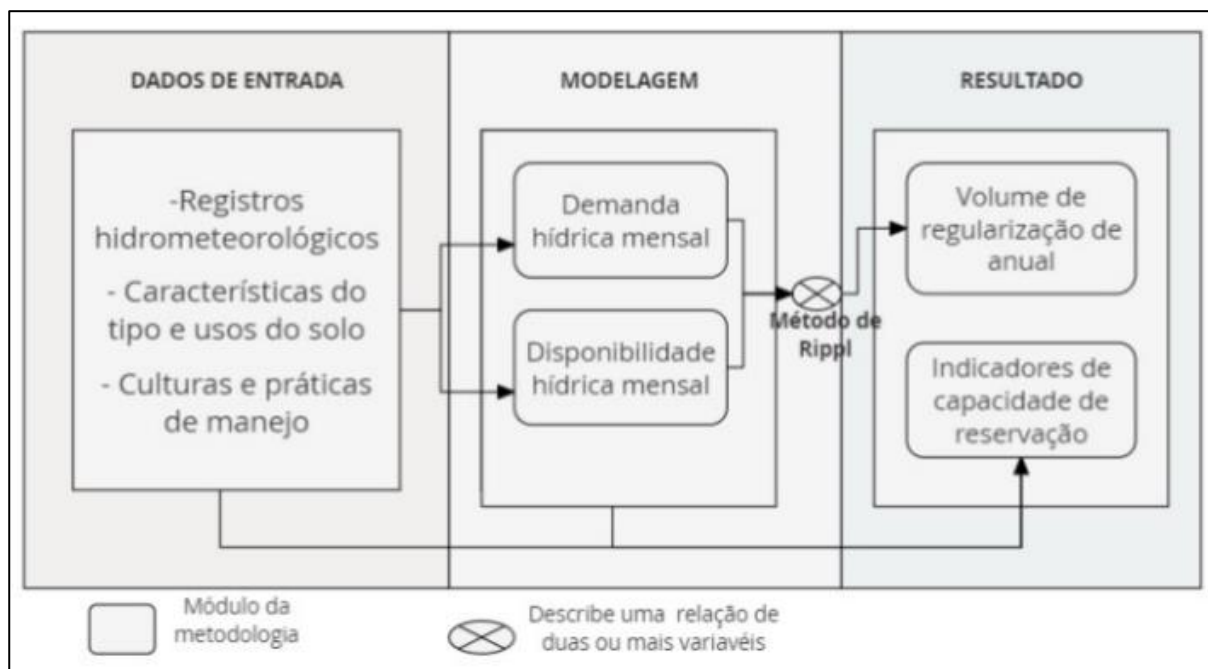
Na Figura 1, é apresentado o fluxograma da metodologia para estimar VR por meio do método do balanço hídrico e do tratamento de dados e informações potencialmente disponíveis em pequenas bacias hidrográficas, como registros históricos do clima, informações sobre usos e tipo do solo e sobre as culturas e as práticas do manejo próprias do local. Dessa forma, a metodologia recompila informações sobre aspectos físicos / características físicas do local e usa métodos aplicáveis para pequenas bacias, para estimar séries de disponibilidade e demanda hídricas do sistema de reservação, dispondo-se, ainda, de dados e informações que permitem a caracterização física do referido sistema.

O fluxograma descreve de forma geral as informações necessárias para aplicar a metodologia, indica os elementos que devem ser definidos na modelagem (as séries de disponibilidade e demanda hídricas), para logo aplicar o balanço hídrico, por meio do método de Rippl, e obter o valor de VR. Além disso a metodologia contempla a determinação de indicadores que permitem a interpretação da capacidade de reservação do sistema a partir das informações de entrada e dos resultados gerados na modelagem.

Figura 1. Procedimento proposto para subsidiar o dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de Macro WHS.

Figura 2. Procedimento proposto para subsidiar o dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de Macro WHS.

Figura 3. Procedimento proposto para subsidiar o dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de Macro WHS.



A metodologia utiliza intervalo de tempo mensal para estimar as séries de demanda e de disponibilidade hídricas e para executar o balanço hídrico do sistema de reservação pelo método de Rippl. Isso com o propósito de facilitar a estimativa de VR para Macro-WHS coletivos, planejados em nível de pequena bacia hidrográfica, e para aumentar a representatividade do regime sazonal de chuvas. Por isso, propõe selecionar um ano como período de modelagem, por meio do análises estadístico de series hidro climatológicas multianuais, que procura considerar a representatividade do ano selecionado.

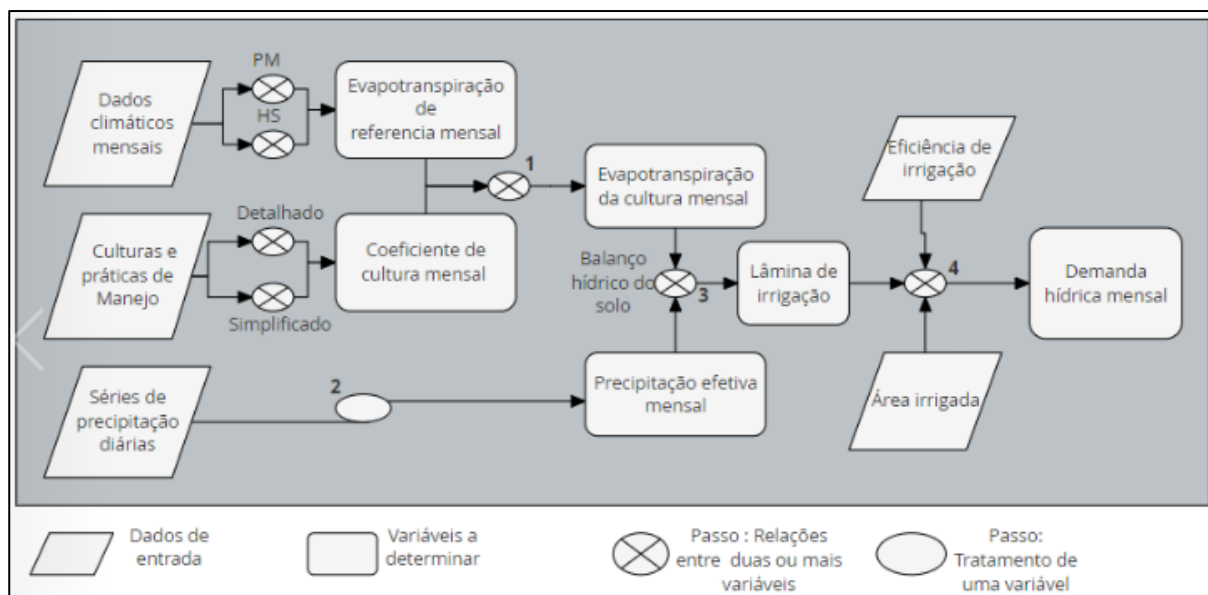
A Figura 1 apresenta de forma macro as componentes da metodologia, que são: Dados de Entrada (incluir o que se vê na figura); Modelagem (de demanda e de disponibilidade hídricas); e Resultados (capacidade de reservação do Sistema e indicadores de interpretação dessa capacidade).

4.4.1 Demanda Hídrica

Este modulo permite estimar o volume requerido mensal para fins de irrigação, tendo-se informações sobre o tipo do solo, os tipos de culturas, as práticas de manejo e as condições hidroclimatológicas na área de interesse. A metodologia permite utilizar diferentes métodos para definir as variáveis agroclimáticas segundo a qualidade de dados de entrada. A Figura 4 apresenta esquematicamente o procedimento para se

estimar a demanda hídrica mensal de pequenos sistemas de irrigação. O fluxograma, na Figura 4, descreve, de forma geral, as informações necessárias para se estimar a série de demanda hídrica mensal, assim como as variáveis estimadas e os passos que devem ser seguidos. A seguir, será justificado e descrito cada um desses passos.

Figura 4. Procedimento para estimar a demanda hídrica de Macro WHS para fins de irrigação.



Para estimar a demanda da irrigação para cada uma das culturas do local, propõe-se utilizar o método do coeficiente de cultivo (ALLEN et al., 2006), que permite estimar a evapotranspiração do cultivo (ET_c) como sendo o produto entre a evapotranspiração de referência (ET_0) e o coeficiente de cultura (k_c), e que representa as condições agroclimáticas do local (ver Equação 5).

- Passo 1. Determinação da evapotranspiração do cultivo

$$ET_c = k_c * ET_0 \quad (5)$$

Os parâmetros ET_0 e k_c devem ser estimados a partir de informações secundárias como registros do clima, características do solo, e distribuição de culturas. Contudo, a qualidade e a disponibilidade dessas informações em pequenos sistemas de irrigação são diversas e limitadas. Para a presente metodologia, são propostos dois métodos para estimar ET_0 (Penman Monheit e Hargreaves Samani) e dois para definir k_c (simplificado ou detalhado), dependendo do tipo e da qualidade dos dados de entrada.

Para o cálculo de ET_0 propõe-se utilizar o método da FAO-56 Penman-Monheit (PM), que permite calcular essa variável com os seguintes dados: temperatura mínima e máxima do ar; umidade relativa do ar; velocidade do vento; e radiação solar (podendo ser calculada pelas coordenadas do local). Os passos para calcular ET_0 se encontram descritos no roteiro de evaporação do cultivo da FAO (ALLEN et al., 2006). Muitos programas computacionais estimam ET_0 utilizando a metodologia da FAO, entre eles o programa CROPWAT. Neste caso, podendo oferecer valores de ET_0 diários, mensais e decendiais, a partir dos dados climáticos mensais já mencionados. Entretanto, em situações em que se disponha de poucos dados climatológicos, aconselha-se utilizar o método Hargreaves Samani (HS) como alternativa para estimativa de ET_0 (ALLEN et al., 2006), que precisa de dados de temperatura média, mínima e máxima do ar e da radiação solar.

Ao que se refere às características fisiológicas da cultura, representadas por k_c , alguns estudos definiram essa variável para cada uma das culturas e para cada um dos estágios de desenvolvimento, utilizando o método da FAO (SHINDE; SMOUT; GORANTIWAR, 2004; WISSER et al., 2010; PANDEY et al., 2013). Porém, em bacias hidrográficas com alta diversidade de cultivos e de produtores, a definição dos calendários de cultivos e a identificação dos coeficientes de cultura se tornam tarefas difíceis de se resolver. Por isso, Van-Wambeke, Prieto-Celi e Vieyra (2013) sugerem que, em caso de se ter diversas culturas, a estimativa da demanda hídrica possa ser simplificada, assumindo-se que a evapotranspiração é a mesma para todas as culturas, e que equivale a evapotranspiração de referência de um cultivo padrão. Dessa forma, a presente metodologia contempla duas alternativas para definir o k_c : 1. Método detalhado, que em caso de contar com informações detalhadas sobre as culturas e de datas de plantio, seguirá as especificações do roteiro 56 da FAO (ALLEN et al., 2006), segundo a especificidade dessas informações; e 2. Método simplificado, que utiliza um único coeficiente de cultura, representativo do local para todas as culturas sem discriminar a etapa de desenvolvimento.

Para executar o balanço hídrico do solo (Passo 4), é necessário transformar as series de precipitações diárias para mensais, e logo estimar a precipitação efetiva (P_{ef}), definida como à porcentagem da precipitação armazenada no solo até a profundidade das raízes, que fica disponível para as culturas (ANA, 2014). A seguir se apresenta o passo 2, que detalha o processo para obter a serie mensal de P_{ef} .

- Passo 2. Tratamento das séries de precipitação

Para estimar a P_{ef} a metodologia considera o conceito de precipitação provável mensal utilizado pela ANA (2014), onde por um lado é considerada uma precipitação específica de ocorrência com base em séries históricas; e, por outro, a parte da precipitação que fica disponível para os cultivos. A metodologia considera como precipitação provável aquela com um nível de garantia de ser igualada ou superada em 80% ou $P(80)$ [mm], que pode ser calculada por meio da análise de frequências da série histórica. Quando se tem dados de precipitação diária, estas devem ser agregadas mês a mês para realizar as respectivas análises. A P_{ef} para os cultivos é calculada por meio de relações propostas pelo SCS-USDA – Equações 6 e 7 (ANA, 2014).

$$P_{ef} = P(80) * \frac{(125 - 0,2 * P(80))}{125}; P(80) < 250 \quad (6)$$

$$P_{ef} = 125 + 0,1 * P(80); P(80) > 250 \quad (7)$$

Em sistemas de irrigação, a demanda hídrica é estimada por meio do conceito “necessidade hídrica das culturas”; ou seja, quantidade de água requerida para suprir a evapotranspiração das plantas, obtida por meio de realização de balanço hídrico do solo, gerando como resultado a lâmina de irrigação (LI) em unidades de coluna de água (mm). O cálculo de LI depende do volume de água necessário e da frequência de irrigação, a fim de compensar o déficit hídrico do solo no período vegetativo. A metodologia presume que o armazenamento de água no solo (ΔS) é desprezível, já que o período de modelagem é anual, e o intervalo de tempo é mensal. Nesse caso, o valor mensal demandado pela irrigação corresponde ao déficit entre P_{ef} e ET_c . Para balanços de curto prazo, com intervalos de tempo inferiores a 10 dias, é necessário considerar ΔS no cálculo de LI, para o qual é preciso incluir as práticas de manejo e a capacidade de infiltração do solo como variáveis do balanço (NGIGI et al., 2005; PANDEY et al., 2013).

- Passo 3. Balanço hídrico do solo

Para facilitar o tratamento das séries, propõe-se utilizar o software CROPWAT 8.0, programa de apoio à decisão desenvolvido pela divisão

de água e solos da FAO, que permite calcular os valores da evapotranspiração da cultura e das necessidades hídricas a partir de dados do solo, clima e da cultura. O software simula o balanço hídrico do sistema planta-solo-atmosfera seguindo as recomendações do roteiro 56 da FAO (ALLEN et al., 2006), e permite realizar as simulações para diferentes condições de manejo ou padrões de plantio.

Por último, deve-se estimar a demanda de irrigação mensal de água a partir de LI calculado para um mês. Para isso, é necessário contar com informações sobre a área irrigada e a eficiência de irrigação (ver Equação 8).

- Passo 4. Cálculo da demanda mensal de irrigação

$$D = \frac{LI}{1000} * \frac{A_{irr}}{\varepsilon} \quad (8)$$

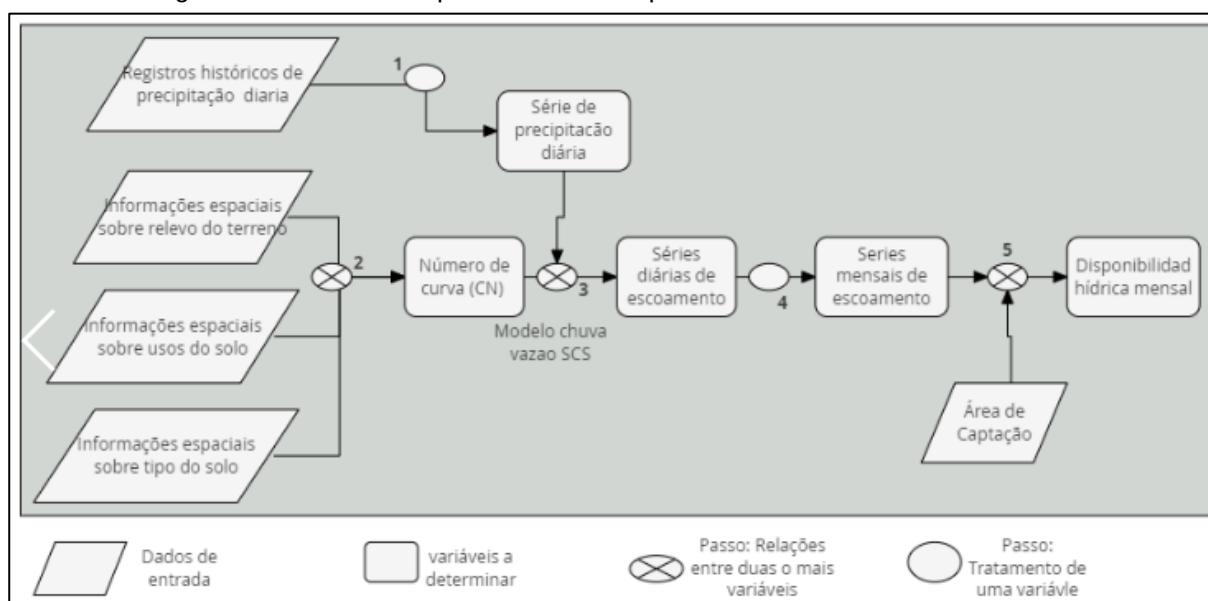
onde D [m³] é o volume demandado para fins de irrigação em um dado período, LI [mm] é a lâmina de irrigação, calculada para o mesmo período, A_{irr} [m²], é a área de irrigação no local e ε é a eficiência de irrigação do sistema.

4.4.2 Disponibilidade Hídrica

Este modulo permite estimar a disponibilidade hídrica a nível de bacia hidrográfica, calculando a produção de escoamento superficial. O volume de escoamento é estimado por meio da aplicação do modelo chuva-vazão do CN-SCS, considerando os registros de precipitação diária, o tipo e os usos do solo, e a inclinação do terreno do local de estudo. A Figura 3 apresenta esquematicamente o procedimento para se estimar a disponibilidade hídrica mensal da bacia hidrográfica de interesse. A metodologia pode ser utilizada também para a estimativa da disponibilidade hídrica por sub-bacia hidrográfica e, assim, diferenciar a produção de escoamento entre as sub-regiões, segundo a variabilidade espacial do tipo e uso do solo. O fluxograma, na Figura 5, descreve, de forma geral, as informações necessárias se para estimar a série de disponibilidade hídrica mensal, assim como as variáveis estimadas e os passos que devem ser seguidos. A seguir, será justificado e descrito cada um desses passos.

Inicialmente deve ser selecionado o ano a ser modelado, para na sequência, definir a série de precipitação e executar o modelo chuva-vazão, que pode ser feito por processos estocásticos ou determinísticos. O intervalo de tempo para aplicar o modelo chuva-vazão deverá ser diário, para considerar os efeitos da umidade antecedente do solo na produção do escoamento. A metodologia poderá ser utilizada sempre que seja definida a precipitação diária para o período de modelação, sem importar o enfoque utilizado para se chegar a ela.

Figura 5. Procedimento para estimar a disponibilidade hídrica de Macro-WHS



- **Passo 1. Série de precipitação diária a modelar**

A partir dos registros históricos diários e do critério de seleção do ano a ser modelado, deve ser escolhida a série de precipitação diária do ano a modelar.

Na sequência é preciso determinar o Número de Curva (CN), que representa o comportamento do complexo hidrológico tipo-cobertura do solo (NRCS, 2004), e, portanto, permite estimar a percentagem de chuva que se transforma em escoamento.

- **Passo 2. Determinação do CN**

Para determinar CN, devem ser classificados os solos da bacia em grupos hidrológicos de solos (GHS), segundo a classificação dos solos proposto pelo antigo Soil Conservation Service (SCS) ou de estudos regionais. Em seguida, são cruzadas as informações sobre os GHS e

sobre os usos dos solos para determinar o número de curva para as condições normais de umidade antecedente no solo CN II ou a partir das tabelas do SCS (NRCS, 2004). Posteriormente, o CN II é corrigido com respeito às condições de umidade do terreno e à declividade do terreno (ver Equações 9-11), já que esses fatores influenciam na produção de escoamento (ZAKARIAS et al., 2013).

O SCS define três condições de umidade antecedente do solo (AMC I, AMC II e AMC III), as quais correspondem às condições secas, normais e úmidas, respectivamente, com base na precipitação total ocorrida nos cinco dias antecedentes ao evento estudado. Chow (1965) estabelece as relações para estimar o valor do CN para as condições secas (CN I) e úmidas (CN III), a partir das condições normais (CN II):

$$CN I = \frac{4,2 \text{ CN II}}{10 - 0,058 \text{ CN II}} \quad (9)$$

$$CN III = \frac{23 \text{ CN II}}{10 + 0,13 \text{ CN II}} \quad (10)$$

Para ajustar o CN com a declividade do terreno, foi utilizada a metodologia de Williams (1995 apud; NEITSCH et al., 2005, p.102):

$$CN = \frac{CN III - CN II}{3} * [1 - 2 * \exp(-13,86 * incl)] + CN II \quad (11)$$

onde incl corresponde à declividade do terreno em %.

Após a determinação de CN, calcula-se a série de escoamento diário, com o modelo chuva vazão do SCS (modelo que utiliza o valor do CN para determinar o escoamento produzido por um evento de chuva com intensidade conhecida), já que é um dos métodos validados em muitos países para estimar o volume potencial de escoamento a ser armazenado pelos WHS (VAN-WAMBEKE; PRIETO-CELI; VIEYRA, 2013) e que facilita o emprego em nível de bacias hidrográficas (ZAKARIA et al., 2013; ADHAM et al., 2016). O método é descrito no passo 3.

- Passo 3. Modelo chuva-vazão CN-SCS

O modelo chuva-vazão CN-SCS, calcula a capacidade máxima de armazenamento de água no solo S [mm] e o potencial de chuva

excedente que, efetivamente, contribui para o escoamento superficial direto, Q , em mm, utilizando como parâmetro o CN.

$$Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \text{ onde } S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (12)$$

onde P [mm] corresponde à precipitação diária.

Uma vez obtida a série diária de escoamento, parte-se para a agregação dos dados para se obter a série mensal de escoamento.

- Passo 4. Transformação da série de vazão

Nesta fase, procede-se a agregação da série diária de escoamento, produto do modelo chuva-vazão, para transformá-la em série mensal, Q_t , em mm.

Por último, estima-se a disponibilidade hídrica mensal para o Macro-WHS, a partir da série mensal de escoamento e da área de captação (ver Equação 13). A área de captação é definida como a diferença entre a área da bacia e a área irrigada.

- Passo 5. Cálculo da Disponibilidade hídrica mensal

$$O_t = \frac{Q_{\text{mensal}}}{1000} * A_{\text{cap}} \quad (13)$$

onde O_t é o volume disponibilizado em m^3 para fins de irrigação mensal e A_{cap} é a área de captação no local, em m^2 .

4.4.3 Volume de Regularização

A metodologia estima o volume de regularização anual (VR) considerando as características físicas do local. Dessa maneira, os dados de entrada são dados acessíveis nessa escala (disponibilizados pelas comunidades e pelas autoridades ambientais do local), e as variáveis selecionadas são as envolvidas no balanço hídrico do sistema de reservação por meio do método de Rippl, como se apresenta no fluxograma principal da metodologia (ver Figura 1).

O método de Rippl define a capacidade potencial de armazenamento necessária para garantir uma vazão regularizada durante o período mais crítico de déficit hídrico observado (LOPES; SANTOS, 2002). Entre as vantagens do emprego do método de

Rippl ressaltam-se sua simplicidade, que permite avaliar facilmente os déficits e excedentes hídricos, e sua utilidade no emprego simultâneo com modelos de simulação e otimização (ARAÚJO; PRUSKI, 2015). Na presente metodologia, o método é utilizado como etapa inicial de dimensionamento do Macro-WHS, e permite verificar o limite superior da capacidade de reserva hídrica necessária para atingir as demandas dos pequenos sistemas de irrigação, para um dado ano.

Para à aplicação do método utilizam-se as séries de demanda e disponibilidade hídrica obtidas pelos passos descritos nas subseções anteriores, para um período de 1 ano. A aplicação é baseada no balanço hídrico do Macro-WHS, acumulando o déficit entre a demanda e a disponibilidade hídrica em cada intervalo de tempo (ver Equações 14 e 15). Para facilitar a determinação do balanço hídrico e aumentar a representatividade da sazonalidade do regime pluviométrico, o intervalo do tempo de aplicação do método de Rippl é mensal (ZAKARIA et al., 2013).

- Método de Rippl:

$$V_t = D_t - O_t \quad (14)$$

$$V_R = \sum_{t=1}^{12} V_t \text{ para } V_t > 0 \quad (15)$$

onde V_t [m³] é o volume acumulado para reserva no tempo t , D_t [m³] é a demanda para irrigação no tempo t , O_t [m³] é a disponibilidade hídrica do Macro-WHS no tempo t [m³], e t representa os meses do ano (de 1 a 12).

4.4.4 Indicadores para Interpretação da Capacidade de Reserva

A metodologia propõe indicadores para interpretar a capacidade de reserva do Macro-WHS para pequenos sistemas de irrigação, utilizando-se informações dos componentes da metodologia “Dados de Entrada” e “Modelagem”, como indicado na Figura 1. São eles: CCR – que é a relação entre a área de captação (A_{cap}) e a área de irrigação (A_{irr}); e SI – que representa o nível de escassez do local, dado pela razão entre os volumes disponível e demandado pelo sistema de reserva. Esses indicadores estão representados nas Equações 16 e 17, respectivamente. O CCR_{ideal} representa o CCR mínimo para atender a demanda hídrica das culturas considerando o potencial de escoamento da chuva (ver Equação 18).

$$CCR = \frac{A_{cap}}{A_{irr}}, \text{ sendo } A_{cap} + A_{irr} = A_{TOTAL} \quad (16)$$

$$SI = \frac{V_D}{V_o}, \text{ sendo } V_D = \sum_{t=1}^{t=12} D_t \text{ e } V_o = \sum_{t=1}^{t=12} O_t \quad (17)$$

$$CCR_{ideal} = \frac{LI_a}{Q_a}, \text{ sendo } LI_a = \sum_{t=1}^{t=12} LI_t \text{ e } Q_a = \sum_{t=1}^{t=12} Q_t \quad (18)$$

onde A_{TOTAL} refere-se à área da bacia ou das sub-regiões de estudo; V_D é o volume demandado no ano modelado; V_o é o volume de escoamento produzido no ano modelado; D_t é o volume de demanda hídrica para o mês t ; V_t é a disponibilidade hídrica no mês t ; Q_a é a lâmina escoada na bacia de estudo no ano modelado; LI_a é a lâmina de irrigação dos pequenos sistemas de irrigação no ano modelado; LI_t é a lâmina de irrigação para o mês t ; Q_t é a lâmina escoada no mês t ; e t representa os meses do ano (de 1 a 12).

Valores de CCR menores que CCR_{ideal} demonstram deficiência no potencial de captação de água para atingir 100% da demanda de água para irrigação no tempo de planejamento. Da mesma maneira, quando o SI é inferior a 1, a região mostra deficiências para atender as demandas hídricas por meio do emprego de Macro-WHS.

4.5 DISCUSSÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

O presente trabalho subsidia o dimensionamento da capacidade de reservação hídrica para Macro-WHS coletivos, planejados em nível de pequenas bacias hidrográficas caracterizadas pela existência de pequenos sistemas de irrigação. Inicialmente utilizaram-se fatores físicos envolvidos no balanço hídrico para estimar a capacidade hídrica de reservação do Macro-WHS. Na sequência, definiu-se uma metodologia que recompila e sistematiza métodos e fatores aplicáveis em pequenas bacias hidrográficas e pequenos sistemas de irrigação, considerando a diversidade e a escassez das informações característica dos pequenos sistemas de irrigação.

A metodologia apresentada neste estudo contempla os Macro-WHS, que armazenam o escoamento provocado pela precipitação para mitigar os efeitos provocados pela variabilidade sazonal das chuvas, e não pela variabilidade interanual destas. A metodologia é flexível quanto às possibilidades de aplicações frente à escassez de dados e aos dados disponíveis, e subsidia o dimensionamento da capacidade de reservação hídrica para Macro-WHS coletivos. No entanto, ressalta-se que a mesma é uma aproximação possível, mas que demanda ser avaliada em termos de desempenho e aperfeiçoamentos.

A proposta não considera as propriedades do solo como reservatório de água, já que o balanço hídrico do solo é em escala mensal. Portanto, recomenda-se incluir outros sistemas de reservação hídrica no planejamento dessas estruturas, como os provenientes das vazões dos rios (como barragens superficiais na calha dos afluentes principais) ou das águas subterrâneas (como barragens subterrâneas ou estratégias de conservação da água no solo), que podem ser dimensionadas e operadas de forma integral com os Macro-WHS.

A flexibilidade da metodologia permite considerar a diversidade de informações potencialmente disponíveis nos pequenos sistemas de irrigação, mas pode gerar incertezas no dimensionamento do Macro-WHS. Essas incertezas estão associadas à implementação de diferentes procedimentos, que dependem da qualidade dos dados de entrada (no caso da estimativa da demanda hídrica), ou do critério do modelador (no caso da seleção do enfoque para definir as séries diárias de precipitação). Essas incertezas podem induzir a um sub ou superdimensionamento do Macro-WHS e, portanto, recomenda-se estudá-las.

É importante deixar claro que a metodologia proposta subsidia a etapa preliminar de dimensionamento de Macro-WHS, referente ao dimensionamento da capacidade de reservação total, não especificando uma definição da configuração do sistema (número, local e capacidade de cada uma das unidades que comporão o sistema) que contemple o uso de vários reservatórios que, juntos, armazenem o volume total. Além disso, a metodologia só envolve variáveis físicas dentro da modelagem para se chegar ao potencial de reservação hídrica do local. Portanto, é possível aperfeiçoar a metodologia incluindo as variáveis econômicas, sociais e culturais, tanto para a definição da capacidade de reservação como a definição da configuração do sistema.

Por fim, a metodologia permite uma avaliação da capacidade de reservação para uma dada área e, portanto, torna-se uma ferramenta útil para o planejamento e implementação de Macro-WHS, em pequenas bacias hidrográficas com uso preponderante na agricultura irrigada. Assim, busca-se promover o planejamento de Macro-WHS coletivos, visando alcançar uma distribuição mais justa e equitativa da água a nível local e avançar nos assuntos de segurança hídrica e alimentar da agricultura irrigada, especialmente em países em desenvolvimento.

4.6 CONCLUSÕES

O presente estudo partiu de uma demanda de pesquisa que se evidenciou a falta de consenso na definição de métodos e limitações na disponibilidade de dados para determinar séries de disponibilidade e demanda hídrica (necessárias para definir a capacidade de reservação em Macro-WHS coletivos), em bacias hidrográficas caracterizadas por pequenos sistemas de reservação. Dessa maneira, foram identificados fatores que influenciam no dimensionamento da capacidade de reservação hídrica e construída uma metodologia que pode funcionar como roteiro para as autoridades governamentais e locais no processo de planejamento desses tipos de sistemas, contribuindo para o desenvolvimento agrícola das comunidades rurais e, portanto, com o alívio das seguranças hídrica e alimentar.

5 ARTIGO 2: DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO HÍDRICA DE SISTEMAS DE MACRO CAPTAÇÃO DE ÁGUAS DE CHUVA: APLICAÇÃO NA BACIA DO CÓRREGO SOSSEGO, ITARANA-ES

5.1 RESUMO

Os sistemas de macro captação de água de chuva (Macro-WHS) constituem-se numa das soluções recomendadas para mitigar os efeitos do déficit hídrico de forma coletiva (uma unidade de reservação para abastecer dois ou mais usuários) em comunidades rurais que praticam a agricultura irrigada em pequena escala. No entanto, a literatura ressalta tanto a quantidade limitada de informações sistematizadas sobre o dimensionamento de Macro-WHS como a escassez de dados para subsidiar tal dimensionamento. Visando contribuir para a minimização de tais deficiências apontadas pela literatura, foi desenvolvida uma proposta metodológica para avaliação da capacidade de reservação hídrica de Macro-WHS voltados para atendimento de pequenos sistemas de irrigação, em pequenas bacias hidrográficas. Neste trabalho, a proposta desenvolvida é aplicada experimentalmente à bacia hidrográfica piloto do Córrego Sossego, considerando isoladamente toda a bacia como área de estudo ou a bacia dividida nas sub-regiões hidrográficas que a compõem, buscando analisar o seu desempenho tanto na determinação do volume potencial de reservação como em relação à sua flexibilidade em lidar com diversos métodos oferecidos para estimar os parâmetros agroclimáticos - de acordo com a disponibilidade das informações do local e com a escala geográfica de planejamento. Demonstrou-se, para a bacia piloto, que as diferenças das estimativas a partir do uso de diferentes fontes de dados potencialmente disponíveis e, conseqüentemente, da aplicação de métodos diferentes para determinar os parâmetros agro climatológicos, conduziram a uma variação de até 50% na estimativa da capacidade de reservação hídrica. Por outro lado, mostrou-se que há diferenças importantes na estimativa das séries de disponibilidade e de demanda hídricas ao aplicar a metodologia por sub-região hidrográfica (até de 92% e 42% anual para a bacia piloto), o que impacta também nos resultados dos indicadores propostos pela metodologia (CCR, SI e CCR_{ideal}). A metodologia mostrou-se adequada na determinação e avaliação da capacidade hídrica na bacia piloto, porém, recomenda-se considerar a qualidade da fonte de dados e a variabilidade espacial das características do local para melhorar o desempenho da mesma.

Palavras-chave: Macro WHS. capacidade hídrica de reservação. aplicação e avaliação da metodologia. qualidade de fonte de dados. variabilidade espacial.

5.2 INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada consome cerca de 70% da água de uso consultivo, chegando a ser responsável por produzir até 40% dos alimentos consumidos em alguns países do mundo (FAO, 2015a). Em regiões áridas e semiáridas, os baixos níveis de precipitação, a alta variabilidade pluviométrica e as altas taxas de evapotranspiração colocam em risco a disponibilidade hídrica nas atividades agrícolas (GHEYI et al., 2012). Por esse motivo, políticas e pesquisas têm sido estabelecidas visando subsidiar estratégias que permitam mitigar os efeitos do déficit hídrico na agricultura irrigada nestas regiões.

Os sistemas de macro captação de água de chuva (Macro-WHS) foram identificados como uma das tecnologias com potencial de armazenar água na bacia hidrográfica para pequenos sistemas de irrigação de forma coletiva, pois permitem captar a água escoada por áreas de captação naturais para armazenamento em reservatórios superficiais, capazes de atender até alguns quilômetros quadrados de área irrigada (ZAKARIA et al., 2013).

No entanto, o dimensionamento da capacidade de reservação de água para uma bacia hidrográfica é um processo complexo, dependente de fatores físicos, econômicos, sociais e culturais (LASAGE; VERBURG, 2015), e que deve levar em consideração, entre outros, a necessidade hídrica das culturas (denominada demanda hídrica) e a capacidade do sistema de produzir escoamento (denominada disponibilidade hídrica).

Para a definição da capacidade de armazenamento, usualmente são realizadas simulações computacionais que utilizam o princípio do balanço hídrico entre as séries históricas de disponibilidade e demanda hídricas do sistema para um dado intervalo de tempo, ao longo do período de planejamento. Porém, a falta de dados e a natureza estocástica das variáveis hidrológicas de interesse dificultam o dimensionamento dos sistemas de reservação hídrica. Ao mesmo tempo, poucas informações são encontradas na literatura referentes ao dimensionamento de WHS coletivos (LASAGE; VERBURG, 2015), e as que aparecem estão de forma não consolidada,

em alguns poucos modelos, como os utilizados por Zakaria et al. (2013) e Adham et al. (2016).

Buscando subsidiar a avaliação da capacidade de reservação hídrica de Macro-WHS para pequenos sistemas de irrigação, em pequenas bacias hidrográficas, no Capítulo 4 foi apresentada uma proposta metodológica que considera fatores físicos intervenientes no dimensionamento e consolida métodos aplicáveis em pequena bacia hidrográfica para determinar e avaliar a capacidade hídrica de reservação para esses sistemas. A metodologia contempla procedimentos para a determinação do volume potencial total de reservação do Macro-WHS (VR), bem como de alguns indicadores que permitam a qualificação deste volume no contexto da bacia hidrográfica ou de sub-regiões que a compõem. O VR é entendido como aquele volume de água programado para ser retirado anualmente do sistema de reservação, sempre que houver disponibilidade (CAMPOS; SOUZA; LIMA, 2014), e é utilizado para estimar a capacidade de reservação hídrica de um sistema.

A proposta considera a variabilidade interanual das chuvas e busca ser flexível à qualidade de dados potencialmente disponíveis em pequenos sistemas de irrigação, considerando a escassez e a diversidade das informações sobre as características dos pequenos sistemas de irrigação e possibilitando sua utilização em escala geográfica de pequena bacia hidrográfica, de forma global, ou pela integração de suas sub-regiões. No entanto, há metodologia proposta não foi, até então, avaliada por meio da sua aplicação numa bacia piloto. Neste contexto, o presente trabalho apresenta estudo voltado para se verificar o comportamento do procedimento metodológico proposto no Capítulo 4, por meio da sua aplicação experimental na bacia hidrográfica do Córrego Sossego, em Itarana/ES. A bacia é caracterizada pelo uso da agricultura familiar, composta por pequenos sistemas de irrigação, e por ser uma região com muitos conflitos pelo uso da água.

5.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta no Capítulo 4 utiliza a pequena bacia hidrográfica como unidade de planejamento – visando atender, de forma coletiva, as necessidades de reservação hídrica anuais para pequenos sistemas de irrigação – e permite estimar o volume de regularização anual (VR) considerando as características físicas do local. Dessa maneira, os dados de entrada são dados acessíveis nessa escala e as

variáveis selecionadas são as envolvidas no balanço hídrico do sistema de reservação por meio do método de Rippl. Em função dos tipos de dados potencialmente disponíveis, sugerem-se métodos alternativos aplicáveis à essa escala geográfica para a determinação de alguns parâmetros hidroclimatológicos e relativos às culturas agrícolas demandantes de irrigação, tornando-a bastante flexível.

Para aplicar e avaliar a metodologia proposta no Capítulo 4 na bacia piloto do Córrego Sossego, em sua porção espírito-santense, são necessários dados de entrada relacionados à registros hidrometeorológicos, características do tipo e uso do solo, bem como informações das culturas e práticas de manejo existentes na bacia. Estes dados são utilizados na modelagem computacional, com estimativa da demanda e da disponibilidade hídricas, a qual estima a capacidade de reservação do sistema e fornece indicadores de interpretação dessa capacidade. Os principais dados utilizados, os quais estão descritos nas subseções seguintes, foram:

- Registros hidrometeorológicos: dados mensais sobre as variáveis climáticas (radiação solar, temperatura, velocidade do vento, humidade relativa) e dados diários de precipitação;
- Características do tipo e uso de solo: Informação que permita a caracterização espacial do tipo (textura e classificação hidrológica) e do uso do solo;
- Característica do relevo: informação que permita a caracterização espacial do terreno (MDE, MDT, mapas de declividades);
- Culturas e práticas de manejo: Informações sobre os tipos, áreas e distribuição das culturas do local, assim como das práticas de manejo dos agricultores;

No presente estudo, foram analisadas as influências referentes à flexibilidade inerente a proposta metodológica, tanto na seleção de métodos (que dependem da qualidade das informações existentes), como da variabilidade espacial das características físicas da bacia piloto (que podem ser representadas na escala da bacia ou de forma semi-distribuídas por meio da divisão da bacia em sub-regiões). Foram ainda empregados os indicadores sugeridos pela metodologia proposta para avaliar a capacidade de

reservação hídrica da bacia piloto e das suas respectivas sub-regiões: o CCR, que é a relação entre a área de captação e a área de irrigação; o CCR_{ideal} , que é a relação entre a lamina anual de irrigação e a de escoamento (representa o mínimo CCR requerido para atingir as demandas hídricas anuais para irrigação); e o SI, dado pela razão entre os volumes anuais disponível e demandado pelo sistema de reservação (representa o nível de escassez hídrica anual do local).

5.3.1 Caracterização da área de estudo

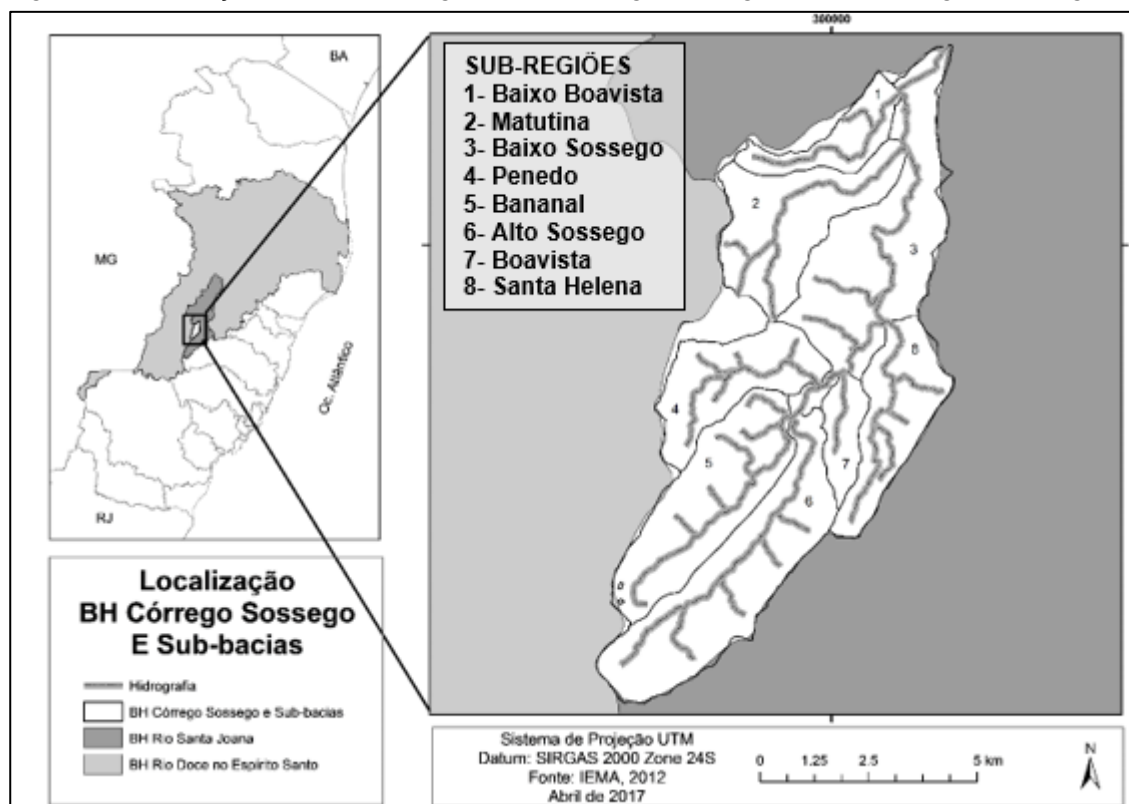
A área piloto escolhida para o estudo é a bacia hidrográfica do Córrego Sossego, inserida na Bacia do Rio Santa Joana, uma sub-bacia que contribui na formação da Bacia do Rio Doce, localizada no município de Itarana/ES, na longitude 40.88 W e latitude 19.83 S. A bacia possui área de drenagem de, aproximadamente, 65 km² e registra precipitações médias totais anuais de cerca de 1100 mm, com maior concentração interanual nos meses de outubro a março, equivalente à, aproximadamente, 80% do total anual. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região é classificado como clima tropical com estação seca no período do inverno – Aw, e com temperatura média mensal superior a 18°C (TEIXEIRA et al., 2007; GIRARDI; CURTO; TESCH, 2012; DARÉ, 2013).

O uso da água preponderante corresponde à agricultura irrigada de base familiar, composta por pequenos sistemas de irrigação, instalada em pequenas propriedades rurais. De acordo com Daré (2013), a eficiência de irrigação dos sistemas de irrigação da bacia piloto é da ordem de 84%. No entanto, diversos estudos apontam como preocupante a baixa disponibilidade hídrica na região, colocando em risco a sua produtividade agrícola e gerando prejuízos econômicos, sociais e ambientais. A baixa disponibilidade tem levado a existência de conflitos pelo uso da água na bacia. Frente a isso, a região tem sido tomada como região piloto para o desenvolvimento de diversos estudos científicos e tecnológicos no contexto da gestão integrada de recursos hídricos com foco no desenvolvimento sustentável local/regional (BATISTA, 2016; DARÉ, 2013; MARQUES, 2015; POLONI, 2010; TEIXEIRA et al., 2007).

Para a aplicação da metodologia na bacia dividida em sub-regiões hidrográficas, foram considerados os seis principais afluentes da bacia do Córrego Sossego, assim como seus trechos alto e baixo, seguindo divisão apresentada por Girardi, Curto e Tesch (2012). Desta forma, a bacia do Córrego Sossego foi dividida em 8 sub-regiões

hidrográficas, as quais estão representadas e numeradas conforme a Figura 6: Baixo Boavista (1), Matutina (2), Baixo Sossego (3) Penedo (4), Bananal (5), Alto Sossego (6), Boavista (7) e Santa Helena (8).

Figura 6. Localização da Bacia hidrográfica do Córrego Sossego e suas sub-regiões hidrográficas



5.3.2 Base de Dados

- Hidroclimatológicos:

Para estimativa do volume potencial de reservação, a principal variável a ser utilizada é a chuva. Portanto, foi utilizada uma série de dados de precipitação diária consistidos da estação de Itarana (código: 1940000), localizada na longitude 40.87°S e latitude 19.87°W. Os dados, disponíveis na base de dados da Agência Nacional das Águas (ANA), através do portal hidroweb (hidroweb.ana.gov.br/), foram selecionados no período de 1975 a 2005, para completar um período de 30 anos.

Os dados de temperatura mensal (média, mínima e máxima) e de precipitações médias mensais foram obtidos da estação de Itarana do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural - Incaper. Também foram consultadas informações secundárias da evapotranspiração de referência (ET_0) mensal de Itarana, disponível na planilha de irrigação da ANA (2013) para o município

de Itarana, e também aquelas disponibilizadas pelo Incaper. As características das fontes de dados climáticos apresentam-se na Tabela 3. A localização espacial das estações meteorológicas consultadas está representada na Figura 7.

Tabela 3. Características das fontes de dados climatológicos

FONTE	ORIGEM	CÓDIGO	LAT (°S)	LONG (°W)	ALT (M)	ESCALA TEMPORAL	PERÍODO	VARIÁVEL*
AMOIRÉS	Inmet	86803	19,50	41,06	288	Diária	2008 a 2014	T, HR, P, Ra, U
ITARANA	Incaper	01940052	19,86	40,88	245	Mensal	1977 a 2012	T, P
VITÓRIA	Climwat 2.0	BRA 491	20.31	40.33	36	Mensal	1971 a 2000 ⁷	T, HR, P, Ra, U
INFORMAÇÕES SECUNDARIAS	Incaper	1940043	19,86	40,88	245	Mensal	1977 a 2005 ⁸	ET ₀
	ANA	N/A	N/A	N/A	N/A	Mensal	N/A ⁹	

*Sendo: T a temperatura, HR a umidade relativa, P a precipitação, Rã a radiação solar e U a velocidade do vento

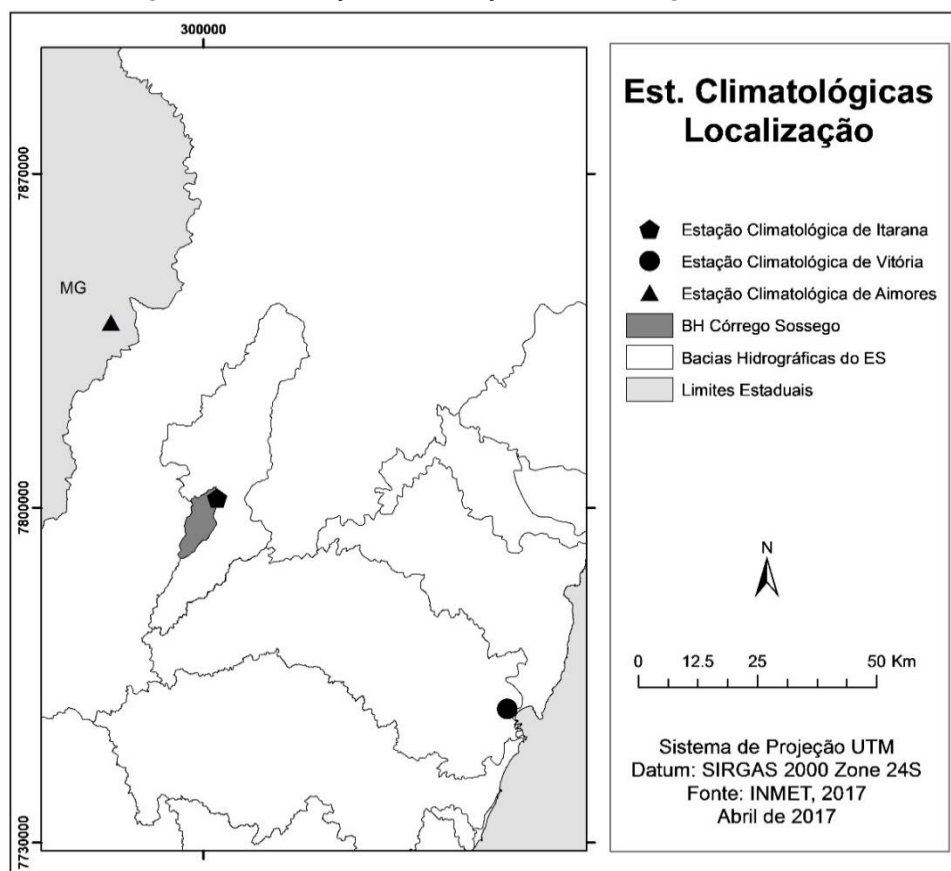
Fonte: autoria própria

⁷ A base de dados CLIMWAT permitiu o uso de dados de 1971 a 2000. Para isso, foram consideradas todas as estações da sua base de dados com, ao menos, 15 anos de informações dentro desse período. A estação de Vitória é a estação da base de dados mais próxima ao local.

⁸ Analisaram as séries da estação desativada do INMET no período de 1977 a 2005

⁹ Calculam a ET₀ da base de dados climática FAOCLIM e o método Penman Montheith da FAO para o município de Itarana

Figura 7. Localização das estações meteorológicas utilizadas



- Tipo e uso do solo

Os dados pedológicos utilizados foram obtidos do trabalho de Poloni (2010), que utilizou informações do RADAMBRASIL (1987), do GEARH-NES (2003) e de imagens de satélite Landsat de baixa resolução, para redefinir os limites espaciais das classes de solo diagnosticadas através de análises físico-químicas e de perfis de solo feitas por GEARH-NES (2003). Foi destacada a presença de argissolos e latossolos na bacia, que segundo a classificação Brasileira de solos (SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005) se enquadram nos grupos hidrológicos de solos B e A, respectivamente. Solos do grupo A possuem baixo potencial de geração de escoamento superficial e alta capacidade de infiltração, enquanto solos do grupo B possuem média capacidade de infiltração e maior capacidade de geração de escoamento superficial que os solos do grupo A.

As informações de uso e ocupação do solo foram extraídas do último mapeamento digital do estado do Espírito Santo (GEOBASES, 2012) e da campanha de campo realizada por Batista (2016), o qual procurou validar e atualizar as culturas existentes

na bacia, indicadas pelo último mapeamento. A partir do mapa, foram identificados 30 tipos de cultivos diferentes na bacia, sendo assinaladas, além das culturas individuais, as áreas para preparo e as áreas denominadas como mix (muitas culturas em pequenas áreas de irrigação).

As culturas representadas no mapa de uso do solo foram classificadas nas categorias banana, café, frutas, temporais e outras (áreas de preparo e áreas com diversos cultivos), as quais correspondem 17%, 59%, 12%, 8% e 4%, respectivamente, do total da área irrigada na bacia piloto. A Tabela 4 apresenta a área irrigada e a distribuição de cada uma das categorias por sub-região hidrográfica.

Tabela 4. Caracterização da irrigação das categorias de cultivos por sub-região hidrográfica

REGIÕES	ÁIRR (HA)	BANANA	CAFÉ	FRUTAS	TEMP	OUTRAS
ALTO SOSSEGO	216.1	17%	70%	1%	11%	1%
BAIXO SOSSEGO	371.9	23%	47%	15%	1%	14%
BANANAL	197.8	10%	63%	4%	13%	10%
BOA VISTA	15.1	45%	44%	7%	0%	4%
BOA VISTA BAIXO	46.1	0%	69%	0%	15%	16%
MATUTINA	120.9	0%	78%	17%	0%	5%
PENEDO	93.7	8%	50%	4%	25%	13%
SANTA HELENA	170.2	33%	51%	6%	1%	9%

5.3.3 Análises

Neste trabalho foram estudados fatores físicos que, utilizando a metodologia proposta no Capítulo 4, influenciam no dimensionamento das unidades de armazenamento do Macro WHS para pequenos sistemas de irrigação organizados em pequenas bacia hidrográficas, que são: os fatores climáticos (representados pela evapotranspiração de referência, ET_0); o tipo e distribuição das culturas (representado pelo coeficiente de cultivo k_c); e o uso e tipo do solo (representado pelo número da curva CN, do U. S. Soil Conservation Service - SCS).

- Fatores climáticos

As variáveis climáticas foram analisadas por meio do seu uso na estimativa de ET_0 na região de estudo. Em outras palavras, foram analisadas como as fontes de dados

climáticos selecionadas para estimar a evapotranspiração potencial (ET_0) podem introduzir incertezas na estimativa do volume de reservação.

Para isso, foram estimados valores de ET_0 a partir das diferentes fontes de dados climáticos, buscando avaliar as incertezas geradas na estimativa da demanda hídrica de irrigação e do volume de reservação. Essa avaliação é necessária porque em regiões com escassez de dados a seleção da fonte de informação é uma decisão arbitrária, que considera fatores como a sua proximidade com o local de estudo e a qualidade das suas informações. Por exemplo, a metodologia proposta recomenda a utilização do método Penman-Monteith (PM), quando se dispõe de dados mensais de umidade relativa (HR), velocidade do vento (U_2), temperatura mínima e máxima (T_{min} , T_{max}), e Radiação solar (R_a). No entanto, quando a informação disponível se limita a dados de temperatura mínima, máxima e média (T_{min} , T_{max} , T_{med}) e dados de precipitação, a proposta metodológica recomenda utilizar o método de Hargreaves-Samani (HS).

- Tipo e distribuição das culturas

Foram analisadas como a seleção do método para estimar o coeficiente da cultura (k_c) pode introduzir incertezas na estimativa do volume de reservação. Para isso, foram considerados os métodos detalhado e simplificado (Capítulo 4) para definir o k_c mensal, com o propósito de quantificar a diferença entre os resultados dos métodos na estimativa da lâmina de irrigação requerida pelos cultivos e, portanto, sua influência na definição do volume de reservação anual (VR). O método detalhado permite estabelecer uma curva de k_c ao longo do período de cultivo, enquanto que o método simplificado assume o mesmo valor do k_c ao longo do período de simulação, utilizado como uma aproximação para simplificar regiões com diversos tipos de culturas e com práticas de manejo diferentes (COHIM et al., 2007; HAI, 1998).

- Tipo e uso do solo

A influência do tipo e do uso do solo, bem como da declividade do terreno, na produção da lâmina de escoamento foi avaliada por meio do Método da Curva Número (CN) do SCS. Para isso foram relacionados os dados de CN com a lâmina média anual de escoamento simulada (Q_a), definida como a somatória das lâminas mensais médias simuladas (Q_t), para as diferentes sub-regiões da bacia piloto.

Foram quantificadas as diferenças da variação da evapotranspiração anual $\overline{ET_0}$ (definida como a somatória das lâminas de evapotranspiração de referência mensal) e do coeficiente de cultivo médio anual $\overline{k_c}$ (definido como o valor médio dos coeficientes de cultura mensais) na estimativa do volume anual demandado de irrigação por hectare D' (definido como o somatória dos volumes mensais demandados para irrigação dividido pela dimensão da área irrigada do local) e, consequentemente, na estimativa do VR.

As diferenças foram quantificadas como as variações normalizadas ($\Delta\overline{ET_0}$, $\Delta\overline{k_c}$, $\Delta D'$ e ΔVR) dos valores dessas variáveis na bacia do Córrego Sossego. A normalização foi realizada dividindo os resultados de cada simulação pelos resultados de uma simulação considerada aqui como “*padrão*”, a qual utiliza os dados climáticos da estação de Itarana, para estimar ET_0 com o método HS. Essa simulação padrão foi escolhida como referência para comparações, por representar o menor valor da ET_0 (Ver Tabela 6). Também, são quantificadas as diferenças da lâmina escoada no ano modelado (Q_a) e do volume disponibilizado no ano (V_0) como a máxima diferença e máxima variação entre os resultados das simulações por sub-regiões¹⁰.

- Indicadores

Para avaliar a capacidade de reserva hídrica da bacia e de cada uma das suas sub-regiões hidrográficas, foram empregados os indicadores sugeridos e explicados na metodologia proposta (ver item 4.4.4), mencionados na sequência:

- $CCR = A_{cap}/A_{irr}$

- $SI = \frac{V_D}{V_0}$

- $CCR_{ideal} = \frac{LIa}{Qa}$

Onde CCR, é a relação entre a área de captação (A_{cap}) e a área de irrigação (A_{irr}); SI, é a relação entre os volumes disponível (V_0) e demandado (V_D) pelo sistema de reserva. Esses indicadores estão representados nas Equações 16 e 17, respectivamente. O CCR_{ideal} representa o CCR mínimo para atender a demanda

¹⁰ A diferença e variação entre as sub-regiões cujos resultados representam o menor e o maior valor de produção de escoamento anual.

hídrica das culturas considerando o potencial de escoamento da chuva, dividendo a lâmina de irrigação anual (LI_a) pela lamina de escoamento produzida no ano simulado (Q_a) (ver Equação 18).

Valores de CCR menores ao de CCR_{ideal} demonstram deficiência no potencial de captação de água para satisfazer as necessidades de irrigação do local em 100% do tempo de planejamento. Semelhantemente, quando o valor de SI é inferior a 1, significa que a região mostra deficiências para atender as demandas hídricas por meio do uso de macro WHS.

- Demanda de Irrigação

Para comparar como a seleção da fonte de dados pode afetar no cálculo da demanda hídrica mensal de irrigação, foram calculados os valores de ET_0 de acordo com as informações disponíveis. Assim, para a estação de Itarana foi utilizado o método de Hargreaves Samani (HS), enquanto que para as estações meteorológicas de Vitoria e Aimorés, os valores de ET_0 foram estimados pelo método de Penman Monteith (PM) com o emprego do software CROPWAT. O CROPWAT foi utilizado por sua praticidade e para simplificar o cálculo de método de PM, inserindo os dados médios mensais de temperatura, umidade, e velocidade do vento no software, para gerar os valores de ET_0 mensais. Foram também comparados os dados secundários de ET_0 disponibilizados pela ANA e pelo INMET utilizando o método PM, com os resultados de ET_0 obtidos com os registros hidroclimáticos e o emprego dos métodos HS e/ou PM.

Os valores de k_c foram estimados por meio de dois métodos: 1) método simplificado, no qual consideraram-se valores de referência deste parâmetro obtidos da literatura para cada uma das culturas identificadas na bacia, no estágio de maior desenvolvimento. O valor de k_c final foi obtido pela ponderação dos valores de referência pela área ocupada por cada uma das culturas (Daré, 2013); 2) método detalhado, para o qual as diversas culturas existentes foram agrupadas em categorias, conforme apresentadas na Tabela 5, e para cada uma foram alocados os valores de k_c e a duração das etapas de cultivo com base nos dados da FAO (ALLEN et al., 2006), que estão disponibilizados para culturas anuais e temporárias no programa CROPWAT. No entanto, como não se tem informação das datas de plantio para essas culturas, assumiu-se que o plantio começa no mês de janeiro, um mês após ao de

maior precipitação (WISSER et al., 2010). Já as culturas temporais iniciam o ciclo de cultivo novamente em julho¹¹.

As informações dos coeficientes de cultivo, das durações de cada um dos estágios de desenvolvimento, das áreas e datas de plantio e das variáveis climáticas¹², foram inseridas no programa CROPWAT para calcular a lâmina de irrigação de um cultivo para uma dada região. Para definir k_c , às culturas representativas da bacia (ver Tabela 4) se organizaram nas categorias anuais, perenes, temporais, mix (áreas com diversidade de cultivos) e áreas de preparo (ver Tabela 5). Para as categorias de mix e para as áreas de preparo, assumiu-se que ET_c seria a mesma que ET_0 (HAI, 1998). Para as culturas perenes assumiu-se um valor k_c constante para o ano modelado, correspondente ao do estágio de maior desenvolvimento (DARÉ, 2013). Por último, para as culturas temporais utilizou-se os coeficientes e durações de culturas da base de dados da FAO¹³. O software CROPWAT, gera os valores de k_c para cada decêndio do ano de simulação para cada uma das categorias/subcategorias propostas. As séries de k_c , com resolução temporal de 10 dias, geradas pelo software foram agregadas em series mensal de k_c para cada categoria/subcategoria, que posteriormente foram ponderadas para obter um valor mensal de k_c , para a bacia piloto - como foi requerido pela metodologia proposta (ver item 4.4.1).

- Precipitação efetiva

Para executar o balanço hídrico do solo é necessário transformar as séries de precipitação diária para mensais e estimar a precipitação efetiva. Para determinar as séries de precipitação efetiva (P_{eff}), considerou-se o conceito de precipitação provável mensal utilizado pela ANA (2014), ou seja, a precipitação com um nível de garantia

¹¹ A data de plantio no verão não é uma realidade para o estudo de caso, porém, a simulação aqui feita considera o plantio nesse período para demonstrar a influência do método apresentado segundo especialistas do Incaper, para a bacia piloto essa idealização não deve trazer maiores inconvenientes, já que a maioria das culturas são perenes.

¹² informação climática sobre series mensais de HR, P, U_2 , obtidas para a aplicação do caso, a partir dos registros do INCAPER no período de 2008 a 2014 da estação de Aimorés.

¹³ Disponibilizadas no software cropwat

Tabela 5. Categorias das culturas da bacia do Córrego Sossego para calcular k_c pelo método detalhado

Categorias	Subcategorias	%Área
Anuais	Cana de Açúcar	0,6%
	Banana	17,0%
Perenes	Café	58,9%
	Frutíferas (70% cobertura vegetativa)	11,6%
	Vegetais	4,6%
Temporais	Tubérculos (papa)	2,4%
	Cereais (milho)	1,5%
	Mix	1,05%
	Área de preparo	2,06%

de ser igualada ou superada de 80% ou $P(80)$ [mm]. Essa precipitação foi calculada a partir de uma análise de frequência com os totais anuais de precipitação da série histórica, para representar um ano seco. Uma vez estimado o valor de $P(80)_{ANUAL}$, obtem-se uma estimativa do valor de precipitação com um nível de garantia de ser igualada ou superada em 80% $P(80)_t$ para um mês do ano simulado, ver equação 19:

$$P(80)_t = \left(\frac{\overline{P_t}}{\overline{P_{ANUAL}}} \right) * P(80)_{ANUAL} \quad (19)$$

Donde $\overline{P_t}$ é o valor médio da precipitação de um mês do ano simulado e P_{ANUAL} e o valor média anual da precipitação.

Por fim, por meio do balanço hídrico do solo, estimou-se a lâmina de irrigação mensal e, considerando a eficiência do sistema de irrigação e a área irrigada (dados de entrada), foi determinada a demanda hídrica mensal.

- Volume de Escoamento Superficial

Para estimar a disponibilidade hídrica a nível de bacia hidrográfica, foi calculada a produção de escoamento superficial. O volume de escoamento foi estimado por meio da aplicação do modelo chuva-vazão do CN-SCS, considerando os registros de precipitação diária, o tipo e os usos do solo, e a inclinação do terreno do local de estudo.

Inicialmente, para estimar a disponibilidade hídrica mensal para a irrigação foi selecionado, a partir dos registros históricos de precipitação diária, um ano representativo da disponibilidade média por meio de análises dos registros históricos de precipitação. Isso para aplicar ao modelo chuva-vazão.

Para estimar o valor do número da curva (CN) do método do SCS, foram classificados os solos da bacia (pelo tratamento do mapa de tipos de solos) em grupos hidrológicos de solos (GHS), segundo a classificação para solos brasileiros (SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005). Em seguida foram cruzadas as informações do mapa de usos de solos com a classificação dos GHS, para definir o número de curva em condições normais CN II (NRCS, 2004), o qual é então corrigido pelas condições de umidade antecedente do solo (AMC) – definidas com base na precipitação total ocorrida nos cinco dias antecedentes ao evento estudado - e pela declividade do terreno (incl) – estimada pelo tratamento do modelo digital de elevação do terreno (MDE) no software Arcgis 10.1. Os detalhes dessas correções estão apresentados no Capítulo 4.

Com o valor do CN corrigido por evento de precipitação, foi aplicado o modelo chuva-vazão para gerar a série diária de escoamento superficial que, posteriormente, foi agregada e transformada em série mensal. As séries de disponibilidade hídrica mensal do ano modelado, correspondem a média das séries de escoamento mensais simuladas no modelo chuva-vazão multiplicada pela área de captação.

A determinação da disponibilidade hídrica também foi realizada em cada uma das sub-regiões hidrográficas da bacia do Córrego Sossego.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente trabalho estão apresentados em três seções: análises da demanda de irrigação na bacia do Córrego Sossego; análises da produção de

escoamento na bacia do Córrego Sossego; e análises da variação espacial das características físicas.

5.4.1 Análises da demanda de irrigação na bacia do Córrego Sossego

Neste item são detalhados e analisados os resultados obtidos do cálculo da demanda hídrica, a partir da variação da evapotranspiração de referência (ET_0) e do coeficiente do cultivo (k_c), pelos critérios definidos na metodologia. O propósito desta análise não é recomendar um método para selecionar os dados climáticos ou o k_c , mas é o de estudar as incertezas que estas variáveis produzem na estimativa da demanda hídrica de irrigação e, conseqüentemente, no volume anual regularizado (VR) em uma região com deficiência de dados.

Os valores de evapotranspiração de referência anual ($\overline{ET_0}$) obtidos a partir das diferentes fontes de dados climáticos (ver Tabela 3) são apresentados na Tabela 6. Os valores resultantes para $\overline{ET_0}$ variaram entre 1.338 mm e 1.629 mm, o que representa uma variação de 20%. O maior valor de ET_0 foi adquirido com os dados da estação de Aimorés, enquanto o menor valor foi obtido com os dados da estação de Itarana. A estimativa de $\overline{ET_0}$ utilizando os dados da estação de Vitória, por meio da consulta de uma base de dados climáticos global (CLIMWAT), foi de 1.518 mm. Poder-se-ia supor que essa variação é provocada pelo método empregado, porém, os dados de ET_0 secundários, obtidos da ANA e do INCAPER, mostram também uma variação do 20%, mesmo com ambos utilizando o PM. Isso indica que a fonte de dados climáticos influencia de forma significativa na estimativa de ET_0 , e, portanto, no volume de irrigação anual demandado pelas culturas por hectare (D') e no volume de regularização (VR).

Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram que variações de até 20% na estimativa da ET_0 pela utilização das diferentes fontes climatológicas, produzem variações de até 49% em D' e de até 47% no volume de regularização na bacia. Esses resultados representam diferenças de $3,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ em VR para a bacia do Córrego Sossego.

Tabela 6. Influência da variação de ET_0 na estimativa da D' e do VR na bacia do Córrego Sossego

FONTE	ET_0 (mm/ano)	D' (m ³ /há/ano)	VR (10 ⁶ m ³ /ano)	$\Delta \overline{ET_0}$	$\Delta D'$	ΔVR
Aimorés (PM)	1 629.4	10.484,9	10,05	1,22	1,49	1,47
Vitória (PM)	1 518.3	9.177,5	8,74	1,13	1,30	1,28
Itarana (HS)	1 338.2	7.058,8	6,83	1,00	1,00	1,00
Secundaria INCAPER	1 599.9	10.136,8	9,35	1,20	1,44	1,37
Secundaria ANA	1 396.0	7.738,6	6,98	1,04	1,10	1,02

Os valores das variações foram obtidos tomando como valor de referência as simulações realizadas com a fonte de Itarana

Foi calculado o coeficiente de cultura anual ($\overline{k_c}$) pelo método detalhado e pelo método simplificado. Os resultados podem ser observados na Tabela 7, onde o valor do $\overline{k_c}$ obtido pelo método detalhado foi de 0,93 (7% inferior ao valor do método simplificado). Pode-se observar também que os valores da evapotranspiração da cultura anual ($\overline{ET_c}$), D' e VR no método simplificado foram inferiores na mesma proporção. As diferenças na estimativa do VR para a bacia do Córrego Sossego pelo emprego do método simplificado ou detalhado foi de 0,5*10⁶ m³ (8% inferior ao valor do método simplificado).

Tabela 7. Variação de $\overline{k_c}$, $\overline{ET_c}$, D' e VR na bacia do Córrego Sossego

Método	$\overline{k_c}$	$\overline{ET_c}$ (mm/ano)	D' (m ³ /ha/ano)	VR (10 ⁶ m ³ /ano)
Simplificado	1,0	1338,2	7058,8	6,82
Detalhado	0,93	1243,4	6460,4	6,32
Variação*	0,93	0,93	0,92	0,92

*A variação foi obtida utilizando como valor de referência as simulações realizadas com o método simplificado

Para a bacia do Córrego Sossego, evidenciou-se que a seleção da fonte de dados climatológicos para a estimativa de ET_0 , geram maiores incertezas na estimativa de D' e, conseqüentemente de VR, comparado com a seleção do método para definir k_c . Isso pode ser explicado pela predominância das culturas perenes na bacia (ver Tabela 5), para as quais o valor de k_c é o mesmo ao longo do ano de simulação, independentemente do método implementado. Estes resultados também foram

encontrados por Multsch et al. (2015), que compararam as incertezas que provocam os métodos para calcular ET_0 e k_c na simulação da demanda de irrigação.

5.4.2 Análises da Produção de Escoamento na Bacia do Córrego Sossego

Nesta seção serão apresentados os resultados referentes a aplicação do modelo chuva-vazão SCS e da estimativa do volume na bacia do Córrego Sossego. Para isso, foram calculados os parâmetros envolvidos por meio do processamento da informação geográfica disponível, onde resultaram: a área de captação (A_{cap}) em 4.988 ha, a inclinação média Incl em 16,34%; o número de curva para condições normais (CN II) em 66,8 e o número da curva para condições normais corrigido pela declividade do terreno (CN) em 70,9.

A Figura 8 apresenta o escoamento superficial diário simulado no período de 30 anos (1975-2005) por meio da implementação do modelo chuva-vazão. A Tabela 8 apresenta as estatísticas anuais de precipitação (P_a) e da lâmina escoamento simulada (Q) na bacia do Córrego Sossego. A partir dos valores da lâmina de escoamento anual (Q_a), apresentados na Tabela 8 pode-se concluir que aproximadamente o 9% do volume precipitado como chuva no ano pode ser potencialmente coletado e armazenado em macro WHS, o que representa em média 107 mm para o ano modelado, ou em termos do volume escoado anual (VE) em $5,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Figura 8. Resultados do modelo chuva-vazão para a bacia do Córrego Sossego

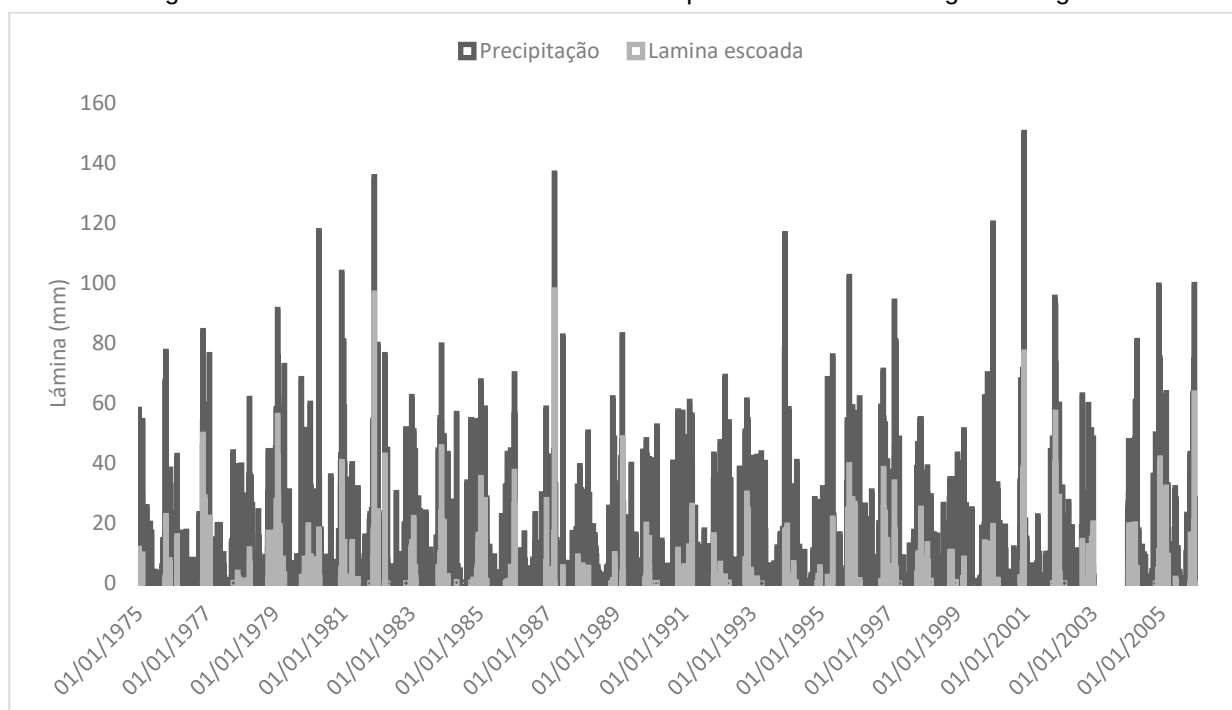


Tabela 8. Estatísticas anuais da precipitação (Pa) e da lâmina de escoamento simulado (Qa) na bacia do Córrego Sossego

Estadístico	Pa (mm)	Qa (mm)
Mínimo	694,50	16,76
Máximo	1.728,90	280,88
Desvio	259,72	64,76
Média	1.158,40	107,61

5.4.3 Análises da variação espacial das características físicas

Esta seção tem como objetivo compreender as implicações da distribuição espacial das variáveis: tipo de culturas; uso e ocupação do solo (representados pelo CN); e inclinação do terreno no dimensionamento de reservatórios, mais diretamente na estimativa do volume demandado anual por hectare (D') e da disponibilidade hídrica anual por hectare de área (Vo').

Primeiramente, foi analisada a influência do tipo e distribuição das culturas por meio do cálculo do coeficiente de cultivo médio anual ($\overline{k_c}$). A Tabela 9, apresenta os resultados de $\overline{k_c}$, da evapotranspiração de cultura anual $\overline{ET_c}$, e V_D' por sub-região hidrográfica. Os resultados para $\overline{k_c}$, variam entre 0,84 e 1,01 (variação de 20%), uma diferença explicada pela variação dos tipos e da distribuição das culturas presentes em cada uma das sub-regiões (ver Tabela 5). Essa distribuição produz variações de 19% na estimativa de $\overline{ET_c}$ e de 42% na estimativa de D' , que são comparáveis às incertezas provocadas pela seleção da fonte de dados climatológicos (ver Tabela 6). Para exemplificar, verifica-se que as sub-regiões com maior $\overline{k_c}$ são Boavista e Santa Helena, as quais se caracterizam por ter o maior percentual da área com cultura de Banana (cultura de maior demanda hídrica), enquanto que a região com menor $\overline{k_c}$, Penedo, tem a maior proporção de culturas temporais. Esses resultados sugerem, como é de esperar, que V_D' está fortemente ligado à caracterização das culturas no local e, portanto, demonstra a importância de considerar a variação espacial das culturas na determinação da capacidade de reserva hídrica de Macro WHS.

Segundo os resultados apresentados na Tabela 9, determinar k_c por sub-região hidrográfica empregando o método detalhado, mostra que a influência deste método em relação ao método simplificado dependerá da caracterização dos cultivos e de sua dinâmica temporal. Em outras palavras, em regiões com alta incidência de culturas perenes pode ser utilizado o método simplificado para preencher a falta de dados na região, porém em regiões com importante presença de culturas temporais é mais desejável levantar informações que permitam conhecer as datas de plantio e a duração das culturas para permitir o uso do método detalhado.

Tabela 9. Variação de $\overline{k_c}$, $\overline{ET_c}$ e V_D' por sub-região hidrográfica na bacia do Córrego Sossego

Método	$\overline{k_c}$	$\overline{ET_c}$ (mm/ano)	D' (m ³ /ha/ano)
Alto Sossego	0,94	1253,8	6607,4
Baixo Sossego	0,96	1284,1	6890,4
Bananal	0,93	1247,8	6466,6
Boavista	1,01	1344,1	7885,2
Boa Vista Baixo	0,92	1235,7	6227,5
Matutina	0,94	1251,9	6153,3
Penedo	0,84	1133,5	5549,2
Santa Helena	1,01	1337,2	7621,4
Máxima Diferença	0,17	210,6	2336,0
Máxima Variação*	1.20	1.19	1.42

Em relação à produção de escoamento, foi aplicado o modelo chuva-vazão do SCS em cada uma das sub-regiões hidrográficas. Na Tabela 10 apresentam-se tanto os parâmetros utilizados para aplicar o modelo SCS por sub-região, como os resultados da simulação. Foi calculada a variação por sub-região das características físicas que influenciam na produção de escoamento para entender como essas influenciam na disponibilidade hídrica anual (V_o). Verifica-se que as características de uso e tipo do solo, representadas pelo CN(II), oscilam entre valores de 64,4 e 75,8 (18%) nas sub-regiões da bacia do Córrego Sossego, enquanto a inclinação varia entre 0,15 e 0,20 (60%). O número de curva corrigido pela inclinação ou CN, varia entre 69,1 e 78,98 (14%). Dessa forma, essas diferenças produzem variações de até 92% no valor de Q_a entre as diferentes sub-regiões, onde os maiores valores de Q_a correspondem as sub-regiões com valores mais altos de CN.

Tabela 10. Parâmetros para aplicação do modelo chuva-vazão SCS por sub-região hidrográfica e a lâmina de escoamento anual resultante

Sub-região	A_{cap} (ha)	CN(ii)	Inclinação (%)	CN	Q_a (mm/ano)	V_o (10^6 m^3/ano)
Alto Sossego	1.021,5	64,4	16,34	69,10	73,86	0,91
Baixo Sossego	961,9	72,4	19,93	75,56	118,48	1,58
Bananal	789,9	68,9	13,97	73,05	97,09	0,96
Boa Vista	203,3	73,2	18,63	76,68	122,15	0,27
Boa Vista Baixo	284,7	75,8	16,68	78,98	141,63	0,47
Matutina	723,7	69,2	16,57	72,88	97,63	0,82
Penedo	543,5	67,9	15,06	72,20	90,77	0,58
Santa Helena	459,5	72,7	18,65	75,53	118,72	0,75
Máx Diferença	818,21	11,41	7,50	9,89	67,77	1,31
Máx Variação	5,02	1,18	1,60	1,14	1,92	5,92

Como o valor da área de captação (A_{cap}) influencia diretamente na produção de escoamento, quanto maior for A_{cap} maior será o volume de escoamento produzido. De acordo com a Tabela 10, a A_{cap} das sub-regiões da bacia do Córrego Sossego varia entre 203 e 1021 hectares, uma diferença aproximada de 500%, que é proporcional a variação do V_o . Porém, há casos como o da sub-região de Baixo Sossego que apresenta valor de A_{cap} inferior a 6%, comparada com a sub-região do Alto Sossego, mas gera 60% mais escoamento. Esse resultado é explicado pela diferença do tipo e uso de solo e pela declividade do terreno, representadas por CN, que, é aproximadamente 6 unidades maior na bacia do Baixo Sossego, representando maior produção de escoamento por unidade de área. Isso demonstra a importância de considerar as variáveis na estimativa do parâmetro CN para determinar a disponibilidade hídrica, e permite concluir que um planejamento diferencial das características espaciais envolvidas pode trazer vantagens no processo de determinação da capacidade de reserva hídrica de Macro WHS.

Além disso, a capacidade de reserva da bacia do Córrego Sossego e em cada uma de suas sub-regiões, foi avaliada com a interpretação dos indicadores CCR, SI e CCR_{ideal} , definidos na metodologia proposta, que relacionam os elementos de um sistema de captação de água de chuva (A_{cap} e A_{irr}), as variáveis que dependem das características físicas de cada local (lâmina de irrigação anual LI_a e lâmina de escoamento superficial anual Q_a), e dos volumes de entradas e saídas do sistema resultados da modelagem computacional (D e V_o). A Tabela 11 apresenta os resultados para esses indicadores, mostrando que a bacia do Córrego Sossego não é capaz de atender a demanda em 100% do período de tempo simulado por meio do armazenamento de águas de chuvas com Macro WHS, dado que o CCR_{ideal} (7,42) é maior que o CCR do sistema (4,56), e o SI é menor que 1. Portanto, outras estratégias de armazenamento e de gerenciamento da demanda devem ser implementadas na bacia para poder atender a totalidade das demandas de irrigação e assim evitar perdas na produção agrícola.

Do mesmo modo, em seis das oito sub-regiões analisadas, foi identificada a incapacidade do macro WHS armazenar o volume de água requerido pelas culturas no ano modelado. Destacam-se a região de Boavista e Boavista Baixo por apresentar uma capacidade de reserva suficiente para atender as demandas do sistema. Esses resultados são úteis para identificar as regiões com maior potencial para

produzir escoamento, identificar as áreas com maior pressão de recursos hídricos, propor políticas para mudar a área irrigada e o tipo de culturas, e até para contemplar transporte de água de uma região a outra. Para facilitar a comparação entre esses indicadores, seus valores foram representados graficamente na região de estudo e suas sub-regiões (ver Figura 9).

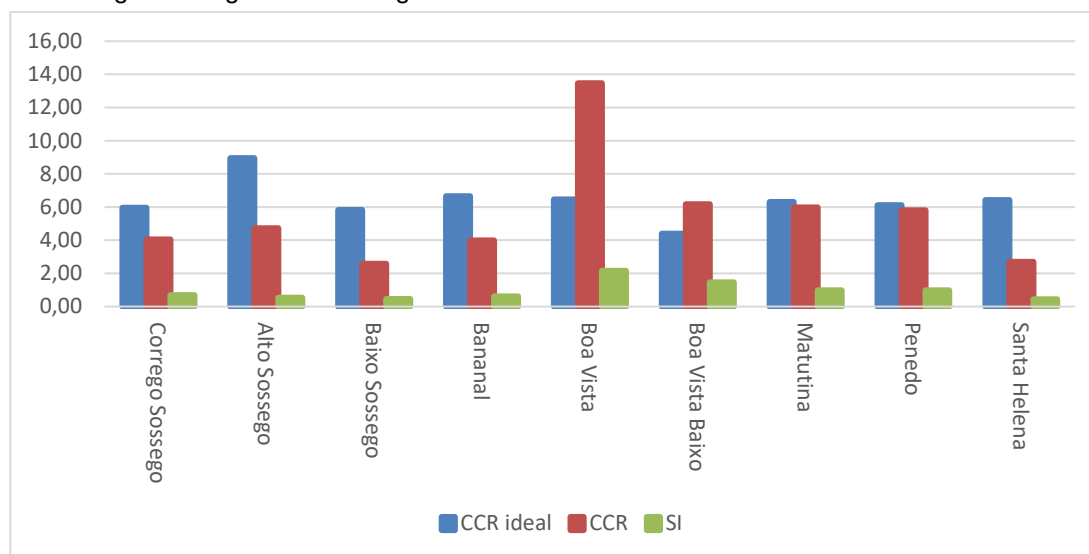
Tabela 11. Indicadores que avaliam a capacidade de reservação do sistema

Sub-região	CCR_{ideal}	CCR	SI
Córrego Sossego	5,95	4,56	0,615
Alto Sossego	8,95	4,73	0,515
Baixo Sossego	5,82	2,59	0,497
Bananal	6,66	3,99	0,602
Boa Vista	6,46	13,47	1,824
Boa Vista Baixo	4,40	6,17	1,307
Matutina	6,30	5,99	0,878
Penedo	6,11	5,80	0,881
Santa Helena	6,42	2,70	0,468

Segundo Shinde, Gorantiwar e Smout (2004), Srivastava (1996), e Wisser et al. (2010), são recomendados valores de CCR entre 3 e 5 para implementação de pequenos reservatórios para irrigação, já que valores altos podem representar altas perdas por evapotranspiração e percolação. Hachum, Ahmed e Mahammad (2007), por meio de um modelo de otimização, encontraram que o valor ótimo do CCR é de 4 para a bacia de estudo. Porém, esses valores só foram analisados e utilizados experimentalmente em sistemas de reservatórios existentes na Índia, onde as culturas predominantes são temporais como o arroz (em épocas de chuva) e vegetais (em períodos secos), encontrando que, na prática, CCR pode ter seu valor máximo igual 30. No presente trabalho, o CCR representa a área disponível para captar água por área irrigada, ou seja, regiões com CCR alta (como o da sub-região de Boa Vista)

mostram facilidade para captar água ou para expandir a fronteira agrícola. Entretanto, regiões com CCR baixo (como o de Santa Helena) podem sofrer déficit hídrico ao longo do ano de cultivo. Isso considerando que a área disponível de captação da água é a restante de área de irrigação, sem incluir outras atividades ou conflitos que possam reduzir essa área.

Figura 9. Relação entre os indicadores CCR_{ideal} , CCR e SI (representados no eixo secundário) na bacia do Córrego Sossego e as sub-regiões



Quanto ao CCR_{ideal} , valores maiores a 5 representam valores de LI_a maiores ou de Q_a inferiores aos recomendados pela literatura e, portanto, baixo potencial de reservação de água por meio de WHS, sendo necessário considerar outras estratégias para mitigar o déficit hídrico como a reservação de água no solo ou o gerenciamento das demandas hídricas. Nas sub-regiões da Bacia do Córrego Sossego o CCR_{ideal} varia entre 4,40 e 8,95, sendo a sub-região de Boa Vista Baixo a única que se encontra dentro do recomendado pela literatura pela literatura. Isso pode ser explicado porque a sub-região de Boa Vista Baixo tem maior capacidade de produção de escoamento (ver Tabela 11) e está entre as sub-regiões com menores demandas hídricas por área irrigada (ver Tabela 10). Essa análise pode ser mais importante no momento de escolher lugares com maior potencial para armazenar águas de chuva e até para planejar a área e a distribuição das culturas numa bacia.

O indicador SI permite identificar as regiões com maior déficit hídrico (valores menores de SI), e com isso subsidiar as decisões a se tomar e as regiões a se priorizar para a implementação de estratégias como os macros WHS. O valor de SI mostra uma relação proporcional com o CCR (ver Figura 9). Pelo contrário, o CCR_{ideal} não

apresenta uma relação direta com os outros indicadores, entretanto para os valores de picos do CCR_{ideal} como o do Alto Sossego e Boa Vista Baixo, se evidencia uma variação entre a relação do CCR e o SI. Desta maneira, conclui-se que o indicador CCR_{ideal} permite avaliar as características físicas de uma dada região e, portanto, seu potencial para armazenar água com Macro WHS, enquanto que os indicadores SI e CCR podem ser utilizados para identificar as pressões das demandas hídricas da região pela proporção de área irrigada.

5.5 CONCLUSÕES

O estudo permitiu concluir que a metodologia pode ser aplicada em uma bacia piloto para estimar a capacidade hídrica de reservação de um Macro-WHS para pequenos sistemas de irrigação, no entanto, a avaliação da mesma indicou considerações relevantes que não devem ser desprezadas no seu emprego.

Em primeira instancia, a seleção da fonte de dados climáticos deve ser realizada com cautela. No presente trabalho demonstrou-se que selecionar fontes com diferentes critérios na bacia do Córrego Sossego pode trazer um impacto na estimativa da evapotranspiração de referência de até 20%, que equivale a variações de até 50% na demanda anual de irrigação, e portanto, do volume regularizado. No caso do coeficiente de cultura médio anual, uma diferença de 7% resultante da aplicação diferenciada do método detalhado e do método simplificado na bacia piloto, provocou uma diferença inferior a 10% na estimativa da evapotranspiração da cultura e da demanda hídrica de irrigação.

Um outro aspecto que também se mostrou de grande relevância para o dimensionamento de reservatórios refere-se a discretização espacial da disponibilidade e da demanda. No caso do estudo considerado, a diferença no valor de coeficiente de cultura médio anual, considerando discretização espacial, resultou numa diferença de até 20% entre as diferentes sub-regiões, equivalente a uma variação de 19% no valor de evapotranspiração da cultura e de 42% no valor da lâmina de irrigação. Por outro lado, as diferenças na disponibilidade hídrica anual por sub-região hidrográfica foram de até 92%.

A aplicação dos indicadores CCR e SI na bacia piloto do Córrego Sossego permitiu fazer as seguintes inferências: CCR_{ideal} apresenta-se como indicador adequado para

avaliação do potencial de armazenamento de água; enquanto CCR e SI comportam-se como indicadores apropriados para identificar as pressões das demandas hídricas do sistema; esses três indicadores poderão ainda ser utilizados com a finalidade de distribuir as unidades de reservação priorizando zonas com maiores demandas ou com maiores potenciais para captar água de chuva.

Por fim, destaca-se a importância da discretização espacial das características físicas da bacia para entender a capacidade de reservação do sistema e para planejar mais eficientemente o Macro WHS. Ressalta-se que a metodologia aplicada deve continuar sendo avaliada e aperfeiçoada. Por exemplo, os passos referentes à seleção do ano a modelar, e a definição das séries de precipitação efetiva não estão detalhadas na proposta metodológica.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento da pesquisa e as recomendações para o desenvolvimento de estudos futuros.

6.1 CONCLUSÃO

Em relação ao objetivo específico 1, conclui-se:

- Identificaram-se diversos fatores que devem ser envolvidos no dimensionamento de Macro WHS, especificamente na determinação e avaliação da sua capacidade de reservação hídrica. Entre eles, fatores físicos, socioeconômicos e culturais. No entanto, verificou-se que, pelo fato de os fatores físicos serem os diretamente envolvidos no balanço hídrico de Macro WHS, somente eles têm sido considerados no dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de tais sistemas.
- A verificação na literatura da quantidade limitada de informações sistematizadas referentes ao dimensionamento de Macro-WHS, particularmente para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas, bem como de dados em subsídio ao referido dimensionamento, permitiu o desenvolvimento de procedimento metodológico em suporte ao dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de tais sistemas, que contemplou: a determinação do volume potencial total de reservação dos mesmos, bem como de alguns indicadores que permitam a qualificação deste volume no contexto da bacia hidrográfica ou de sub-regiões que a compõem.

Com respeito ao objetivo específico 2, conclui-se:

- O procedimento metodológico proposto mostrou-se flexível e potencialmente aplicável para as condições representadas na bacia piloto: pequena bacia hidrográfica caracterizada pelo uso de pequenos sistemas de irrigação.
- A aplicação e avaliação do procedimento metodológico aponta diferenças significativas na estimativa da capacidade de reservação hídrica, alusivas às diferentes fontes de dados consultadas para determinar as variáveis agroclimáticas (representadas pela evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultura). Porém, para o caso da bacia piloto, as diferenças causadas pelas distintas fontes de dados climáticas (que atingem até 50%) são

consideravelmente maiores que as causadas pela caracterização dos coeficientes de cultura (que atingem até 10%).

- Um outro aspecto que também se mostrou de grande relevância para o dimensionamento de reservatórios refere-se à discretização espacial do coeficiente de cultura (K_c) e do Número de Curva (CN). No presente caso de estudo, uma diferença no valor de K_c médio anual resultou numa diferença de até 20% entre as diferentes sub-regiões hidrográficas, equivalente a uma variação de 19% no valor da evapotranspiração da cultura e de 42% no valor da lâmina de irrigação. Por outro lado, a aplicação da metodologia por sub-região hidrográfica apresentou variações de até 18% no valor de CN entre as sub-regiões, que correspondeu a uma diferença de até 92% na produção da lâmina de escoamento anual estimada.
- A aplicação dos indicadores CCR e SI na bacia piloto do Córrego Sossego permitiu fazer as seguintes inferências: CCR_{ideal} apresenta-se como indicador adequado para avaliação do potencial de armazenamento de água; SI e CCR apresentam-se como indicadores apropriados para identificação das pressões das demandas hídricas da região em relação à área irrigada. Esses três indicadores poderão ainda ser utilizados com a finalidade de distribuir o volume de reservação potencial por unidades de reservação sobre a região, priorizando zonas com maiores demandas ou com maiores potenciais para captar água de chuva.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Com a finalização do estudo, algumas recomendações são feitas para o desenvolvimento de futuras pesquisas visando o aperfeiçoamento do dimensionamento de Macro WHS para pequenos sistemas de irrigação, em pequenas bacias hidrográficas:

- Integrar fatores econômicos e socioculturais ao procedimento metodológico desenvolvido no presente estudo.
- Aperfeiçoar o planejamento de Macro WHS por sua integração a outras estratégias de mitigação de déficit hídrico.

- Aprofundar a compreensão das incertezas produzidas pelos métodos e fatores envolvidos na estimativa das séries de disponibilidade e demanda hídricas, bem como pela qualidade da informação disponível.
- Avançar na compreensão da utilização dos indicadores CCR_{ideal} , CCR e SI no processo de otimização da configuração de Macro WHS (definição do número, localização e volume de cada unidade constituinte do sistema).

7 REFERENCIAS

ABDELMAHMOOD, M.; ELRAMLAWI, H. R.; MOHAMED, H. I. **Water balance Simulation Model for Optimal Reservoir Sizing and Multi-crop Cultivation Area for Small Scale Water Harvesting in rainfed farming System at Khor Abu Farga.** *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMICAL, ENVIRONMENTAL AND BIOLOGICAL SCIENCES (CEBS)*, 2015, Dubai.

ADHAM, A; WESSELING, J; RIKSEN, M; OUESSAR, M; RITSEMA, C. A water harvesting model for optimizing rainwater harvesting in the wadi Oum Zessar watershed, Tunisia. ***Agricultural Water Management***, v. 176, p. 191–202, 2016.

AL-ANSARI, N; EZZ-ALDEEN, M; KNUTSSON, S; ZAKARIA, S. Water Harvesting and Reservoir Optimization in Selected Areas of South Sinjar Mountain, Iraq. ***Journal of Hydrologic Engineering***, v. 18, p. 1607-1616, 2013.

ALLEN, G; PEREIRA, L; RAES, D; MARTIN, S. **Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.** FAO: Estudio FAO Riego y Drenaje 56. 2006.

ANA. Agência Nacional das Águas. **Manual de Procedimentos Técnicos e Administrativos de Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas.** Brasília: ANA, 2014.

ANDREINI, M; SCHUETZ, T; SENZANJE, A; ANDAH, W; CECCHI, P; BOELEE, E; GIESEN, V; KEMP-BENEDIKT, E; LIEBE, JENS. **Small Multi-Purpose Reservoir Ensemble Planning.** CPWF – Challenge Program on Water & Food: Project Report, Project number46. 2009.

ARAÚJO, A.; PRUSKI, F. F. Improving the determination of reservoir capacities for drought control. ***Stochastic Environmental Research and Risk Assessment***, v. 29, n. 1, p. 183-191, 2015.

BATISTA, N. L. F. **Utilização de indicadores de erosão hídrica e qualidade de solos na promoção da produção agrícola sustentável em pequena/microbacia hidrográfica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2016.

BARRON, J; KEMP-BENEDICT, E; MORRIS, J; BRUIN, A; WANG, G; FENCL, A. Mapping the potential success of agricultural water management. **Water resources and rural development**, v. 6, p. 24–49, 2015.

CAMPOS; SOUZA; LIMA. Risks and uncertainties in reservoir yield in highly variable intermittent rivers: case of the Castanhão Reservoir in semi-arid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, 59, v.6, 1184-1195, 2014.

CHOW, V. TE. **International Association of Scientific Hydrology**. Handbook of Applied Hydrology. Bulletin, v. 10, n. 1, p. 82–83, 1965.

COHIM, E. et al. **Dimensionamento de Reservatório para Captação de Água de Chuva para Irrigação**. In: 6º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA. Belo Horizonte- MG, 2007, 9 p.

DARÉ, J. C. **Sistemas De Irrigação Na Bacia Do Córrego Sossego Em Itarana**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2013.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **CropWat**. Disponível em: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>. Acesso em: 29 Jul. 2018.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Statistical Pocketbook**: Worl food and agriculture. Roma, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i4691e.pdf>>. Acesso em 21 Jan. 2017.

FAO; WWC– Food and Agriculture Organization of the United Nations e World Water Council. **Towards a water and food secure future**: Critical Perspectives for Policy-makers. 2015.

GEARH – Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos. **Desenvolvimento de instrumento para a gestão de recursos hídricos no Norte do Espírito Santo**. GEARH-DEA-CT-UFES. Relatório Final – MCT/FINEP/CT-HIDRO, V.1, 2003

GEORGIU, P. E.; PAPAMICHAIL, D. M. Optimization model of an irrigation reservoir for water allocation and crop planning under various weather conditions. **Irrigation Science**, v. 26, n. 6, p. 487–504, 2008.

GHEYI, H. R. et al. **Recursos hídricos em regiões semiáridas**. Editores: Hans Raj Gheyi, Vital Pedro da Silva Paz, Salomão de Sousa Medeiros, Carlos de Oliveira Galvão - Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, Cruz das Almas, BA: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. 282 p.,2012.

GOMIDE, F. **Sobre reservatórios e segurança hídrica**. GMD – Organização Industrial e Engenharia. 44 p., 2012.

HACHUM, AHMED; MOHAMMAD, M. E. . Optimal Reservoir Sizing for Small Scale Water Harvesting System. **Journal of Al-Radidain Engineering**, v. 15, n. 3, 2007, 19p.

HAI, M. **Water Harvesting**: An Illustrative Manual for Development of Micro-Catchment Techniques for Crop Production in Dry Areas. RELMA technical handbook series. Nairobi-Kenia, n.16, 54 p., 67 p, 1998.

HASSING, J. et al. **Integrated Water Resources Management in Action**. United Nations Educational, Scientific and Cultural organization, 2009, 22p. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001818/181891E.pdf>>

LANNA, A. E. **Gerenciamento de Bacia Hidrográfica**: Aspectos Conceptuais e Metodológicos. IBAMA, Brasília, 1995, 165 p.

LASAGE, R.; VERBURG, P. H. Evaluation of small scale water harvesting techniques for semi-arid environments. **Journal of Arid Environments**, v. 118, p. 48–57. 2015.

LEPORATI, M. et al. **La agricultura familiar en cifras**. In: AGRICULTURA FAMILIAR EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (Recomendaciones de Política). 2014, 486p.

LOPES, J.; SANTOS, R. **Capacidade de reservatórios**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, p. 9-13,2002.

MARQUES, P. E. **Desenvolvimento de Sistema de Apoio à Decisão para Alocação de Água na Agricultura Irrigada em Nível de Microbacia Hidrográfica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2015.

MDEMU, M. V. **Water productivity in medium and small reservoirs in the Upper East Region (UER) of Ghana**. Teses (Doutor em Ciências Agrárias) – Faculdade de Engenharia Agrícola na Universidade de Bonn, Alemanha, 2008.

MULTSCH, S.; EXBRAYAT, J.; KIRBY, M.; VINEY, N; FREDE, H; BREUER, L. Reduction of predictive uncertainty in estimating irrigation water requirement through multi-model ensembles and ensemble averaging. **Journal of Geoscientific Model Development**, v.8, p. 1233-1244, 2015.

MUTEKWA, V.; KUSANGAYA, S. Contribution of Rainwater Harvesting Technologies to Rural Livelihoods in Zimbabwe: The Case of Ngundu Ward in Chivi District. **Water SA**, v. 32, n. 3, p. 437–444, 2006.

NEITSCH, S. L; ARNOLD, J.G; KINIRY, J.R; WILLIAMS, J.R. **Grassland, soil and water research laboratory o agricultural research service**. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas, 2005, 494 p. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/1292/swat2005theory.pdf>>

NGIGI, S; SAVENIJE, H; THOME, J; ROCKSTRÖM, J; DE VRIES, F. Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya. **Agricultural Water Management**, v. 73, n. 1, p. 21–41, 2005.

NRCS- Natural Resources Conservation Service. Hydrologic Soil-Cover Complexes. In: **Part 630 Hydrology National Engineering Handbook**. (US Department of Agriculture). Washington DC, 20 p., 2004.

OEA- Organización de Estados Americanos. **Metodología para el Cálculo del Índice de Escasez de Agua Superficial**. Lima-Perú, 2004, 27 p.

OWEIS, T.; HACHUM, A. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. **Agricultural Water Management**, v. 80, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 57–73, 2006.

PANDEY, P; VAN DER ZAAG, P; SOUPIR, M; SINGH, V. A New Model for Simulating Supplemental Irrigation and the Hydro-Economic Potential of a Rainwater Harvesting System in Humid Subtropical Climates. **Water Resources Management**, v. 27, n. 8, p. 3145–3164, 2013.

PANDEY, P. K.; PANDA, S. N.; PANIGRAHI, B. Sizing On-farm Reservoirs for Crop-fish Integration in Rainfed Farming Systems in Eastern India. **Biosystems Engineering**, v. 93, n. 4, p. 475–489, 2006.

PAYEN, J.; FAURÈS, J.; VALLÉE, D. **Small Reservoirs and Water Storage for Smallholder Farming**: The case for a New Approach. Agriculture Water Management Business Proposal Document (AGWATER solutions). p.60, 2012.

PLÍNIO, T. Dimensionamento de Reservatórios em Rios. In: **Reservatórios**. 88 p.2013. Disponível em: <http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_reservatorios/capitulo110.pdf>

POGIAN, M. F. **Estimativa de vazão mínima em pequenas bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória-ES, 2016.

POLONI, D.M. **Desenvolvimento e aplicação de procedimento metodológico em suporte ao planejamento participativo para a redução de perda de solo em pequenas bacias hidrográficas com emprego da EUPS**. (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

PROJETO RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais**: Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Uso Potencial da Terra. v. 34, Folha SE 24 Rio Doce. Rio de Janeiro: IBGE, p. 554, 1987.

ROCKSTRÖM, J. Water Resources Management in Smallholder Farms in Eastern and Southern Africa: an Overview. **Earth**, p. 1–20, 2000.

ROY, D.; PANDA, S. N.; PANIGRAHI, B. Water balance simulation model for optimal sizing of on-farm reservoir in rainfed farming system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 1, p. 114–124, jan. 2009.

SARAIVA, I.; FERNANDES, W.; NAGHETINI, M. Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 1, p. 115–125, 2011.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 2: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005.

SCOTT, CHRISTOPHER; SILVA, P. Collective action for water harvesting irrigation in the Lerma-Chapala Basin, Mexico. **Water Policy**, v. 3, p. 555–572, 2001.

SHINDE, M.; SMOUT, I.; GORANTIWAR, S. D. Algorithms for sizing reservoirs for rainwater harvesting and supplementary irrigation. **Hydrology: Science {&} Practice for the 21st Century**, v. II, p. 480–486, 2004.

SHINDE, M.; GORANTIWAR, S.; SMOUT, I. Design and performance indicators for water harvesting irrigation tanks in India. *In: 30TH WEDC INTERNATIONAL CONFERENCE*, Vientiane, Lao PDR, 2004, n. 1990, p. 398–404, 2004.

SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 111–131, 1998.

SOARES, P. A.; PINHEIRO, A.; HEIL, K. Bacias Hidrográficas com Escassez de Dados Fluviométricos. **REA-Revistas de Estudos Ambientais (Online)**, v.12, n.1, p. 29–38, 2010.

SRIVASTAVA, R. C. Methodology for Optimizing Design of Integrated Tank. **Journal of water resources planning and management**, v. 122, n. December, p. 394–402, 1996.

STEENHUIS, T.S; TAYLOR, J.; EASTON, Z.; COLLICK, A; VAN DE GIESES, N; LEIBE, J.; AHMED, A; ANDREINI, M. **Rainfall-discharge relationship for Monssonal Climates**. In: Intermediate Results Dissemination Workshop held at the International Livestock Research Institute, Addis Ababa, Ethiopia, 5-6 February 2009. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). pp.141-151; 2009.

STUDART, TICIANA; CAMPOS, J. Incertezas nas Estimativas da Vazão Regularizada por um Reservatório. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 3, p. 81–94, 2001.

TEIXEIRA, E. et al. Experiências em Gestão dos Recursos Hídricos por Bacia Hidrográfica - Projeto Sossego: Integrando Experiências de Gestão de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Sustentável Local. In: Simpósio "*Experiências em Gestão dos Recursos Hídricos por Bacia Hidrográfica*". São Pedro-SP, 2007, 10 p. Disponível em: <http://www.labgestufes.com.br/sistema/downloads/80/artigo_pcj_2007_sossego.pdf>.

TEODORO, L. et al. O conceito de bacia hidrográfica ea importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, v. 20, p. 137–156, 2007.

USAID – UNITED STATES AGENCY INTERNATIONAL DEVELOPMENT. **Agricultural Water Management: Water and Development Strategy. Implementation Brief.** p.9, 2015

VAN-WAMBEKE, J.; PRIETO-CELI, M.; VIEYRA, M. J. FAO- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. **Captación y almacenamiento de agua de lluvia: Opciones Técnicas para la Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe.** Santiago-Chile, 2013.

VENOT, J.-P.; DE FRAITURE, C.; ACHEAMPONG, E. N. **Revisiting Dominant Notions: A Review of Costs Performance and Institutions of Small Reservoirs in Sub-Saharan Africa.** (IWMI Research Report 144). International Water Management Institute, Colombo- Sri Lanka, 2012, 39 p.

WISSER, D; FROLKING, S; DOUGLAS, E; FEKETE, B; SCHUMANN, A; VÖRÖSMARTY, CHARLES J. The significance of local water resources captured in small reservoirs for crop production – A global-scale analysis. **Journal of Hydrology**, v. 384, n. 3, p. 264–275, 2010.

XIE, H; YOU, L; TAKESHIMA, H. Invest in small-scale irrigated agriculture: A national assessment on potential to expand small-scale irrigation in Nigeria. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 251-264, 2017.

ZAKARIA, S; MUSTAFA, Y; MOHAMMED, D; ALI, S; AL-ANSARI, N; KNUTSSON, S. Estimation of annual harvested runoff at Sulaymaniyah Governorate, Kurdistan region of Iraq. **Natural Science**, v. 5, n. 12, p. 1272–1283, 2013.