



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

# **Simulações de Ampliações da Irrigação por Pivô Central na Bacia do Rio São Marcos**

Área de Concentração:  
Gestão Ambiental e Territorial

Linha de Pesquisa:  
Geoprocessamento

Eixos Temáticos:  
Sistema de Informação Geográfica

**Filipe S. Casulari Pinhati**

**Brasília**

**2018**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

**Simulações de Ampliações da Irrigação por Pivô Central na  
Bacia do Rio São Marcos**

**FILIPE S. CASULARI PINHATI**

Orientador: Osmar Abílio de Carvalho Júnior

Dissertação de Mestrado

Brasília – DF: Julho/2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

## **Simulações de Ampliações da Irrigação por Pivô Central na Bacia do Rio São Marcos**

**FILIPE S. CASULARI PINHATI**

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, linha de pesquisa Geoprocessamento, Eixo temático Sistema de Informações Geográficas, opção Acadêmica.

Aprovado por:

---

Osmar Abilio de Carvalho Junior, Doutor (UnB/Departamento de Geografia  
(Orientador)

---

Rogério Elias Soares Uagoda, Doutor (UnB/ Departamento de Geografia)  
(Examinador Interno)

---

Bruno Collischonn, Doutor (Universidade Federal do Rio Grande do Sul)  
(Examinador Externo)

Brasília-DF, 27 de julho de 2018

## FICHA CATALOGRÁFICA

PINHATI, FILIPE SAMPAIO CASULARI

Simulações de Ampliações da Irrigação por Pivô Central na Bacia do Rio São Marcos, 137 p., 297 mm, (UnB-GEA, Mestre, Gestão Territorial e Ambiental, 2018).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Departamento de Geografia

- |                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| 1. Sistema de Informação Geográfica | 2. Recursos Hídricos       |
| 3. Sensoriamento Remoto             | 4. Pivô Central            |
| 5. Simulação                        | 6. Disponibilidade Hídrica |
| 7. Balanço Hídrico                  | 8. Pequenos Reservatórios  |
| I. UnB-GEA                          | II. Título (série)         |

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e qualquer parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor, desde que citado o seu nome.

---

Filipe S. Casulari Pinhati

## **DEDICATÓRIA**

A minha esposa e musa Mariana Rodrigues Lirio, da Agência Nacional Águas (ANA), por ser minha esposa e mãe das minhas filhas e me apoiar em tudo, permitindo a conclusão desse trabalho.

Ao meu filho Raian de Sá Casulari Pinhati, que siga sempre em frente, devagar, mas constantemente.

Aos meus pais Salvador Henrique Pinhati e Maria das Graças Sampaio Pinhati por serem meus pais e formarem a pessoa que eu sou.

Ao Presidente Luís Inácio Lula da Silva, por ter ousado fazer do Brasil um país grande, justo e poderoso, e que sem as políticas criadas por sua administração de valorização do servidor público federal este trabalho não teria sido concebido.

A Charles Bukowski, pela inspiração para o dia a dia.

A Lemmy Kilmister, pela modelo de vida.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador **Dr. Osmar Abílio de Carvalho Junior** por ter me aceitado como orientando. Aos membros da banca, **Dr. Bruno Collischonn** (ANA), **Dr. Rogério Uagoda** (UnB) que me honraram ao aceitar o convite para participação na banca, e ao pesquisador **Dr. Lineu Neiva Rodrigues** (Embrapa), por ter me orientado em vários assuntos relacionados à irrigação neste trabalho.

Ao colega **Dr. Saulo Ayres de Souza** da Coordenação de Estudos Hidrológicos da Agência Nacional Águas (ANA) pelo seu fundamental apoio na concepção de uma ferramenta digital de cálculo de balanço hídrico e de regionalização de vazões, e no ensino de cálculo de regionalização de vazões.

Ao colega **Dr. Adalberto Meller** da Coordenação de Conjuntura dos Recursos Hídricos da Agência Nacional Águas (ANA) pelo seu apoio fundamental na organização de dados de reservatórios e cálculos de volume.

A colega **Ma. Teresa Luísa Lima de Carvalho** da Coordenação de Estudos Hidrológicos da Agência Nacional Águas (ANA) pelo seu apoio no ensino de cálculo de disponibilidade hídrica na bacia do Rio São Marcos.

Aa colega **Ma. Mariane Moreira Ravello** da Coordenação de Estudos Hidrológicos da Agência Nacional Águas (ANA) pelo seu apoio no entendimento da disponibilidade hídrica proporcionada por reservatórios.

Aos colegas **Dr. Alexandre Abdalla**, **Dr. Bolivar Antunes Matos** e **Me. Marcos Irineu Pufal** da Coordenação de Estudos Hidrológicos e **Dr. Marco Vinicius Castro Gonçalves** da Coordenação de Estudos Setoriais pelas horas dispendidas no apoio a melhoria dessa dissertação.

Ao colega **Dr. Wagner Vilella** da Coordenação de Planejamento da Agência Nacional Águas (ANA) por ter me apresentado o problema do conflito de água na bacia do Rio São Marcos e ter confiado a mim a capacidade de apresentar uma solução.

Ao Dr. Sérgio Rodrigues Ayrimoraes Soares, Superintendente de Planejamento de Recursos Hídricos da Agência Nacional Águas (ANA) pelo apoio e encorajamento à consecução a este trabalho.

## RESUMO

A Bacia do Rio São Marcos (BARSAM) se caracteriza como um dos exemplos mais proeminentes de conflito pelos recursos hídricos no Brasil, mais especificamente entre os setores de irrigação por pivôs centrais e de geração de energia hidroelétrica. A capacidade máxima de expansão da irrigação que talvez a BARSAM consiga suportar é uma informação fundamental para o planejamento dos usos da água na bacia, e para uma futura solução com relação a disputa da água com o setor elétrico. Para se conhecer a capacidade máxima hidrológica e economicamente viáveis de ampliação da irrigação na bacia foi necessário um estudo multidisciplinar que envolveu os campos da geografia, geoprocessamento, programação, agronomia, hidráulica e hidrologia. A data base do estudo foi setembro de 2016, quando existiam 104.828 hectares irrigados por pivôs centrais, tendo sido mapeados 588.958 hectares de terras aptas para ampliação da irrigação por pivô central, sendo que apenas 246.709 hectares estariam disponíveis se os pivôs centrais tivessem tamanho mínimo de 25 hectares. Posteriormente as simulações com diferentes cenários, nos quais variaram os parâmetros de potência necessária de bombeamento para os pivôs centrais potenciais (PCPs) irrigando milho durante a safra de inverno, juntamente com a influência de pequenos reservatórios virtuais para o aumento da disponibilidade hídrica, mostraram que a ampliação da área irrigada na BARSAM provavelmente ficará limitada a 64.608 hectares, desde que acompanhada da ampliação da reservação de água.

## ABSTRACT

Disputes over the use of water are a reality in many water basins within Brazil. The Sao Marcos river basin (BARSAM) is home to one of the most important examples of conflicts over water resources, specifically between centre pivot irrigators and the hydroelectric power generation sector. The maximum area within the BARSAM within which centre pivot irrigation may be successfully undertaken is fundamental information for planning future uses of water resources in the basin. To balance the competing interests of centre pivot irrigators and the hydroelectric power generation sector, it is important to know how much land could be developed for centre pivot irrigation as this helps to predict future water demands. To derive the extent of the total area within the BASRAM over which centre pivot irrigation may be hydrologically and economically viable, a multidisciplinary study incorporating geography, geoprocessing, agronomy, hydrology, and hydraulics was necessary. As at 17 September 2016, mapped data indicated 104,828 hectares (ha) of land within the BASRAM was irrigated by centre pivots. However, a further 588,958 ha of land was potentially suitable for centre pivot irrigation. If 25 ha was adopted as the minimum irrigated area, the total potentially suitable land area was reduced to 246,709 ha. Further simulations for a range of different scenarios for the irrigation of corn during the winter season (based on limiting parameters such as water balance, the power necessary to pump water to the virtual centre pivots (PCPs), and an optimizing factor such as the influence of virtual small dams to increase water availability), indicated a more realistic figure for the total area potentially suitable for the growth of centre pivot irrigation within the BARSAM is 64,608 ha.



## SUMÁRIO

<b>FICHA CATALOGRÁFICA</b> .....	4
<b>DEDICATÓRIA</b> .....	5
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	6
<b>RESUMO</b> .....	7
<b>ABSTRACT</b> .....	8
<b>SUMÁRIO</b> .....	9
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	13
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	14
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 APRESENTAÇÃO.....	14
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	15
1.3 OBJETIVO PRINCIPAL .....	17
C1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
D1. FLUXOGRAMA.....	19
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	20
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	22
<b>MAPEAMENTO DE SISTEMAS DE PIVÔS CENTRAIS NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO</b> .....	22
2.1 INTRODUÇÃO.....	22
2.2 ÁREA DE ESTUDO .....	23
2.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
2.3.1 IMAGENS DE SATÉLITE.....	24
2.3.2 MAPEAMENTO DOS PIVÔS CENTRAIS EM SETEMBRO/2016 .....	24
2.3.3 ANÁLISE MULTITEMPORAL DA INSTALAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS E DE SEUS COMPONENTES.....	26
2.3.4 ANÁLISE DAS CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DA EVOLUÇÃO DA IRRIGAÇÃO .....	30

2.4 RESULTADOS .....	31
2.4.1 RESULTADOS DO MAPEAMENTO PCEs .....	31
2.4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE MULTITEMPORAL .....	33
2.4.3 CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DA EVOLUÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL.....	37
2.5. CONCLUSÃO.....	40
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>46</b>
<b>REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS .....</b>	<b>46</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	46
3.2 ÁREA DE ESTUDO .....	47
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.4 RESULTADOS .....	51
3.5. CONCLUSÃO.....	61
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>63</b>
<b>IMPACTO DOS PEQUENOS RESERVATÓRIOS SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA E SIMULAÇÕES DE BALANÇO HÍDRICO NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS.....</b>	<b>63</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	63
4.2 ÁREA DE ESTUDO .....	65
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
4.3.1 - ESTIMATIVA DO VOLUME DOS RESERVATÓRIOS.....	66
4.3.2 - DEMANDA HÍDRICA DOS SISTEMAS DE PIVÔ CENTRAL PARA O PLANTIO DO MILHO DA SAFRA DE INVERNO .....	68
4.3.3. DISPONIBILIDADE HÍDRICA REAL MÍNIMA NOS RESERVATÓRIOS .....	69
4.3.4 – REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES E ELABORAÇÃO DO MAPA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA .....	71
4.3.5 - BALANÇO HÍDRICO.....	73
4.3.6. EFEITOS SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA NA UHE BATALHA .....	75
4.4 RESULTADOS .....	75

4.4.1 – RESULTADO DA ESTIMATIVA DE VOLUMES DOS RESERVATÓRIOS .....	75
4.4.2 – RESULTADOS DOS EFEITOS DOS RESERVATÓRIOS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	77
4.4.3 – RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO .....	81
4.4.4 – EFEITOS SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA NA UHE BATALHA .....	83
4.5 CONCLUSÃO.....	84
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>88</b>
<b>GEOPROCESSAMENTO APLICADO NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS ADEQUADAS À INSTALAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS .....</b>	<b>88</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	88
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	89
5.2.1 ELABORAÇÃO DO MAPA DE ÁREAS ADEQUADAS A INSTALAÇÃO DE PCPs .....	89
5.2.2 CRUZAMENTO DE CAMADAS .....	89
5.2.3 CRIAÇÃO DO MAPA DE MÁXIMA EXPANSÃO DE PCPs .....	90
5.3. RESULTADOS .....	91
5.4. CONCLUSÃO.....	99
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>102</b>
<b>CENÁRIOS DE AMPLIAÇÃO DA AGRICULTURA IRRIGADA NA BARSAM.....</b>	<b>102</b>
6.1. INTRODUÇÃO.....	102
6.2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	105
6.2.1 SIMULAÇÕES E BALANÇO HÍDRICO: OFERTA E DEMANDA.....	105
6.2.2. DIMENSIONAMENTO SIMPLIFICADO DOS PIVÔS CENTRAIS POTENCIAIS (PCPs) .....	106
6.2.2. TABELA RESUMO DOS CENÁRIOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES.....	115
6.2.3. DEFINIÇÃO DO CENÁRIO DE AMPLIAÇÃO DE IRRIGAÇÃO MAIS PROVÁVEL E SEUS EFEITOS SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA PELA UHE BATALHA .....	116
6.3. RESULTADOS .....	116
6.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS PCPS POR CLASSE DE POTÊNCIA DE MOTOBOMBA .....	116

6.3.2. SIMULAÇÕES DE AMPLIAÇÃO DE IRRIGAÇÃO .....	117
6.3.3. DEFINIÇÃO DOS MELHORES PCPs E EFEITOS SOBRE A UHE BATALHA .....	130
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>132</b>
<b>CONCLUSÃO FINAL .....</b>	<b>135</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ADASA – Agencia Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal

ANA – Agência Nacional de Águas

ASM – Alto São Marcos

BARSAM – Bacia do Rio São Marcos

BHO – Base Hidrológica Ottocodificada da Agência Nacional de Águas (ANA)

BSM – Baixo São Marcos

HSV – Hue, Saturation, Value

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão de Águas

INCRA – Instituto Nacional de Colonização Agrícola e Reforma Agrária

LANDSAT- Land Remote-Sensing Satellite

MMA – Ministério do Meio Ambiente

NASA – National Aeronautics and Space Administration

OLI - Sensor Operational Land Imager

PCE – Pivô Central Existente

PCP – Pivô Central Potencial

SEMARH – Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Goiás

SIGEF – Sistema de Gestão Fundiária do INCRA

SRTM – Shuttle Radar Thematic Mapping

UHE – Usina Hidroelétrica

USGS – United States Geological Service

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO

O aumento da população mundial torna necessária a ampliação da oferta de alimentos e empregos para garantia da qualidade de vida. Isso implica maiores necessidades de água, pressão de uso e ocupação dos solos, e oferta de energia (Silva, 2015). Um dos maiores desafios da humanidade neste século é garantir segurança alimentar e ambiental a uma população mundial que, em 2030, será de aproximadamente 8,3 bilhões de pessoas. Para que esse desafio possa ser vencido sem provocar conflitos pelo uso da água, devem-se procurar alternativas para compatibilizar o aumento na produção de alimentos com os recursos hídricos disponíveis (Rodrigues et al., 2007).

Nesse sentido, a agricultura irrigada é apontada como solução de equilíbrio para a demanda mundial por alimentos, pois responde por 42% da produção agrícola de alimentos de consumo humano direto do mundo, ocupando aproximadamente 18% das terras aráveis, contribuindo para a redução da extração da cobertura vegetal nativa para a expansão agrícola por apresentar vantagens no aumento da produtividade decorrente do uso intensivo do solo (Furquim & Abdala, 2016). As atividades agrícolas utilizam 65% do uso consuntivo da água, a qual é quase integralmente utilizada pela irrigação. É importante notar que, para produzir 1 kg de batata, desde seu plantio até a entrega para o consumidor gastamos 133 L de água; de arroz, 2.500 L; de carne de frango, 3.700 L; e de carne de boi, 17.000 L. Essa é a razão pela qual a agropecuária demanda muita água (Reichardt & Timm, 2016).

Para tornar esse cenário ainda mais desafiador, inúmeros estudos vêm associando mudanças no padrão da distribuição, frequência e intensidade de eventos extremos hidrometeorológicos com as mudanças climáticas antropogênicas (Asadieh & Krakauer, 2015; Dankers et al., 2013; Field, 2012; IPCC, 2012; Min et al., 2011). Os resultados dessas mudanças impactam fortemente o setor agrícola (Rosenzweig et al., 2014; Aghakouchak et al., 2012; IPCC, 2012). As secas recorrentes parecem influenciar o crescimento da irrigação, pois a seca diminui a disponibilidade de água e cria a necessidade de mais irrigação (Wenger et al. (2017). A irrigação é a garantia de produção com relação às necessidades hídricas e redução dos riscos de quebra de safra por seca (Testezlaf, 2017).

No atual cenário de mudanças climáticas, em regiões com estações chuvosas bem definidas, como no caso da bacia do rio São Marcos, eventos climáticos de seca recorrentes causam impactos muito mais fortes na agricultura, e na geração de renda, do que em regiões com chuvas bem distribuídas ao longo do ano. A correlação entre eventos climáticos e danos na agricultura é difícil de se modelar,

exceto para os eventos mais extremos. No entanto, esse tipo de dano torna-se menos proeminente se a irrigação estiver presente (Bryla-Tressler et al., 2011).

Em 2013, a Política Nacional de Irrigação (Lei nº 12.787/2013) foi aprovada devido à importância da irrigação para a produção de alimentos e commodities. Essa política possui os seguintes objetivos: incentivar a ampliação da área irrigada; reduzir riscos climáticos inerentes à atividade agropecuária; contribuir para o abastecimento do mercado interno de alimentos e gerar excedentes agrícolas para exportação; e incentivar projetos privados de irrigação. Entre os incentivos criados estão incentivos fiscais e o crédito para aquisição de equipamentos de irrigação. A proposta criou também o Sistema Nacional de Informações sobre Irrigação com o objetivo do uso racional dos recursos hídricos.

Em termos gerais, hoje no Brasil existem 66 milhões de hectares de terras cultivadas, das quais se irriga 1 ha a cada 10 ha. Até 2030, a Política Nacional de Irrigação ambiciona ampliar essa proporção para 2 ha irrigados para cada 10 ha, apesar do potencial de irrigação ser de 3 ha irrigados para cada 10 ha de terras aráveis.

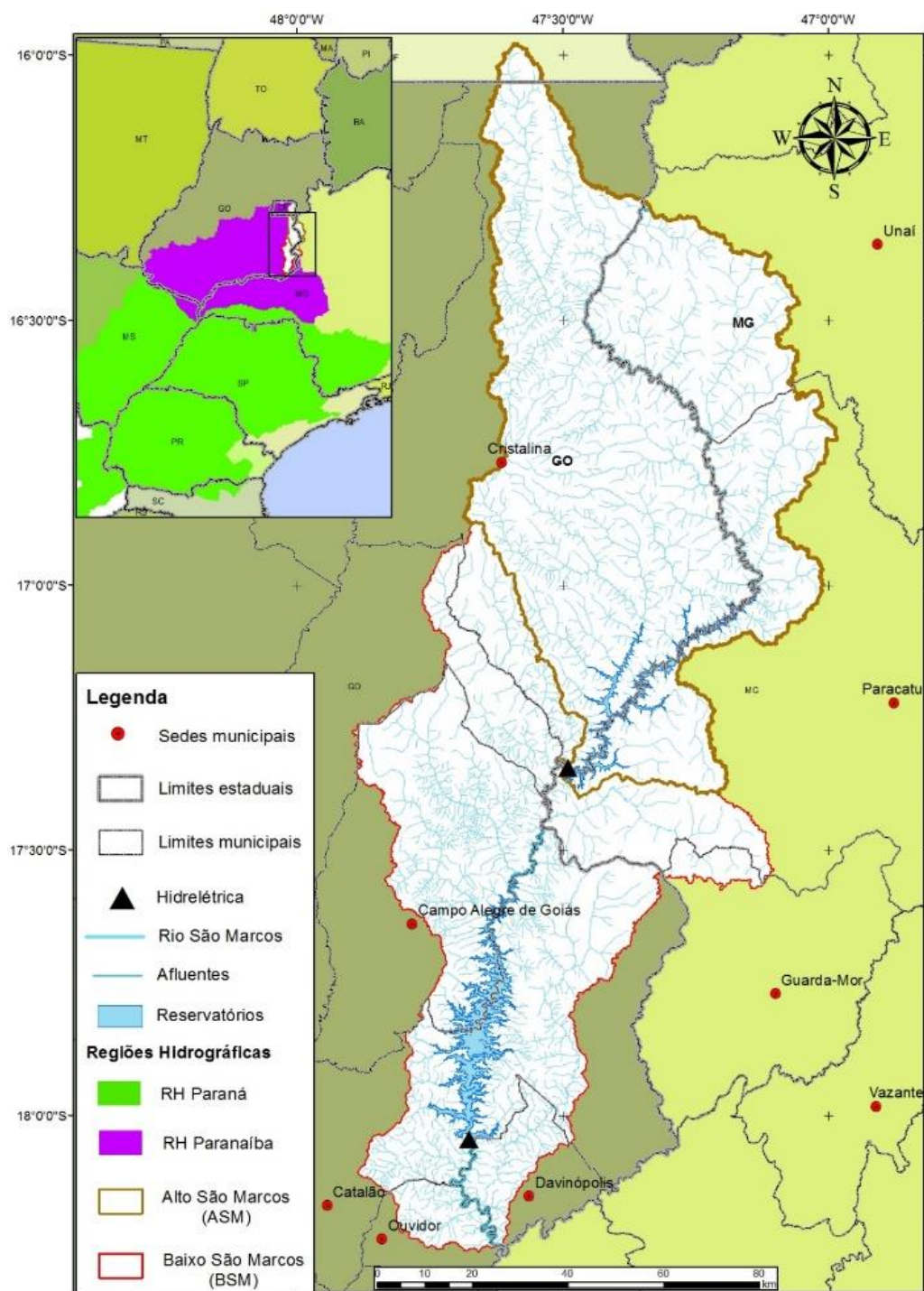
## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O estudo foi conduzido na bacia do rio São Marcos (**BARSAM**), que é dividida em sua parte alta e baixa, doravante chamadas de Alto São Marcos (**ASM**), e Baixo São Marcos (**BSM**), respectivamente. O ASM é uma região com área de 6.669 km<sup>2</sup> e com centenas de pivôs centrais, caracterizada por ser a porção da BARSAM que fica a montante da usina hidrelétrica de Batalha (**Figura 1.1**).

A UHE Batalha teve sua construção iniciada em meados de 2008, com previsão de potência instalada de 52,5 MW. A barragem de 50 m de altura, está situada na divisa dos municípios de Cristalina (GO) e Paracatu (MG). O enchimento atingiu sua cota mínima operacional (785 metros) no dia 19 de janeiro de 2013.

No ASM, o conflito entre os setores de agricultura irrigada e geração de energia hidroelétrica envolve, por um lado, dezenas de agricultores irrigantes, produzindo alimentos e commodities, porém com grande concentração de terras irrigadas nas mãos de poucos grupos econômicos, enquanto por outro lado, existe o grupo econômico que explora a geração de energia hidroelétrica pela UHE Batalha. Trata-se de um caso de extrema complexidade da gestão dos recursos hídricos pelo fato de estar vinculada a quatro órgãos gestores de recursos hídricos; três comitês de bacia: Paranaíba; Lago Paranoá e Comitê Estadual dos Rios Corumbá, Veríssimo e São Marcos; além de quatro conselhos de recursos hídricos: Conselho Nacional de Recursos Hídricos; Conselho Estadual de Recursos Hídricos

de Minas Gerais; Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Goiás e Conselho de Recursos Hídrico do Distrito Federal (Silva & Hora, 2015).



**Figura 1.1** Localização da BARSAM na bacia do rio Paranaíba e na região hidrográfica do Paraná. A UHE Batalha encontra-se próxima a divisa entre as regiões do ASM e do BSM.

Nesse contexto de conflitos pelo uso da água e de sobreposições de atribuições de órgãos públicos e de associações civis, o conhecimento da capacidade máxima da BARSAM de suportar a



ampliação da agricultura irrigada por pivô central é um fator chave para o planejamento e gestão dos recursos hídricos naquela bacia.

Contudo, é preciso inovar dentre os estudos de capacidade de suporte a irrigação para o planejamento territorial de bacias hidrográficas. Isso porque os estudos de ampliação de áreas irrigadas têm falhado em indicar: (a) a intensidade de irrigação; (b) a fonte de irrigação; (c) as culturas irrigadas; e (d) a localização precisa das áreas irrigadas (Thenkabail, 2009).

A intensidade de irrigação e os tipos de culturas irrigadas têm influência no total de água consumida. A fonte de irrigação é essencial para determinar os padrões do uso do recurso hídrico e os impactos no meio ambiente, e em determinar o impacto no uso da água subterrânea e os problemas com o consumo acima da capacidade de recarga do aquífero.

Por exemplo, Brunckhorst & Bias (2014) utilizaram ferramentas de SIG para encontrar as áreas propícias para irrigação na porção de Cristalina-GO da BARSAM, mas não incluíram em suas análises os fatores de intensidade de irrigação, fonte de irrigação e as culturas irrigadas, justamente os fatores diretamente relacionados com o componente hídrico do planejamento de ampliação de áreas irrigadas.

### 1.3 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo do presente estudo é avaliar a possibilidade de expansão da área irrigada por pivôs centrais na BARSAM, avaliando a capacidade de suporte à ampliação da irrigação do ASM e do BSM considerando a disponibilidade hídrica proporcionada por reservatórios construídos por meio de barramentos nos cursos d'água.

#### C1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A. Mapear a evolução da irrigação por pivôs centrais na BARSAM; ano após ano;
- B. Mapear os sistemas de irrigação existentes na bacia em setembro de 2016; calculando as áreas irrigadas dos pivôs centrais existentes, doravante chamados de (PCEs);
- C. Avaliar as causas e consequências da evolução da irrigação na bacia;
- D. Estimar o volume de água contida nos reservatórios no ano de 2016 e sua capacidade em aumentar a disponibilidade hídrica na bacia;
- E. Regionalizar as vazões e calcular a disponibilidade hídrica na bacia;
- F. Mapear e calcular as áreas disponíveis e adequadas para instalação de novos pivôs centrais, doravante chamados de pivôs centrais potenciais (PCPs);

G. Calcular o a área máxima de PCPs, considerando diferentes cenários que envolvam o balanço hídrico e diferentes potências de estações de bombeamento necessárias conforme as características de cada PCPs;

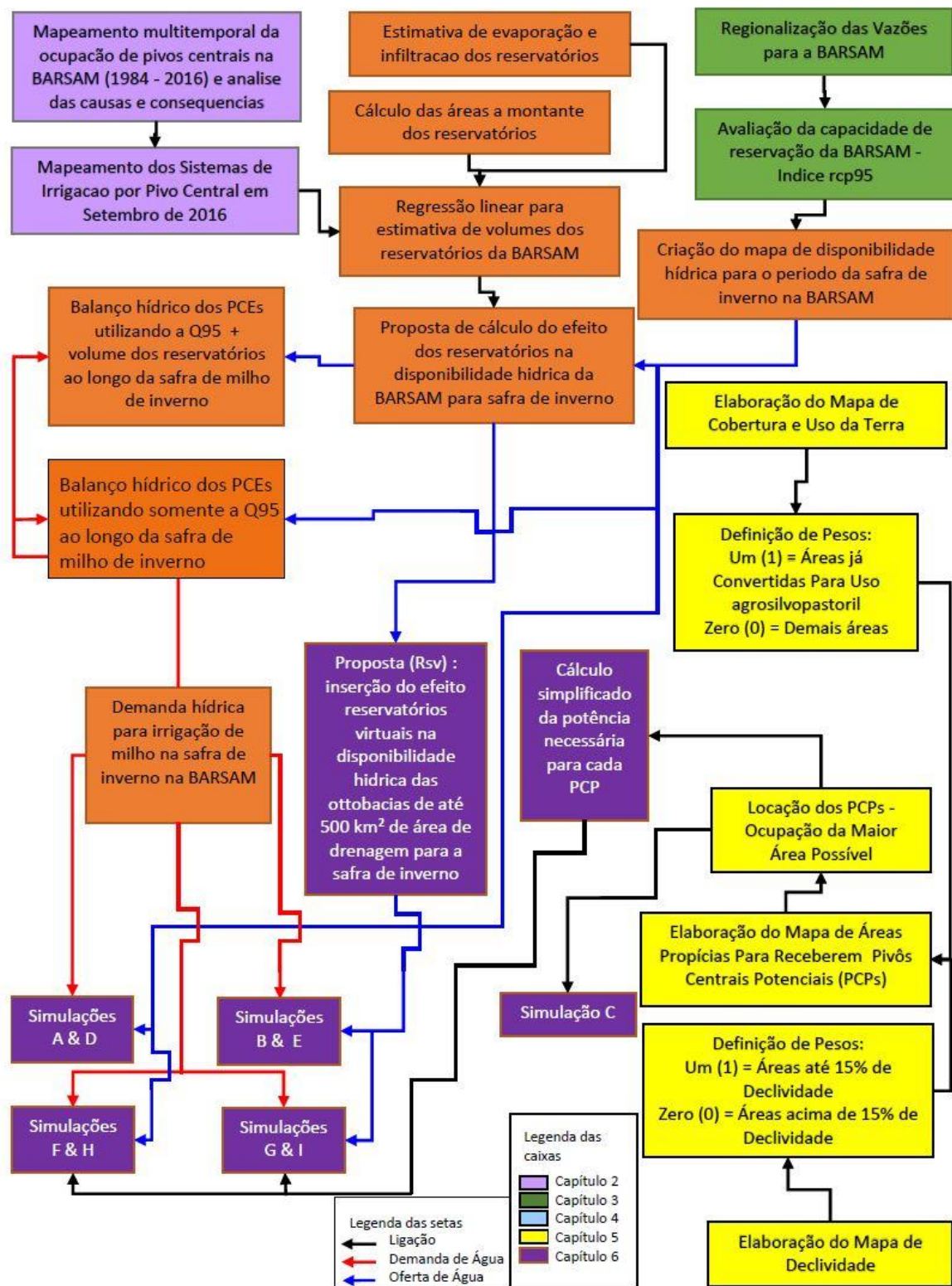
#### 1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

No desenvolvimento deste estudo foram utilizados os seguintes materiais:

- Trechos de drenagens e otobacias da base hidrográfica ottocodificada (BHO) –Bacia do Rio Paranaíba - escala 1:100.000 (Agência Nacional de Águas, 2014);
- Série de vazões dos rios da BARSAM (ANA, Sistema Hidro);
- Série de dados pluviométricos do MERGE;
- Série de dados de produtividade agrícola e dos municípios da bacia (IBGE);
- Pontos de outorga de 2015 em cursos d'água de domínio da União (ANA) e dos estados e do Distrito Federal (SEMARH/GO; IGAM/MG e ADASA/DF);
- Dados fundiários dos imóveis rurais certificados (INCRA/SIGEF – 2015);
- Limites municipais obtidos a partir do levantamento dos setores censitários (IBGE, 2010);
- Mosaico de imagens dos satélites RapidEye de 2011 e 2012 (MMA);
- Mosaico de imagens do satélite Landsat 8 (OLI) para a bacia em estudo, resolução espacial de 30 m reamostradas para 15 m pela técnica HSV, órbitas/pontos: 220/70, 220/71, 220/72, 221/70, 221/71 e 221/72, todas entre os meses de março e abril de 2015 - USGS;
- Mosaico de imagens do satélite Sentinel, com resolução espacial de 10 m, órbitas/ponto: 22KHE, 22KHF, 23KKA, 23KKB e 23LKC, todas do mês de setembro de 2016;
- Mosaico de Imagens de alta resolução espacial do Bing Aerial e Google Earth Pro;
- Modelo Digital de Elevação – SRTM, resolução espacial de 30 m (NASA, 2000);

Tendo em vista o número de objetivos específicos, essa dissertação foi separada em capítulos, sendo que cada capítulo foi configurado no formato de artigo científico e tratará de um ou mais desses objetivos. A metodologia proposta para a consecução de todos os objetivos pode ser visualizada no fluxograma apresentado na **figura 1.2**.

## D1. FLUXOGRAMA



**Figura 1.2** – Fluxograma dos processos adotados neste trabalho. As cores indicam processos correlacionados com objetivos específicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHAKOUCHAK, A.; EASTERLING, D.; HSU, K.; SHUBERT, S.; SOROOSHIAN, S. Extremes in a Changing Climate - Detection, Analysis and Uncertainty. **Springer Science & Business Media**. v.65, 2012.

ASADIEH, B.; KRAKAUER, N. Y. Global Trends in Extreme Precipitation: Climate Models vs. Observations. **Hidrology and Earth System Sciences**, v.19, p.877-891, 2015

BRUNCKHORST, A.; BIAS, E. de S. Aplicação de SIG na Gestão de Conflitos Pelo Uso da Água na Porção Goiana da Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos, Município de Cristalina – GO. **Geociências**, v.33, n.2, p. 228-243, 2014.

BRYLA-TRESSLER, E, SYROKA, J; DANA, J., MANUAMORN, O. P.; LOTSCH, A.; DICK, W.; STOPPA, A.; CALMANTI, S.; CHAVEZ, E.; GINE, X.; VARANGIS, P.; HESS, U.; JAFFEE, S.; ARCE, C.; SKEES, J.; MIRANDA, M.; CARPENTER, R.; MAHUL, O.; ITTURIOZ, R.; ROHRBACH, D.; ARIAS, D.; NASH, J.; IBARRA, H.; VALDIVIA, P.; PARIZAT, R.; CHOUDHARY, V.; SADLER, M. Weather index insurance for agriculture: guidance for development practitioners. **World Bank: Agriculture and Rural Development**. Discussion Paper 50, 2011.

DANKERS, R., ARNELL, N. W., CLARK, D. B., FALLOON, P. D., FEKETE, B. M., GOSLING, S. N., HEINKE, J., KIM, H., MASAKI, Y., SATOH, Y., STACKE, T., WADA, Y., AND WISSER, D. First Look at Changes In Flood Hazard In The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v.111, p.3257–3261, 2013.

FIELD, C. B. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2012.

FURQUIM, M. G. D.; ABDALA, K. de O. Caracterização Preliminar da Agricultura Irrigada em Cristalina-GO, A Estreita Relação Entre Desenvolvimento Sustentável e o Crescimento Econômico. **Irriga**, v. 1 n. 1, p. 129-134, 2016.

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

IPCC [FIELD, C. B.; BARROS V.; STOCKER, T. F.; QIN D.; DOKKEN, D. J.; EBI K. L.; MASTRANDREA M. D.; MACH K. J.; PLATTNER G-K.; ALLEN S. K.; TIGNOR M; MIDGLEY, P. M.(eds.)].: **Summary for Policymakers. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012.

MIN, S.-K., ZHANG, X., ZWIERS, F. W., AND HEGERL, G. C Human Contribution To More-Intense Precipitation Extremes, **Nature**, v.470, p.378–381, 2011.

RODRIGUES, L. N.; SANO, E; de AZEVEDO, J.A.; da SILVA, E.M. Distribuição espacial e área máxima do espelho d'água de pequenas barragens de terra na bacia do rio Preto. **Espaço & Geografia**, v.10, p. 379-400, 2007.

ROSENZWEIG, C.; ELLIOTT, J.; DERYNG, D.; RUANE, A. C.; MÜLLER, C.; ARNETH, A.; BOOTE, K. J.; FOLBERT, C.; GLOTTER, M.; KHABAROV, N.; NEUMANN, K.; PIONTEK, F.; PUGH, T. A. M.; SCHMID, E.; STEHFEST, E.; YANG, H.; JONES, J. W. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3268-3273, 2014.

SILVA, L. P. da. **Hidrologia: Engenharia e Meio Ambiente**. 1. Ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SILVA, L.; HORA, M. Conflito pelo uso da água na bacia hidrográfica do rio são marcos: estudo de caso da UHE Batalha. **Engevista**, v. 17, n. 2, p. 166-174, 2015.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, Sistemas e Aplicações**. Feagri, Unicamp, Campinas, 2017.

THENKABAIL, P.; DHEERAVATH, V.; BIRADAR, C.; REDDY, G.; NOOJIPADY, P.; Irrigated área maps and statistics for India using remote sensing techniques: A significant breakthrough. **Indian Council of Agricultural Research (ICAR)**, 2009

## CAPÍTULO 2

### MAPEAMENTO DE SISTEMAS DE PIVÔS CENTRAIS NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

#### 2.1 INTRODUÇÃO

De forma simplificada, um pivô central é formado por um conjunto de barras com aspersores que giram em torno de um eixo central, irrigando uma área com formato circular. Atualmente, o pivô central é o sistema de irrigação automatizado mais utilizado no mundo (Testezlaf, 2017). Esse sistema apresenta diversas vantagens, tais como: economia de mão-de-obra; alta produtividade (Mantovani et al., 2009; Bernardo et al., 2008; Perroni, 2008; Santos et al., 2008; Sandri et al., 2009; Wenger et al., 2017); grande versatilidade (da Silva & de Azevedo, 1998; Jacinto, 2001); possibilidade de quimigação e de total automação (Testezlaf, 2017); boa uniformidade de irrigação, manutenção do alinhamento e da velocidade em todas as áreas irrigadas (Perroni, 2008); evolução da tecnologia conjugada a assistência técnica de engenheiros agrônomos; proteção às variações climáticas (por exemplo, o veranico). Além disso, como todo sistema de irrigação, permite a produção de duas ou mais safras por ano com colheitas na entressafra e protege os agricultores contra variações climáticas inesperadas. A eficiência de uso da água em pivôs centrais varia entre 60% a 85% (Ribeiro, 2008; Evangelista, 2010). O pivô central possui a menor relação “potência da bomba x área irrigada” dentre os sistemas de irrigação por aspersão de alta vazão devido à capacidade de irrigar grandes áreas, mas acarreta um alto custo da energia elétrica (Perroni, 2008).

As principais causas de deficiências no uso de pivôs centrais são as perdas de água por deriva e evaporação, principalmente nas irrigações nas horas mais quentes e com mais ventos (Ortíz et al., 2009); os solos, que não devem ter textura pesada (maior fração argila) para evitar empoçamento de água (Mantovani et al., 2009); a alta intensidade de irrigação na extremidade do pivô, o que pode acarretar escoamento superficial, e a perda de aproximadamente 20% da área irrigada no caso dessa ser um quadrado (Perroni, 2008). A intensificação da irrigação pode causar a salinização do solo (Reichardt & Timm, 2016), lixiviação de nitrato (Chen et al., 2017) e de pesticidas (Reyna et al., 2014). Nas Grandes Planícies, Meio Oeste dos EUA, região com médias de pluviosidade entre 400 a 500 mm.ano<sup>-1</sup>, a rápida depleção do Sistema de Aquíferos por uso intensivo de irrigação por pivôs centrais tem sido considerado um grave problema (Wenger et al., 2017).

O mapeamento e evolução temporal das áreas irrigadas por imagens de satélite são úteis no gerenciamento hídrico e agrônomo, estimando a produção agrícola e a demanda humana de água ao longo do tempo. Nesse contexto, o levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil

em 2014 (ANA & EMBRAPA, 2016) objetivou o mapeamento dos pivôs centrais a partir de imagens de média resolução espacial (Landsat 8 – sensor OLI, composição HSV com 15 metros de resolução espacial). No entanto, esse levantamento não identificou os demais equipamentos de irrigação e os locais precisos de captação da água, para o posterior cálculo do balanço hídrico.

Uma das principais áreas de concentração de pivôs centrais do Brasil é a Bacia do Rio São Marcos (BARSAM), contendo alta produtividade agrícola. No entanto, as bases de dados da BARSAM são insuficientes para o adequado planejamento e gestão dos recursos hídricos, faltando dados precisos para o controle e fiscalização das áreas irrigadas por pivôs centrais e de seus pontos de captação de água nos mananciais.

A presente pesquisa possui os seguintes objetivos: (a) mapear a evolução anual de pivôs centrais na BARSAM no período 1984-2016; (b) mapear em detalhe os componentes dos sistemas de irrigação dos PCEs; e (c) avaliar as causas e as consequências da evolução da irrigação na BARSAM. O entendimento da dinâmica da área irrigada e de seus diferentes condicionantes de mudança é uma ferramenta importante no planejamento de ações futuras.

## 2.2 ÁREA DE ESTUDO

A BARSAM foi subdividida em Alto São Marcos (ASM) e Baixo São Marcos (BSM) para fins de planejamento. O relevo das partes altas do ASM e do BSM vai de plano a ondulado. As áreas planas são expressivas e economicamente muito importantes. Essas áreas situam-se nas formações de Planaltos e Terraços (com declividades de até 3%) e vales rasos com fundos planos, onde ocorrem as veredas, que são fisionomias com formato linear onde ocorrem solos hidromórficos ao longo de estreitos cursos d'água e próximas às suas nascentes (Tubelis, 2009).

A série histórica de 1973 a 2011 do posto pluviométrico da ANA em Cristalina demonstrou que o período chuvoso concentra entre o dia 27 de outubro a 7 de abril. Naquela bacia a ocorrência de veranicos é fenômeno climático comum. Esse posto pluviométrico chegou a registrar veranicos com mais de 30 dias de duração, praticamente descaracterizando a estação chuvosa (Silva & Ferreira, 2015).

A BARSAM, principalmente no ASM, é caracterizada por ser uma região de alta produtividade agrícola, com dois dos principais municípios da bacia, Cristalina (GO) e Unai (MG), na 5ª e na 24ª posição de maiores PIB agrícolas do Brasil (IBGE, 2015). O crescimento da ocupação dessa bacia hidrográfica por equipamentos de pivô central ao longo dos anos vem acontecendo de forma evidente.

As áreas irrigadas não são exclusivas das grandes commodities agrícolas para exportação como algodão, milho, sorgo e soja, por isso o sistema econômico agrícola aplicado na BARSAM não pode ser caracterizado como *plantation*. Isso porque culturas importantes para o mercado interno também

são cultivadas, e a irrigação tem um importante papel nisso. Por exemplo, no município de Cristalina, que ocupa 37% da área da bacia, são plantados sob pivôs centrais culturas como batata inglesa, alho, feijão, tomate, cebola, café e trigo (Brunckhorst & Bias, 2014).

Desde os primeiros projetos de irrigação no início da década de 80, os pivôs-centrais foram adotados como os equipamentos ideais para se irrigar as grandes extensões dos Planaltos e Terraços da bacia. Quando elétricos, os pivôs centrais têm um elevado grau de eficiência energética, enquanto a taxa de eficiência no uso da água e a baixa demanda de mão-de-obra para sua operação transformaram os pivôs-centrais no principal sistema de irrigação na região.

## 2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.3.1 IMAGENS DE SATÉLITE

A presente pesquisa utilizou imagens da missão Sentinel-2 que é composta por dois satélites lançados recentemente. O conjunto Sentinel-2 (S2A lançado em 2015 e o S2B lançado em 2017) é a primeira geração de satélites operacionais da ESA Earth Online para a detecção ótica multitemporal em superfícies continentais em escala global, com resolução espacial de 10 a 20 metros, e com resolução temporal de 5 a 10 dias (Ferrant et al., 2017).

Complementarmente, nós utilizamos as plataformas gratuitas de imagens de satélite do Google Earth Pro e o Bing Satellite acoplado ao ArcGis. Esses provêm dados de resolução espacial alta e média (dos sensores TM e ETM+, dos satélites Landsat 5 e 7, respectivamente), extremamente úteis para análises multitemporais. O Google Earth Pro tem sido amplamente utilizado para o mapeamento da cobertura e uso da terra, devido à disponibilização gratuita de imagens com alta resolução espacial (Taylor & Lovell, 2012; Jacobson et al., 2015; Patel et al., 2014). Embora essas imagens possuam baixa resolução radiométrica, com bandas apenas no espectro do visível, elas são ricas em textura, tons e características geométricas (Hu et al., 2013). Existem ainda outras fontes de imagens de satélite gratuitas, como as do satélite Sentinel-2, também de media resolução espacial.

### 2.3.2 MAPEAMENTO DOS PIVÔS CENTRAIS EM SETEMBRO/2016

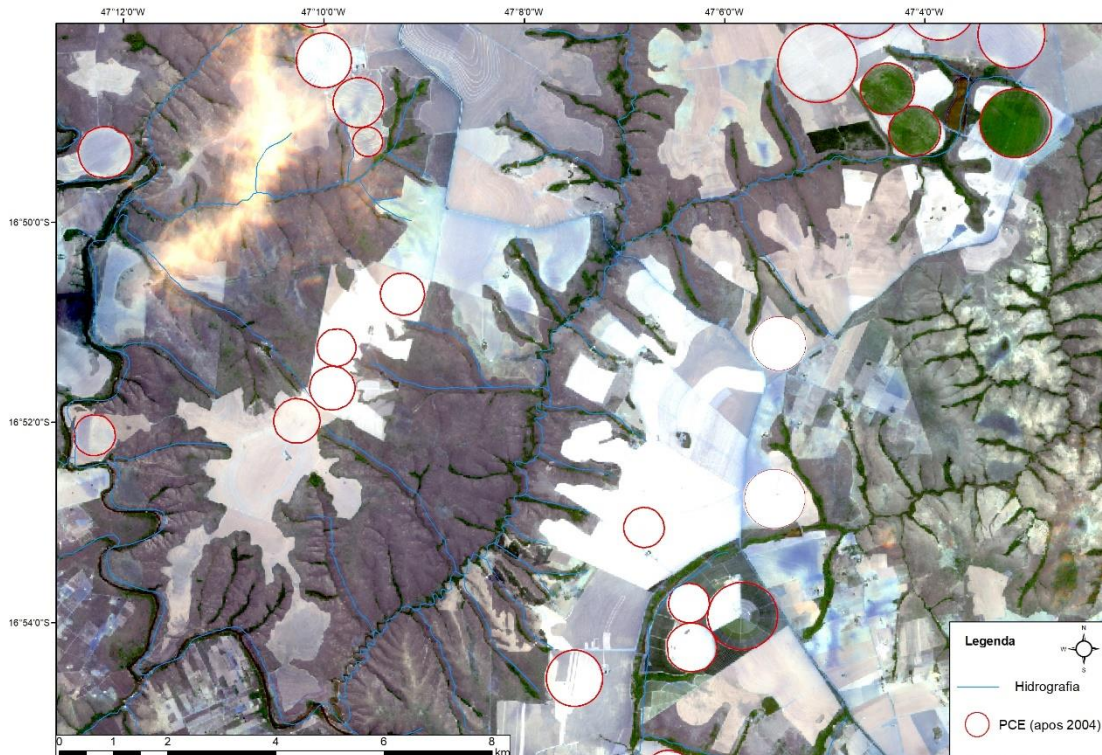
O mapeamento e vetorização dos sistemas de irrigação foi realizado por análise visual na escala de 1:50.000 a partir de um mosaico de imagens do satélite Sentinel-2 (órbitas/ponto: 22KHE, 22KHF, 23KKA, 23KKB e 23LKC), com resolução de 10 m. As imagens são do dia 17 de setembro de 2016, período adequado devido à ausência de nuvens na região e compreender as últimas semanas do final da entressafra, período em que a estiagem aproxima do seu ponto mais severo de dias sem chuvas. Nesse período, poucos agricultores utilizam os pivôs centrais para irrigar lavouras anuais por causa da



pouca quantidade de água nos cursos d'água. Geralmente, os pivôs centrais que funcionam nessa época possuem culturas perenes, como o café, cuja lâmina de irrigação é baixa, apenas para manutenção da lavoura. A composição de bandas escolhida para a digitação em tela foi a 4R8G3B (**Figura 2.1**). Apesar de a classificação manual demandar muito tempo, ela permite uma alta acurácia considerando os fatores tipicamente sazonais do calendário agrícola.

A identificação manual de pivôs centrais em imagens de média resolução espacial (imagens Landsat e Sentinel) é normalmente simplificada devido a sua forma circular (Meneses, 2012; Rudorff & Moreira, 2002). No entanto, a classificação visual de imagens de pivôs centrais da BARSAM no período de estiagem deve considerar que a maioria dos fazendeiros usa o sistema de plantio direto, cobrindo o solo com palhada ou restos da lavoura colhida no final da safra anterior. Essa palhada pode encobrir os vestígios da forma circular do pivô central, confundindo-o com as áreas de agricultura de sequeiro. Esse problema se agrava se a palhada for de milho, que como a do trigo, possui alta reflectância nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo (Sano & Pinhati, 2009) e persiste por muito meses cobrindo o solo, ao contrário da palhada da soja, ou do feijão.

Outro problema na identificação dos pivôs centrais é a modificação das condições naturais pela agricultura intensiva com uso de agrotóxicos, fertilizantes e corretivos do solo (Al-Rumikhani 2002; Deneff et al., 2008), que mesmo após sua desinstalação deixa marcas no solo que perduraram por muito tempo sem a existência do pivô. Isso pode confundir a interpretação do analista, que pode classificar polígonos em formato circular de pivôs centrais desativados como estando em funcionamento.



**Figura 2.1** – Imagem do satélite Sentinel-2 de 17 de setembro de 2016 na bacia do ribeirão Mundo-Novo, afluente do Rio São Marcos.

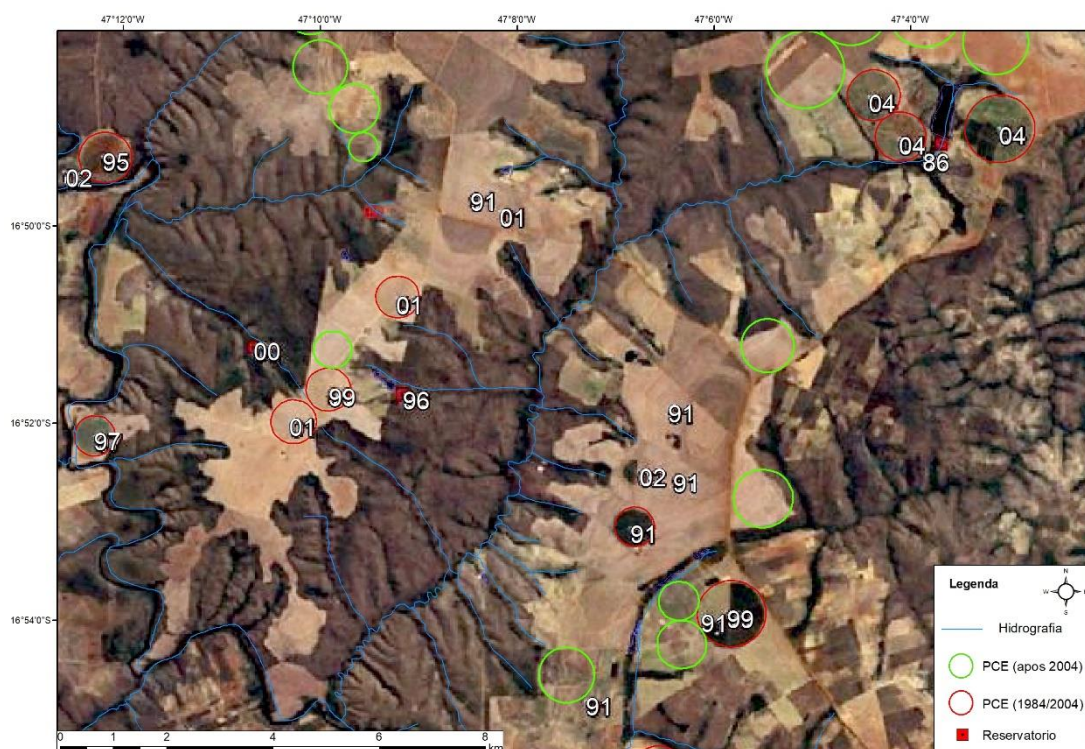
### 2.3.3 ANÁLISE MULTITEMPORAL DA INSTALAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS E DE SEUS COMPONENTES

A análise multitemporal da ocupação da BARSAM por pivôs centrais utilizou as imagens dos satélites Landsat no Google Earth Pro no período 1984-2016 e as imagens de alta resolução do Bing Satellite. O Google Earth Pro permite a análise anual das imagens, permitindo a inserção de um ponto nos pivôs centrais com o rótulo referente ao ano de sua instalação / desinstalação e dos demais itens presentes nos sistemas de irrigação por pivô central.

A **Figura 2.2** apresenta a plataforma do Google Earth Pro, com a demarcação temporal dos pivôs centrais no período 1984-2004. Todas as informações de análise multitemporal criados no Google Earth Pro foram exportados no formato KMZ e importados para o ambiente de SIG. A identificação do local do manancial utilizado na irrigação de cada PCE é fundamental para estudos que envolvam o cálculo de balanço hídrico distribuído.

Os polígonos dos PCEs identificados no mosaico de imagens do satélite Sentinel-2 de setembro de 2016 foram sobrepostos sobre as imagens do Bing Satellite, acoplado ao Arc Gis. Depois esses polígonos passaram por um processo de refinamento da vetorização, melhorando a escala de 1:50.000

para 1:1.000. Concomitantemente a esse processo, foram sendo identificados e vetorizados os demais componentes dos sistemas de irrigação (reservatórios, estações de bombeamento, canais e adutoras) (**Figura 2.3**).



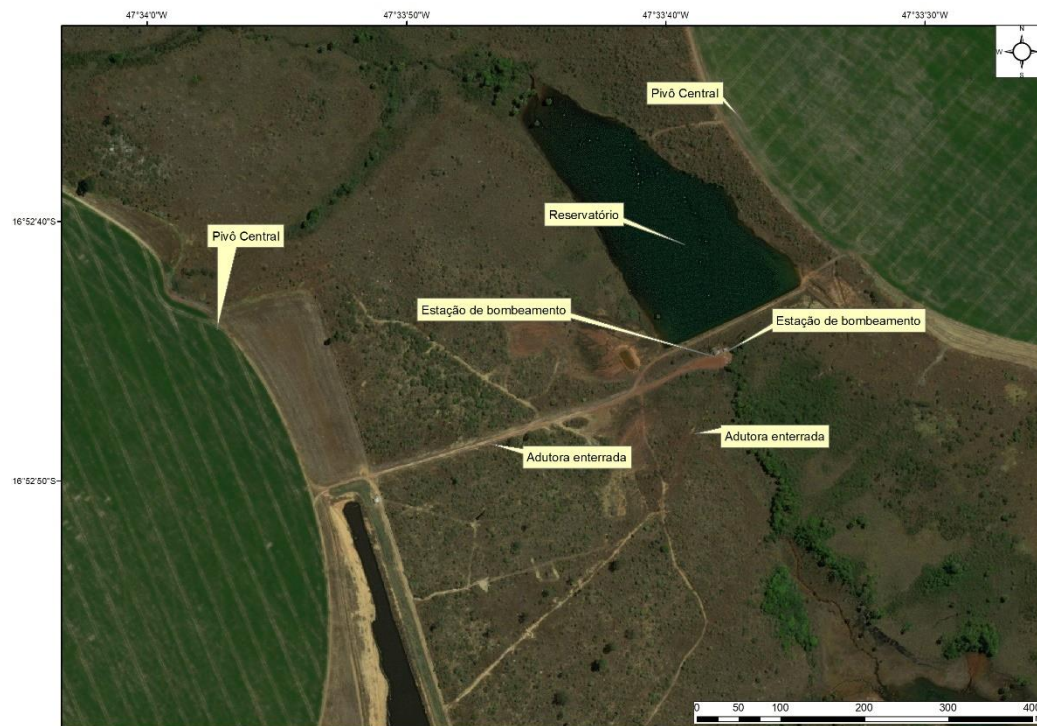
**Figura 2.2** – Imagem Landsat de 2004 do Google Earth Pro da mesma região constante na **figura 2.1**. Demonstração da análise multitemporal para identificação do ano de construção de reservatórios (quadrados vermelhos) e ano de instalação de PCEs instalados até 2004 e ainda existentes em 2016 (círculos vermelhos). Os círculos verdes representam os PCEs instalados após 2004 (vide **figura 2.1**). Os números sem círculos associados representam pivôs que já haviam sido desinstalados em 2004 ou seriam desinstalados em algum período até o ano de 2016.

Em caso de dúvidas para se identificar algum dos componentes dos sistemas de irrigação, geralmente por eventual má qualidade das imagens do Bing Satellite, consultavam-se as imagens do Google Earth Pro, sendo que esse tem a vantagem de disponibilizar imagens de vários anos para o mesmo local. Porém, tanto o Google Earth Pro, quanto o Bing Satellite têm defasagem temporal mínima, em seus bancos de imagens, de dois anos.

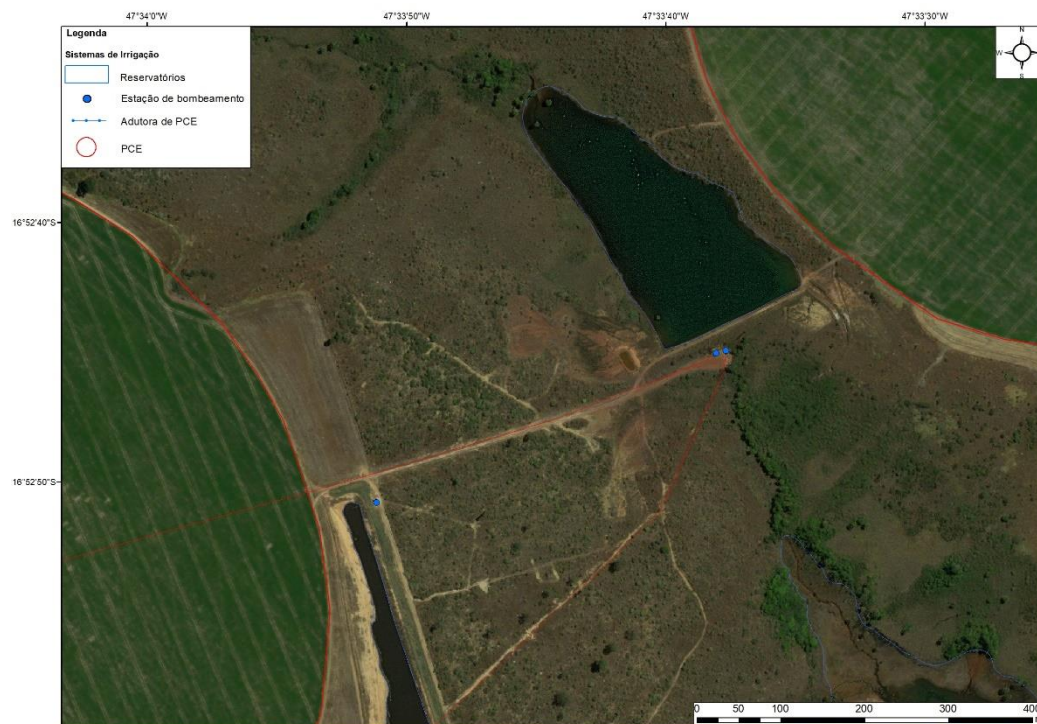
A vetorização dos reservatórios foi também na escala de 1:1.000, com o detalhe de que foi feita buscando-se a cota mais alta atingida pela linha d'água. As imagens de alta resolução espacial têm a vantagem de permitir ao fotointérprete identificar a cota aproximada de volume máximo dos reservatórios, bastando para isso identificar a mudança de tonalidade da vegetação, ou mesmo do solo, naqueles locais que ficam temporariamente submersos nos períodos em que os reservatórios atingem sua capacidade máxima de volume de água (**Figura 2.4**). A vetorização do limite da capacidade

máxima volumétrica é importante para estudos que necessitam estimar o volume máximo do reservatório a partir de uma relação entre volume e área de reservatórios.

A



B



**Figura 2.3** – (a) exemplo de identificação dos componentes de um sistema de irrigação por pivô central; (b) vetorização dos componentes identificados

A



B



**Figura 2.4** – (a) Exemplo de identificação de marcas do nível máximo do espelho d’água em um reservatório abaixo de sua capacidade máxima; (b) vetorização do reservatório seguindo as marcas no solo das regiões temporariamente submersas na época em que o reservatório atinge sua capacidade volumétrica máxima

Os reservatórios foram classificados conforme a sua destinação: (a) irrigação, associado a uma estação de bombeamento; (b) reservação, quando reserva água para um outro reservatório utilizado para irrigação, ou quando não havia nenhum tipo de uso agropecuário em seu entorno, ou não foi

possível identificar qualquer uso econômico do reservatório; (c) dessedentação animal, quando foi possível identificar pastagens em conjunto com currais, trilhas de gado e animais no entorno do reservatório; (d) piscicultura, quando foi possível identificar essa atividade devido às suas características de ter várias pequenas piscinas próximas entre si; (e) barragem de rejeitos, quando foi identificado extração mineral nas imediações; e (e) geração de energia, quando havia uma hidroelétrica na foz do reservatório.

Para cada reservatório foi atribuído o valor de área de drenagem a à da ottobacia (em km<sup>2</sup>) no qual seu barramento estava inserido, segundo os valores expressos na Base Ottocodificada da Agência Nacional de Águas (2014).

#### 2.3.4 ANÁLISE DAS CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DA EVOLUÇÃO DA IRRIGAÇÃO

O crescimento anual das áreas irrigadas da BARSAM foi sobreposto graficamente com: (a) cotações médias anuais da saca de soja e de milho (commodities agrícolas no mercado internacional) (Macrotrends, 2017); (b) dados anuais de produtividade agrícola do IBGE das principais culturas plantadas na bacia por irrigação (feijão, milho e soja) em três municípios incidentes na bacia (Cristalina, Unai e Paracatu); e (c) dados pluviométricos anuais na região.

A série histórica de dados de produtividade agrícola do IBGE entre os anos de 1990 e 2015, para as culturas de feijão, milho e soja, três culturas comumente irrigadas por pivôs centrais na BARSAM, foi sobreposta sobre a série de ampliação de área irrigada de forma com que os anos se sobrepusessem de forma análoga. Já a série de médias históricas da cotação da saca de soja e de milho foram sobrepostas com um ano de atraso com relação a ampliação anual da área irrigada por pivôs centrais, de forma a se poder verificar se houve alguma relação entre o aumento do valor dessas commodities e o aumento da irrigação no ano seguinte. Posteriormente as correlações para ambas sobreposições foram calculadas utilizando a função de correlação do Microsoft Excel.

Não foi feita a caracterização de veranicos, que são dias consecutivos sem chuva na época que deveria chover. Mas foram contabilizados os números de dias sem chuva no período chuvoso (chuva igual a zero milímetro). Para análise de relação entre dias sem chuva no período chuvoso e aumento da área irrigada, foram utilizados os dados pluviométricos diários do MERGE para o período de 1998 a 2016. Esses dados são compilados pelo CPTEC/INPE, que utiliza a série de dados pluviométricos obtida a partir das observações do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), adicionada com os dados observados das estações pluviométricas ativas, e depois interpolada para uma grade de resolução espacial de 0,25° x 0,25° (Rozante et al., 2010). Os dias sem chuva durante o período normamente chuvoso na BARSAM foram caracterizados por meio da utilização da grade do

MERGE, que tem 26 pontos, que poderíamos chamar de ‘estações pluviométricas virtuais’, sobre a área da BARSAM. Dos dados pluviométricos dessas ‘estações’ contaram-se para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, para cada ano de 1998 a 2016, o número de dias sem chover (chuva igual a 0 mm). A série de valores de dias seguidos sem chover foram feitas para três períodos: dezembro a fevereiro, dezembro a janeiro e janeiro a fevereiro, entre 1998 e 2016. Esses períodos foram sobrepostos com um ano, dois anos e três anos de atraso com relação a série anual da área irrigada por pivôs centrais, com o objetivo de se verificar se houve alguma relação entre os anos de seca severa e o aumento da irrigação no ano seguinte. Posteriormente a correlação entre essas séries foi calculada utilizando a função de correlação do Microsoft Excel.

## 2.4 RESULTADOS

### 2.4.1 RESULTADOS DO MAPEAMENTO PCEs

A identificação visual de PCEs no mosaico de imagens Sentinel de 2016 apresentou 1.273 pivôs centrais na BARSAM em uma área de 104.173 ha, sendo 1.011 PCEs instalados no ASM (82.438 ha), e 262 PCEs no BSM (21.735 ha) (**Figura 2.5** e **Tabela 2.1**). Portanto, a ocupação da BARSAM por pivôs centrais foi mais intensa no ASM do que no BSM. Uma hipótese para essa diferença é o fator topográfico, uma vez que no BSM possui relevo mais movimentado do que no ASM.

**Tabela 2.1** Áreas de PCEs por região na BARSAM

REGIÃO	Nº DE PCEs	TOTAL	ÁREA MÉDIA
ASM	1.011	82.438 ha	81 ha
BSM	262	21.735 ha	83 ha
BARSAM	1.273	104.174 ha	82 ha

Os dados de pivôs instalados por município demonstraram que Cristalina é o município que detém a maior extensão de terras na bacia, seguido por Campo Alegre de Goiás e Catalão (**Figura 2.5**). Contudo, a área irrigada nesses dois últimos municípios é muito pequena comparada a Cristalina ou mesmo com municípios de menores extensões de terra na BARSAM, como Unai e Paracatu (**Tabela 2.2**). Dentre os municípios que abrangem a região do BSM, aqueles que contém as cabeceiras dos rios e mais próximas do ASM (Paracatu, Guarda-Mor, Campo Alegre e Ipameri) tem as maiores áreas irrigadas do BSM, pois em seus territórios estão inseridas as terras em Planaltos e Terraços.

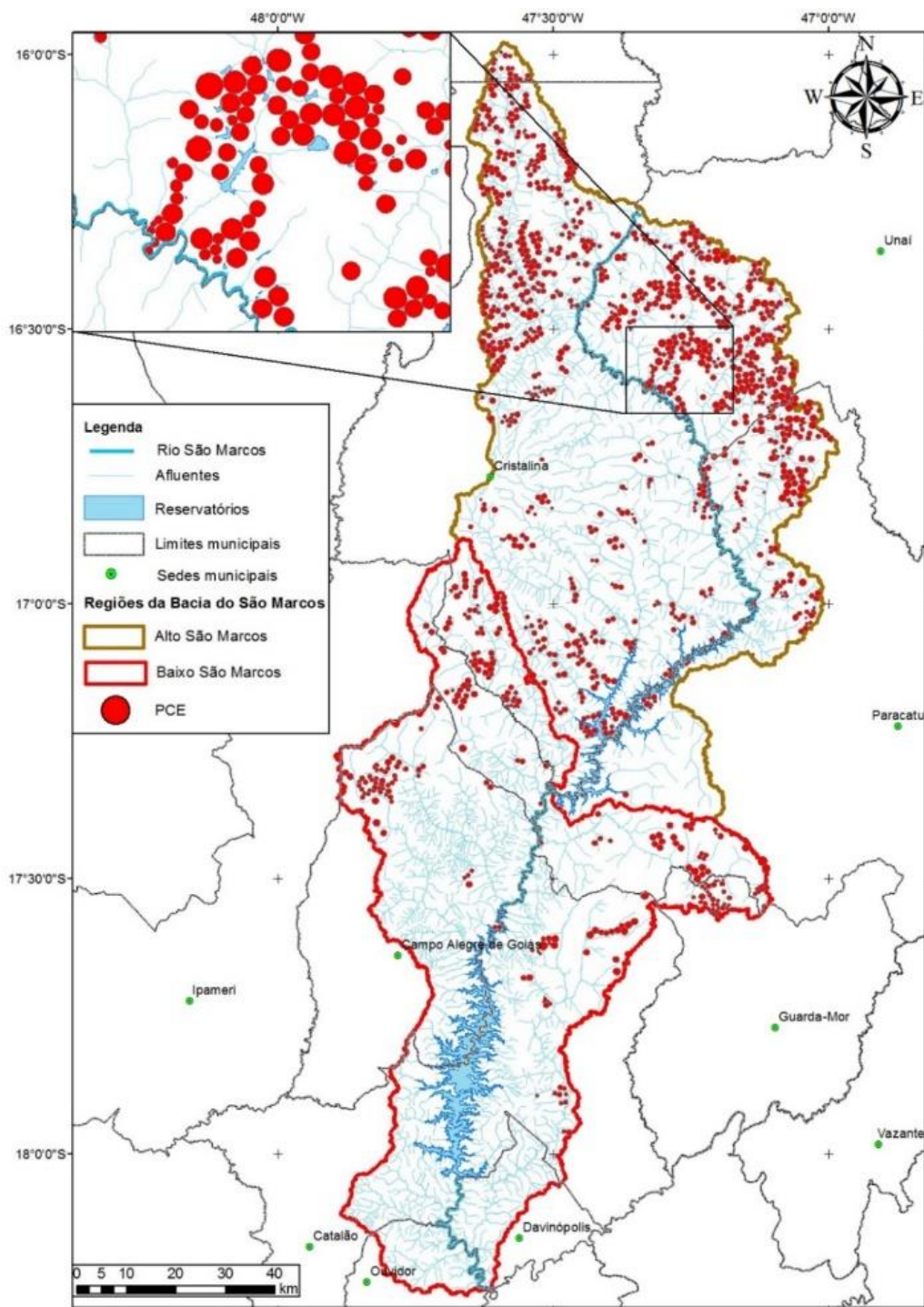


Figura 2.5 - PCEs no ASM e no BSM em setembro de 2016.

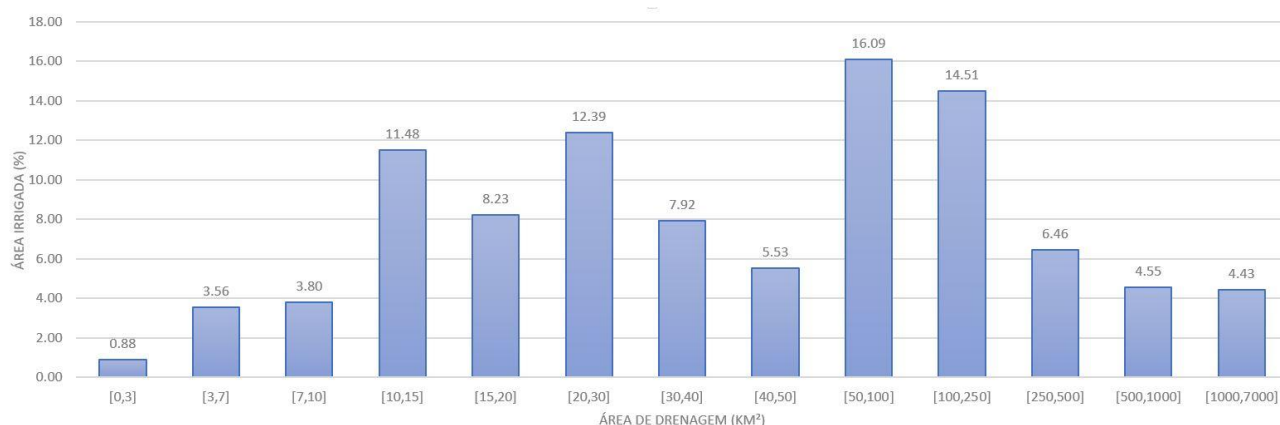
Tabela 2.2 Áreas de PCEs para cada município incidente na BARSAM

MUNICÍPIO	ÁREA NA BARSAM	Nº DE PCEs	TOTAL (ha)	ÁREA MÉDIA (ha)
CRISTALINA/GO	72 %	561	44.561	79
UNAÍ/MG	15 %	344	30.267	88
PARACATU/MG	23 %	193	16.139	83
CAMPO ALEGRE DE GOIÁS	60 %	60	4.438	74
CATALÃO/GO	47 %	40	3.855	96



MUNICÍPIO	ÁREA NA BARSAM	Nº DE PCEs	TOTAL (ha)	ÁREA MÉDIA (ha)
GUARDA-MOR/GO	6 %	34	1.604	47
BRASILIA/DF	0,8 %	19	1.210	63
IPAMERI/GO	10 %	22	2.096	95
OUVIDOR/GO	51 %	0	0	0
DAVINÓPOLIS/MG	58 %	0	0	0

Os resultados da área de drenagem a montante de cada PCE, que influencia diretamente na quantidade de água que flui nos cursos d'água de onde os PCEs captam água, demonstraram que 28% da área irrigada está concentrada em regiões com áreas de drenagem a montante de até 20 km<sup>2</sup> e 44% em regiões entre 50 km<sup>2</sup> e 1.000 km<sup>2</sup> (**Figura 2.6**).



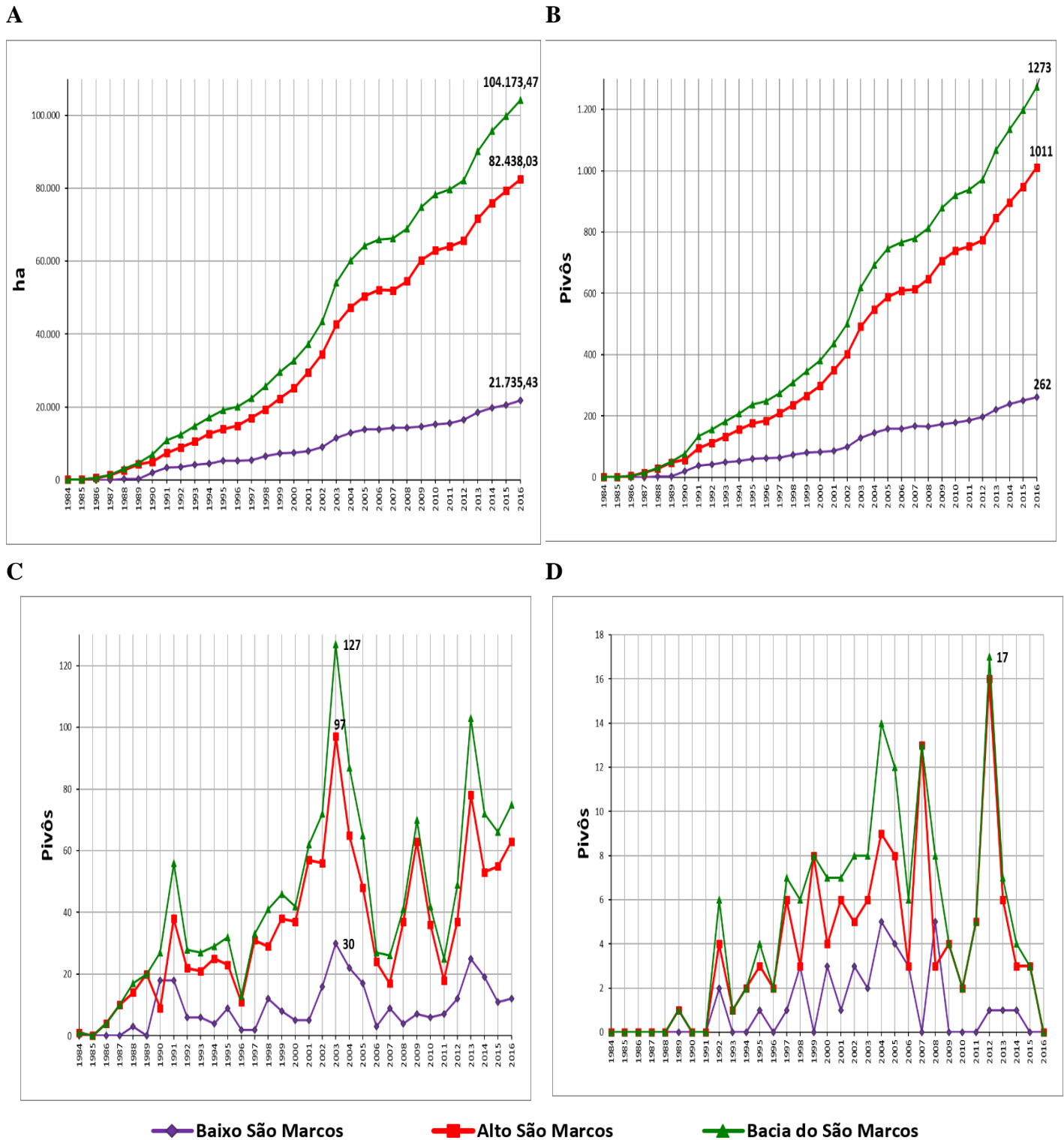
**Figura 2.6** - Área irrigada por área de drenagem a montante

## 2.4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE MULTITEMPORAL

A análise multitemporal demonstrou que nos últimos 30 anos (1986 a 2016) foram incorporados em média 3.500 hectares/ano à área irrigada da bacia do BARSAM (**Figura 2.7a**) com média de 42,5 pivôs/ano (**Figura 2.7b**). O pico de instalação de pivôs foi no ano de 2003, com 127 pivôs (97 no ASM e 30 no BSM), incorporando naquele ano 11.098 ha à área irrigada da bacia, sendo 8.457 ha no ASM e 2.640 ha no BSM (**Figura 2.7c**). Por outro lado, nos anos de 2004 e 2012 foram anos com as maiores desinstalações de pivôs (**Figura 2.7d**). Em 2004 foram desinstalados 14 pivôs, equivalente a área de 1.255 ha (9 pivôs e área de 715 ha no ASM, e 5 pivôs e área de 540 ha no BSM). Já em 2012 foram desinstalados 17 pivôs com área equivalente a 1.204 ha (16 pivôs e área de 1.139 ha no ASM), e 1 pivô com área de 65 ha no BSM).

O uso de imagens de alta resolução do Bing Satellite e do Google Earth comprovou-se eficaz para a identificação detalhada dos componentes de irrigação. As **tabelas 2.3 a 2.7** apresentam as quantidades para cada tipo de componente identificado, separados pelas regiões do ASM e do BSM.

O crescimento da agricultura irrigada na BARSAM foi intenso, embora tenha variado ao longo dos anos.



**Figura 2.7** Gráficos demonstrando a evolução dos seguintes parâmetros da irrigação por pivô central: (a) Crescimento anual da área irrigada na bacia; (b) Crescimento anual do número de pivôs; (c) número de pivôs instalados ano a ano; (d) número de pivôs desinstalados ano a ano.

## MAPEAMENTO DOS RESERVATÓRIOS

No mapeamento foram identificados 513 reservatórios na BARSAM. Os reservatórios mapeados estavam sempre cheios ou quase cheios de água nas imagens consultadas. A **tabela 2.3** demonstra os resultados da classificação por uso econômico, separando os reservatórios pelas regiões da BARSAM. A **tabela 2.4** demonstra um panorama geral da dimensão dos reservatórios diretamente utilizados para irrigação por pivô central.

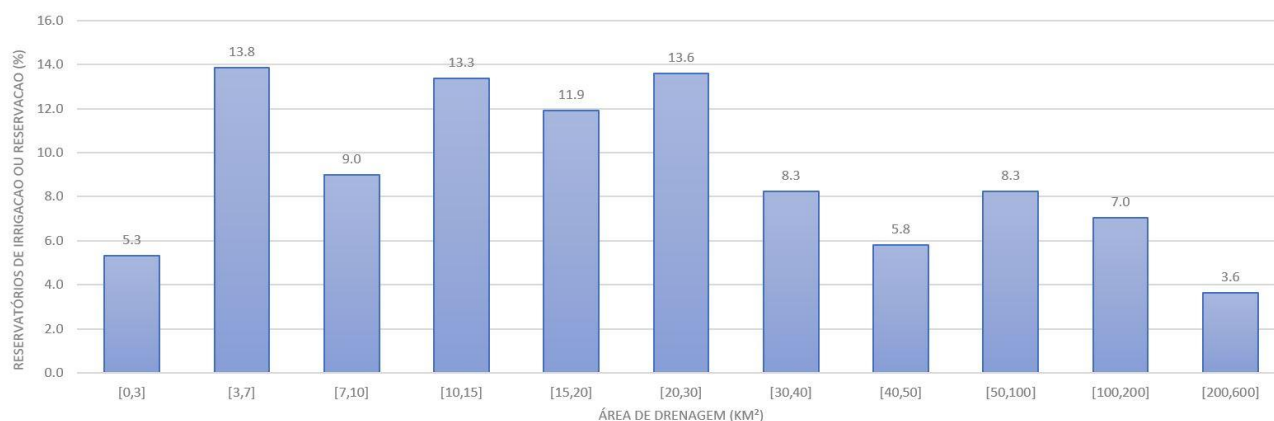
Apenas 28% da área irrigada (29.168 ha) está situada em regiões com até 20 km<sup>2</sup> de área de drenagem a montante, enquanto que 53% dos barramentos dos reservatórios para irrigação na BARSAM foram construídos em regiões com até 20 km<sup>2</sup> de área de drenagem a montante (**Figura 2.8**). Não existe nenhum reservatório de irrigação para abastecer PCEs em regiões com mais de 600 km<sup>2</sup> de área de drenagem a montante. Portanto, os reservatórios dos sistemas de irrigação por pivô central possuem dimensões condicionadas às áreas de drenagem a montante do local de onde o pivô central capta água. Quanto maior for a área de drenagem a montante do local de onde o pivô central capta água mais o reservatório se torna uma estrutura dispensável e o agricultor pode captar água diretamente do curso d'água.

**Tabela 2.3** - Tipo de destinação econômica dada aos reservatórios mapeados na BARSAM

	IRRIGAÇÃO	DESSEDENTAÇÃO	RESERVAÇÃO	PISCICULTURA	MINERAÇÃO	GERAÇÃO ENERGIA
ASM	266	40	80	5	0	1
BSM	88	5	23	0	2	1

**Tabela 2.4** - Dimensões dos reservatórios destinados para agricultura irrigada na BARSAM

	TOTAL	ÁREA TOTAL	ÁREA MÁXIMA	ÁREA MÍNIMA	ÁREA MÉDIA
ASM	266	4.000 ha	198 ha	200 m <sup>2</sup>	13 ha
BSM	88	815 ha	72 ha	600 m <sup>2</sup>	8 ha



**Figura 2.8.** Porcentagem de reservatórios de irrigação ou reservação existentes na BARSAM por área de drenagem a montante.

## MAPEAMENTO DAS ESTAÇÕES DE BOMBEAMENTO E ADUTORAS

No mapeamento de estações de bombeamento foram identificados 769 dessas ‘casas de máquinas’ na BARSAM. A **tabela 2.5** separa as estações de bombeamento por região da bacia.

**Tabela 2.5** - Número de estações de bombeamento por região da BARSAM

	<b>TOTAL</b>
ASM	602
BSM	167

O mapeamento dos canais nas imagens de alta resolução é simples, sendo contrastante com a terra retirada para cavar os canais. A **tabela 2.6** separa os canais por região da BARSAM e informa números sobre suas dimensões.

O mapeamento das adutoras é mais difícil, pois nem sempre foi possível identificar as marcas nas imagens de satélite de alta resolução que indicassem os locais onde estão enterradas. Nesses casos, foram feitas inferências sobre a sua localização, tendo como referência a estação de bombeamento mais próxima e o centro do PCE. A **tabela 2.7** separa as adutoras mapeadas da BARSAM e detalha suas dimensões nas bacias.

**Tabela 2.6** - detalhes sobre as dimensões dos canais mapeados na BARSAM

	<b>Nº CANAIS</b>	<b>COMPRIMENTO TOTAL</b>	<b>COMPRIMENTO MÉDIO</b>	<b>COMPRIMENTO MÁXIMA</b>
ASM	60	73.500 metros	1.200 metros	8.400 metros
BSM	10	6.100 metros	600 metros	3.600 metros

**Tabela 2.7** - detalhes sobre as dimensões das adutoras mapeados na BARSAM.

	<b>Nº ADUTORAS</b>	<b>COMPRIMENTO TOTAL</b>	<b>COMPRIMENTO MÉDIO</b>	<b>COMPRIMENTO MÁXIMA</b>
ASM	1.071	1.000.000 metros	960 metros	3.900 metros
BSM	271	250.000 metros	920 metros	3.500 metros

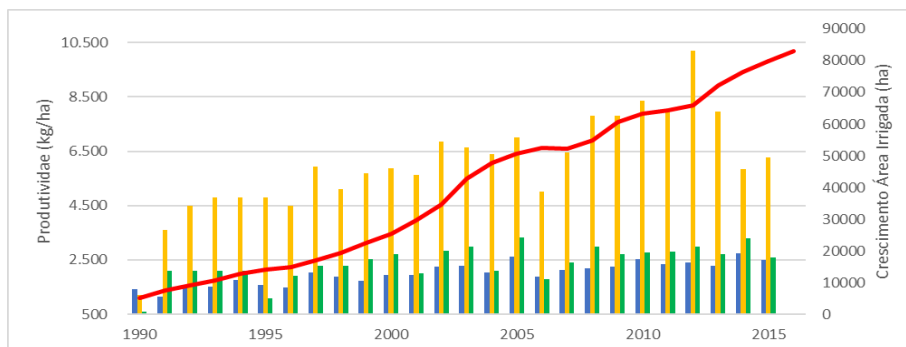
Em verificações de campo realizadas em conjunto com equipes de fiscalização da Agência Nacional de Águas (ANA), de 50 estações de bombeamento identificadas nas imagens de satélite, 47 (94%) foram confirmadas em campo como sendo realmente esse tipo de construção (**Figuras 10a a 10d**). Apenas 3 se mostraram ser outro tipo de construção, como abrigos para recreação ou para pesca na beira de reservatórios. De 37 adutoras já mapeadas em campo pelas equipes de fiscalização da ANA, 34 adutoras (89%) mapeadas com imagens de satélite coincidiram com os dados da ANA.

## 2.4.3 CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DA EVOLUÇÃO DA IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL

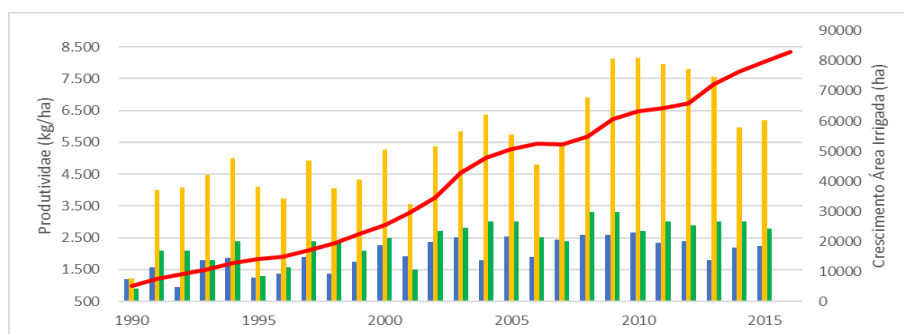
### FATORES DE PRODUTIVIDADE

A **Figura 2.9** demonstra os dados do IBGE de produtividade de feijão, milho e soja, três culturas comumente irrigadas por pivôs centrais na BARSAM, nos territórios dos três municípios com maiores áreas irrigadas por PCEs: Cristalina, Unai e Paracatu.

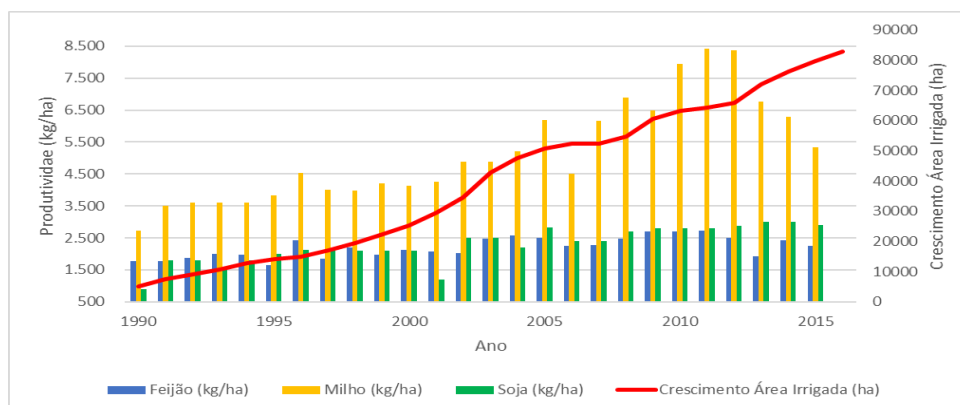
**A**



**B**



**C**



**Figura 2.9** – Sobreposições entre o crescimento da área irrigada na BARSAM com a produtividade agrícola em (a) Cristalina; (b) Unai e (c) Paracatu. Produtividade agrícola (Fonte: IBGE)

A **tabela 2.8** demonstra a correlação entre a produtividade das três culturas nos três municípios analisados e o aumento da irrigação na BARSAM entre 1990 e 2015. A correlação foi mais significativa para o aumento da produtividade do feijão em Cristalina, município que tem praticamente quase toda a sua agricultura irrigada inserida na BARSAM. O aumento da produtividade de milho e soja nos municípios de Unai e Paracatu também tiveram boa correlação com o aumento da área irrigada na BARSAM, mas esses resultados podem não ter significado expressivo, pois ambos municípios possuem maiores áreas irrigadas em outras bacias hidrográficas, que não a BARSAM.

**Tabela 2.8.** Correlação entre o aumento da área irrigada na BARSAM e a evolução da produtividade agrícola de grãos no período de 1990 a 2015 em três municípios incidentes na bacia.

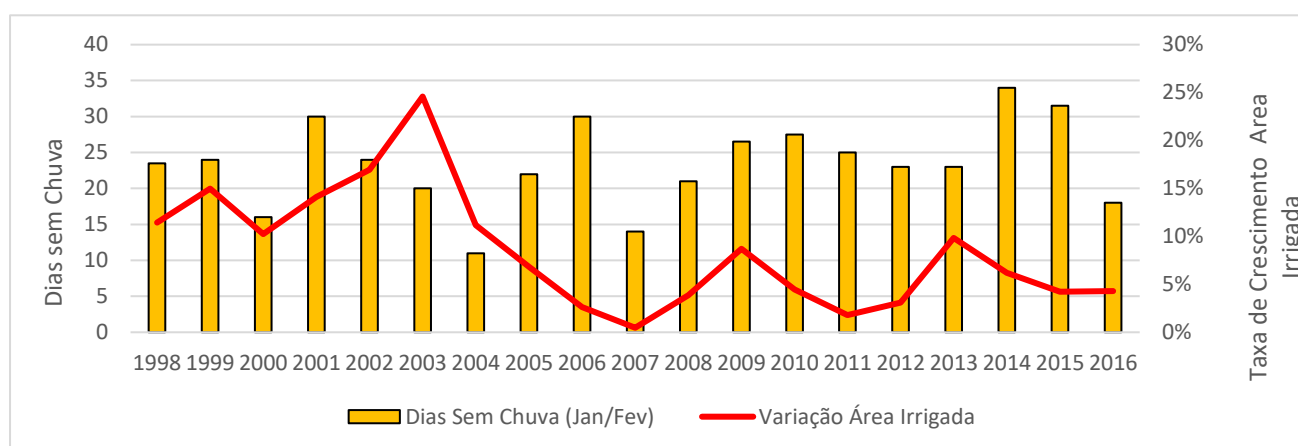
	Feijão (kg/ha. ha irrig. <sup>-1</sup> )	Milho (kg/ha. ha irrig. <sup>-1</sup> )	Soja (kg/ha. ha irrig. <sup>-1</sup> )
Cristalina	<b>0,87</b>	0,75	0,65
Unai	0,71	0,81	0,76
Paracatu	0,69	<b>0,84</b>	<b>0,86</b>

### FATORES CLIMÁTICOS

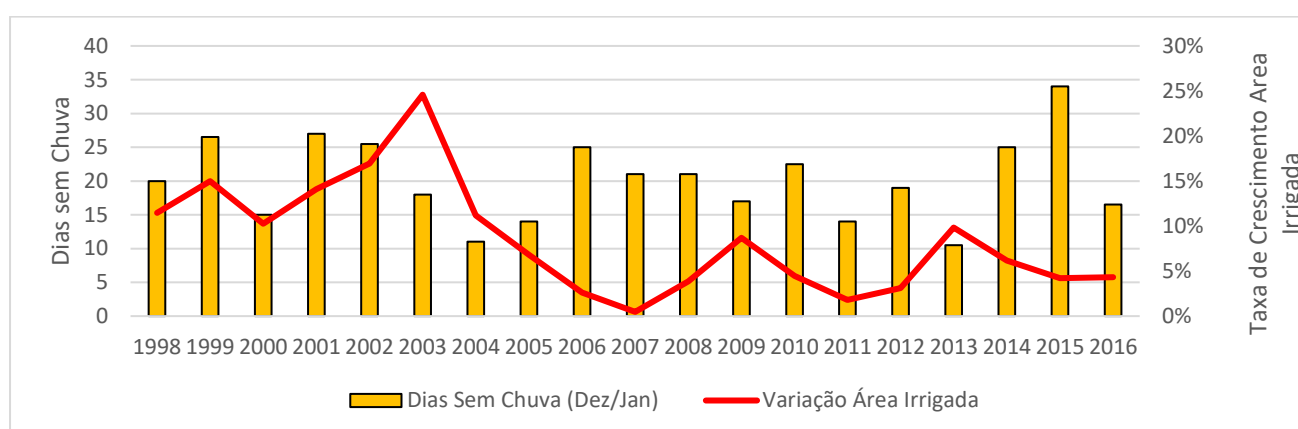
Os períodos de dezembro a janeiro, e de janeiro a fevereiro foram os períodos que tiveram maiores correlações com o aumento da irrigação na BARSAM. O período de dezembro a fevereiro não teve boa correlação. Para o período de dezembro a janeiro o ano de 2015 foi o que teve o período mais seco, com 34 dias sem chuva. Já para o período de janeiro a fevereiro o ano de 2014 e 2015 foram muito secos, com 34 e 31,5 dias sem chuva, respectivamente. Embora os gráficos na **figura 2.10** não representem veranicos, deve-se citar que os veranicos com duração entre 13 e 18 dias são classificados como ‘fortes’, e os com duração maior que 18 dias são ‘muito fortes’ (Silva & Ferreira, 2015). Os resultados do cruzamento dos dados de ocorrência de dias sem chuva com os dados do histórico de porcentagem de crescimento da área irrigada na BARSAM são apresentados na **Figura 2.10**.

A **Figura 2.10 (A)** demonstra que fortes veranicos nos meses de janeiro e fevereiro tiveram correlação negativa de **-0,14** com a variação da área irrigada, ou seja, o crescimento da área irrigada na BARSAM tendeu a diminuir imediatamente no ano seguinte a ocorrência de fortes veranicos nos meses de janeiro e fevereiro do ano anterior. Por outro lado, a **Figura 2.10 (B)** demonstra que existe uma correlação positiva de **0,40** entre a ocorrência de fortes veranicos entre os meses de dezembro e janeiro e o aumento da área irrigada dois anos depois desse evento climático.

A



B



**Figura 2.10.** Relação entre a variação da área irrigada e dias sem chuva entre os meses de janeiro e fevereiro (A) e entre os meses de dezembro e janeiro do ano seguinte (B) entre os anos agrícolas de 98/99 a 15/16.

### FATORES ECONÔMICOS

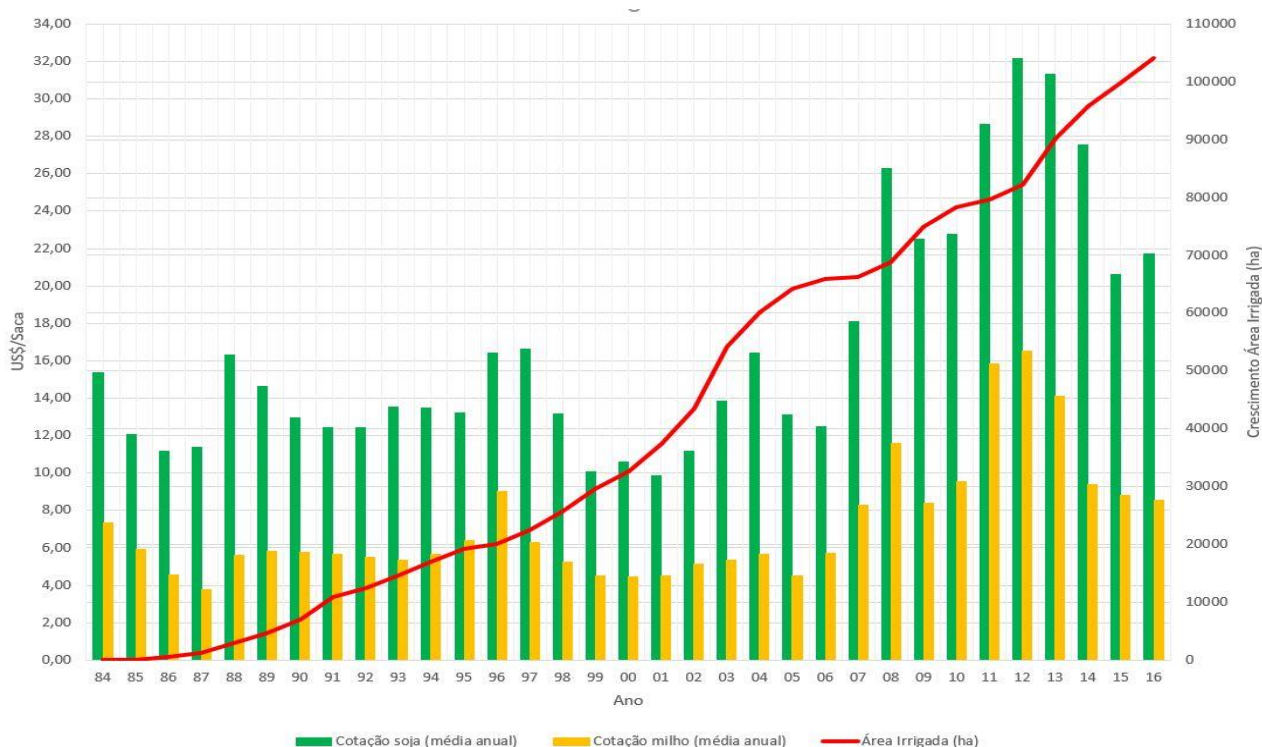
Se convencionarmos que a construção de uma hidrelétrica se dá por razões econômicas, podemos concluir que o principal fator causador da grande desinstalação de pivôs no ano de 2012 foi um fator econômico indireto, o enchimento do lago da UHE Batalha. Por causa disso, 17 pivôs foram desinstalados entre 2012 e 2013 (**figura 2.7 d**), mas na verdade foram deslocados para regiões mais altas, pois a ampliação da área irrigada em 2013 foi de mais de 100 pivôs instalados (**figura 2.7 c**).

Ao longo dos últimos 32 anos os preços de commodities agrícolas como milho e soja tiveram oscilações, com grandes baixas no final da década de 90 e início dos anos 2000 e altas substanciais no período que vai de 2008 a 2014. A relação entre os preços históricos da saca de milho e de soja demonstraram ter boa correlação com o aumento da área irrigada no ano seguinte (**Tabela 2.9**), apesar das oscilações dos preços das commodities, comparada ao crescimento consistente da área irrigada na BARSAM no mesmo período (**Figura 2.11**).

Em concordância com Deines et al. (2017), observa-se uma boa correlação entre os preços de commodities e o aumento da irrigação por pivô central na BARSAM do ano seguinte (**Tabela 2.9**). A correlação do preço pago pela soja no mercado internacional do que com o milho aumento da área irrigada no ano seguinte, vai de encontro ao fato de que a soja é uma cultura que oferece maiores lucratividades aos produtores rurais.

**Tabela 2.9.** Correlação entre o aumento da área irrigada na BARSAM e a cotação média da soja e do milho na Bolsa de Futuros de Nova York no ano anterior

	Milho (US\$/Bushel)	Soja (US\$/Bushel)
<b>Aumento da área irrigada</b>	0,65	0,73



**Figura 2.11.** Sobreposição entre o aumento da área irrigada na BARSAM e a cotação média da soja e do milho na Bolsa de Futuros de Nova York no ano anterior.

## 2.5. CONCLUSÃO

Os mosaicos anuais de imagens Landsat, disponíveis com cenas a partir do ano de 1984 no Google Earth, possibilitaram a análise da evolução histórica da instalação e desinstalação de pivôs centrais na BARSAM. Esse produto gratuito demonstrou ser uma ferramenta útil para análises da evolução do uso da terra e ocupação do solo, por disponibilizar imagens com resolução temporal anual, já georreferenciadas e totalmente livres de nuvens. Isso possibilitou análises de correlação entre a



dinâmica de ocupação do solo por pivôs centrais com séries históricas de aumento de produtividade, de secas e de preços das principais commodities plantadas na região.

As imagens de alta resolução disponíveis no Google Earth e Bing Satellite também são outros produtos de sensoriamento remoto com imagens georreferenciadas e totalmente livres de coberturas de nuvens que possibilita a identificação das partes componentes dos sistemas de pivôs centrais, apesar de estarem terem defasagem de tempo de até 5 anos em algumas regiões da BARSAM. Ainda sim foi possível fazer um mapeamento detalhado das estruturas componentes dos sistemas de pivôs centrais da BARSAM a um baixo custo, cujo resultado foi a produção de informações geográficas valiosas para a gestão e planejamento dos recursos hídricos naquela bacia.

Buscar uma explicação para o crescimento da irrigação por pivôs centrais na BARSAM pode envolver diversos fatores, como políticas públicas de financiamento de equipamentos de irrigação a juros baixos, por exemplo. Neste capítulo foram analisados três fatores podem estar relacionados ao crescimento da irrigação na BARSAM. O fator que mais se correlacionou com a curva de crescimento da área irrigada na BARSAM foi o aumento da produtividade agrícola nos três principais municípios com áreas irrigadas na bacia. O aumento da produtividade do feijão em Cristalina foi o que mais teve correlação com o aumento da irrigação. Isso pode significar que, como o feijão é uma das principais culturas irrigadas na bacia, os ganhos em produtividade dessa cultura naquele município podem ser consequência direta do aumento da agricultura irrigada no principal município irrigante da BARSAM. Por outro, esse aumento da produtividade do feijão em Cristalina pode também ser uma das causas que levaram muitos agricultores a adotar a irrigação por pivôs centrais, atraídos pela alta lucratividade dessa cultura quando irrigada.

Quando se buscou correlacionar o aumento da área irrigada com fatores climáticos, como a provável maior ocorrência de veranicos, a **figura 2.10** demonstrou que a região da BARSAM é uma região que sofreu com longos períodos sem chuva entre os anos de 2014 e 2015. O fato de se ter uma correlação negativa entre o aumento da irrigação no primeiro ano após a ocorrência de muitos dias sem chuva no período chuvoso (-0,14 para janeiro/fevereiro) podem significar que no ano imediatamente posterior a ocorrência de uma seca no período que deveria ser chuvoso, os produtores rurais estão buscando se recuperar após sofrerem perdas econômicas e ficaram impossibilitados de investir em pivôs centrais. Por outro lado, o fato de que existe uma correlação positiva entre a anos com ocorrência de muitos dias sem chuva durante o período úmido e o aumento da área irrigada dois anos depois (0,40 para dezembro/janeiro) pode significar que os produtores rurais levaram dois anos para se recuperar economicamente e voltarem, ou começarem, a investira em novos equipamentos de pivôs centrais.

Outro fator que possa ser indutor de crescimento da área irrigada por pivôs centrais na bacia é a média histórica da cotação da soja no mercado de futuros de Nova Iorque. Verificou-se uma boa correlação com o aumento da área irrigada na BARSAM no ano seguinte aos anos de boas cotações dessa *commoditie*. Esse fato também se configura como uma boa variável explicativa que possa ter induzido os agricultores da região a ampliarem suas áreas irrigadas. Concluindo, muitos podem ter sido os fatores que levaram a ampliação da área irrigada na BARSAM, e dentre esses fatores o aumento da produtividade agrícola do feijão em Cristalina e o preço da soja nos mercados internacionais podem ter sido os principais indutores dessa ampliação.

## H. BIBLIOGRAFIA

- AL-RUMIKHANI Y.A.; Effect of crop sequence, soil sample location and depth on soil water holding capacity under center pivot irrigation. **Agricultural Water Management**, v.55, n.2, p. 93-104, 2002.
- ANA & Embrapa. **Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil – 2014: Relatório Síntese**. Brasília: ANA, 33 p, 2016.
- ASHRAF, M.; KAHLOWN, M.A.; ASHFAQ, A. Impact of small dams on agriculture and groundwater development: a case study from Pakistan. **Agricultural Water Management**, v.92, p.90-98, 2007.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E. Manual de Irrigação. Vicosa: UFV, 2008
- BRUNCKHORST, A.; BIAS, E. de S. Aplicação de SIG na Gestão de Conflitos Pelo Uso da Água na Porção Goiana da Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos, Município de Cristalina – GO. **Geociências**, v.33, n.2, p. 228-243, 2014.
- CHEN, S.; SUN, C.; WU, W.; SUN, C. Water leakage and nitrate leaching characteristics in the winter wheat-summer maize rotation system in the north china plain under different irrigation and fertilization management practices. **Water**, v. 9, n. 2, 141, 2017.
- DEINES, J.; KENDALL, A.; HYNDMAN, D. Annual irrigation dynamics in the US Northern High Plains derived from Landsat satellite data. **American Geophysical Union**, 2017.
- DENEF, K.; STEWART, C.E.; BRENNER, J.; PAUSTIAN, K. Does long term center pivot irrigation increase soil carbon stocks in semi-arid agro-ecosystems? **Geoderma**, v.145, p.121-129, 2008.
- EVANGELISTA, W.; OLIVEIRA, C.A.S.; SILVA, C.L. Variáveis climáticas e o desempenho de um pivô central em Cristalina, Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.14, n.3, p.246-252, 2010
- FERRANT, S.; SELLES, A.; LE PAGE, M.; HERRAULT, P.; PELLETIER, C.; AL-BITAR, A.; MERMOZ, S.; GASCOIN, S.; BOUVET, A.; SAQALLI, M.; DEWANDEL, B.; CABALLERO, Y.;

- AHMED, S.; MARECHAL, J.; KERR, Y. Detection of irrigated crops from Sentinel-1 and Sentinel-2 data to estimate seasonal groundwater use in south India. **Remote Sensing**, v.9, 1119, 2017
- HESSARI, B.; BRUGGEMAN, A.; AKHOOND-ALI, A.; OWEIS, T.; ABBASI, F. Supplemental irrigation potential and impact on downstream flow of Karkheh river basin in Iran. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.20, p.1903-1910, 2016.
- HU, Q; WU, W; XIA, T; YU, Q; YANG, P; LI, Z; SONG, Q. Exploring the use of Google Earth Pro Imagery and object-based methods in land use/cover mapping. **Remote Sensing**, v.5, p.6026-6042, 2013
- JACINTO, L. A pecuária do futuro com a ajuda da irrigação. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n.51, p.50-54, 2001.
- JACOBSON, A; DHANOTA, J; GODFREY, J; JACOBSON, H; ROSSMAN, Z; STANISH, A; WALKER, H; RIGGIO, J. A novel approach to mapping land conversion using Google Earth Pro with an application to East Africa. **Environmental Modelling and Software**, v.72, p.1-9, 2015.
- LIMA, L.A.; CUSTÓDIO, A.A. de P.; GOMES, N.M. Produtividade e rendimento do cafeeiro nas cinco safras irrigadas por pivô central em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1832-1842, 2008.
- MACROTRENDS: **Industrial and Agricultural Commodity Charts**. Disponível em: <http://www.macrotrends.net/charts/commodities>. Acesso em: 13 de dezembro de 2017.
- MANTOVANI, E.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.; **Irrigação: Princípios e Métodos**. Viçosa: UFV, 2009
- MENESES, P. Sensores imageadores multiespectrais na faixa óptica (0,45 – 2,5  $\mu m$ ). Em MENESES, P.; ALMEIDA, T. (Editores). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. (p. 34 – 46), UnB/CNPq, Brasília, 2012.
- MENESES, P.; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens do Sensoriamento Remoto**. 1. Ed., Brasília: UnB/CNPq, 2012.
- ORTÍZ, J.N.; TARJUELO, J.M.; de JUAN, J.A. Characterization of evaporation and drift losses with centre pivots. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1541-1546, 2009.
- PATEL, N.; ANGIULI, E; GAMBÀ, P.; GAUGHAN, A.; LISINI, G.; STEVENS, F.; TATEM, A.; TRIANNI, G. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Pro Engine. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. V.35, P.199-208, 2015.
- PERRONI, B. **Velocidade econômica de Escoamento e Composição de Custos de Sistemas de Irrigação por Aspersão**. 2008. 105 f. Dissertação de conclusão de curso (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UFLA, Lavras, 2008.

- PFISTER, S.; BAYER, P.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Environmental impacts of water use in global crop production: hotspots and trade-offs with land use. **Environmental Science and Technology**, v. 45, p. 5761-5768, 2011.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C.: **Água e Sustentabilidade no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. Barueri, SP: Manole, 2016.
- REYNA, T.; LINARES, J.; REYNA, S.; LÁBAQUE, M. Aplicación de modelos unidimensionales de flujo en suelos no saturados y transporte de herbicidas en zonas agrícolas. **Revista Ambiente e Água**, v. 9, n. 3, p. 434-444, 2014.
- RIBEIRO, M. **Eficientização e gerenciamento do uso de energia elétrica em perímetros irrigados**. 2008. 178 f. Tese de conclusão de curso (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, UFV, Vicosa, 2008.
- ROZANTE, J.; MOREIRA, D.; GONCALVES, L; VILA, D.; Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over South America. **American Meteorological Society**, v.25, p.885-894, 2010.
- RUDORFF, B.; MOREIRA, M. Sensoriamento Remoto Aplicado a Agricultura. São Jose dos Campos: INPE, 2002
- SANDRI, D.; CORTEZ, D.A. Parâmetros de desempenho de dezesseis equipamentos de irrigação por pivô central. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 1, p. 271-278, 2009.
- SANO E.; PINHATI, F.; Espaço rural do oeste baiano: identificação de áreas agrícolas sob sistema de plantio direto por meio de dados obtidos por câmera digital e satélite CBERS-2 CCD. **Geografia, Rio Claro**, v.34, n.1, p.117-129, 2009.
- SANTOS, G.G.; SILVEIRA da, P.M., MARCHÃO, R.L., BECQUER, T., BALBINO, L.C. Macrofauna edáfica associada a plantas de cobertura em plantio direto em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n.1, p.115-122, 2008.
- da SILVA, E. M.; de AZEVEDO, J. A. **Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô central**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998
- SILVA, M.; FERREIRA, V. Duração da estação chuvosa e ocorrência de veranicos na bacia do rio Paranaíba. **Revista do Departamento de Geografia**, v.29, p.100 a 115, 2015.
- TAYLOR, J., R.; LOVELL, S., T. Mapping public and private spaces of urban agriculture in Chicago through the analysis of high-resolution aerial images in Google Earth Pro. **Landscape and Urban Planning**, v.108, p.57-70, 2012.
- TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, Sistemas e Aplicações**. Feagri, Unicamp, Campinas, 2017.
- TUBELIS, D. P. Veredas and their use by birds in the Cerrado, South America: a review. *Biota Neotropica*, v. 9, n. 3, p. 363-374, 2009.

WENGER, K.; VADJUNEC, J.; FAGIN, T. Groundwater governance and the growth of center pivot irrigation in Cimarron County, OK and Union County, NM: implications for community vulnerability to drought. **Water**, v. 9, 39, 2017.

## CAPÍTULO 3

### REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS

#### 3.1. INTRODUÇÃO

No gerenciamento de bacias hidrográficas com intenso uso antrópico, a quantificação da disponibilidade hídrica por trecho de rio é fundamental para avaliar a sua oferta diante das demandas de usos múltiplos da água. No entanto, as medições hidrológicas são usualmente pontuais, necessitando de métodos de regionalização de vazões para aquisição de informações em microbacias não monitoradas (Trancoso et al., 2016; Hrachowitz et al., 2013; Yasar & Baykan, 2013; Mohamoud, 2008). A regionalização de vazões é todo método que permite transferir uma informação hidrológica de uma estação fluviométrica para qualquer outro ponto na bacia sem monitoramento (Oudin et al., 2010). O território brasileiro devido à sua grande dimensão e baixos investimentos em monitoramento hidrológico torna fundamental a técnica de regionalização de vazões para o gerenciamento de bacias hidrográficas. Os trabalhos de regionalização podem ser classificados em: (a) regionalização direta de medidas de vazão; e (b) regionalização de modelos parametrizados, sendo ambos baseados tanto em métodos de regressão ou em algum tipo de medida de distância entre o local da estação fluviométrica e o local no rio sem medição de vazão (He et al., 2011). Os atributos fisiográficos e meteorológicos (área a montante, elevação e declividade da bacia ou dos canais e dados diários de chuva e temperatura) são os parâmetros mais comumente utilizados na regionalização (Razavi & Coulibaly, 2013). Muitos estudos de regionalização de vazões consideram a área a montante como o único fator de regressão por ser a principal variável explicativa, embutindo informações referentes às outras variáveis físicas (declividade e comprimento do rio) (Tucci, 2002) e aos atributos do escoamento superficial (volume, pico de cheia) (Sivapalan, 2003).

No Brasil Central, a Bacia do Rio São Marcos (BARSAM) destaca-se devido à alta concentração de pivôs centrais e alta produtividade agrícola. A variação interanual no clima do Cerrado conjugada a intensa demanda dos recursos hídricos para irrigação torna impreterível o entendimento da oferta hídrica durante o ano. A obtenção da vazão do corpo hídrico ao longo da rede de drenagem permite estimar com maior exatidão a real demanda de água para irrigação e os seus conflitos com outros usos da água.

As nascentes dos corpos hídricos na Bacia do Rio São Marcos (BARSAM) estão nos Planaltos e Terraços, ambientes de terras altas, planas e adequadas para a mecanização agrícola e irrigação, apesar da menor disponibilidade hídrica. Mesmo assim, o município de Cristalina, onde está localizada a parte superior da BARSAM, atualmente possui a maior extensão de áreas irrigadas por pivô central da

América Latina (Furquim & Abdala, 2016). A avaliação da capacidade de armazenamento de água na bacia pela construção de reservatórios é fundamental para o planejamento e a expansão da irrigação por pivôs centrais da BARSAM. Esses dados permitem uma simulação mais fidedigna da demanda real de água para irrigação e conseqüentemente da disponibilidade de expansão da agricultura irrigada na bacia.

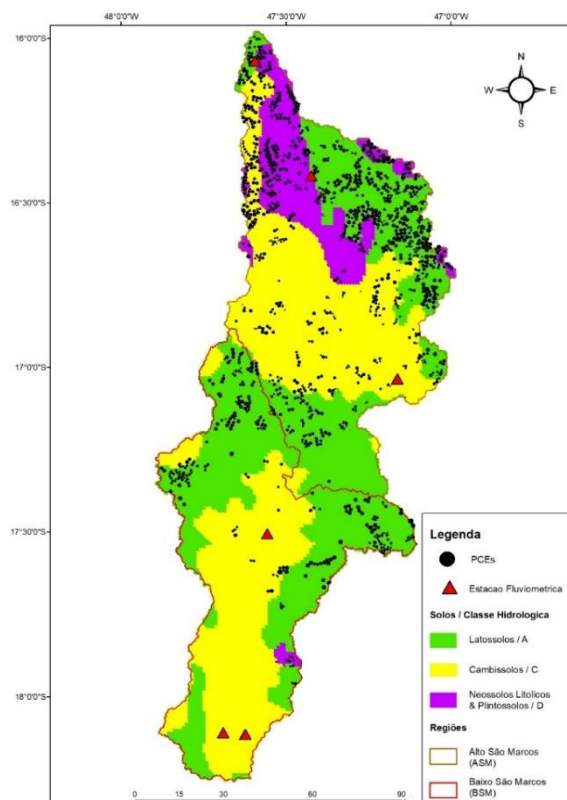
Um dado hidrológico importante na avaliação da capacidade de armazenamento em uma bacia é o índice  $r_{cp95}$ , que é uma relação entre a  $Q_{95}$  e a  $Q_{mt}$ . De um modo geral, locais onde as vazões de referência  $Q_{95}$  estão próximas das vazões de longo termo ( $Q_{mt}$ ) estão situados importantes aquíferos, enquanto que em locais onde a  $Q_{95}$  é bem menor que a  $Q_{mt}$  existe baixa contribuição de vazão subterrânea. A relação  $r_{cp95}$  está associada ao armazenamento natural nas bacias hidrográficas, refletindo indiretamente as contribuições de águas subterrâneas a uma dada região. Nos locais com alto  $r_{cp95}$ , admite-se uma regularização natural das vazões ao longo de grandes períodos, reduzindo a vulnerabilidade à seca. Em contraposição, os locais de baixo  $r_{cp95}$  apresentam mais vulneráveis à períodos de déficits hídricos, o que diminui a segurança hídrica. Portanto, esse índice depende da capacidade de regularização natural do rio, quanto menor esse índice maior variação de vazão durante os períodos de estiagem, com baixa capacidade de regularização natural (Tucci, 2002).

A presente pesquisa possui como objetivo utilizar dados históricos diários de vazão obtidos pelas medições de estações fluviométricas na BARSAM e regionaliza-los para toda a bacia, obtendo valores de disponibilidade hídrica mensais para cada ottobacia umas das 4.161 ottobacias da BARSAM, e avaliar a capacidade de armazenamento da bacia calculando-se o índice  $r_{cp95}$ .

### 3.2 ÁREA DE ESTUDO

A BARSAM é uma sub-bacia hidrográfica do rio Paranaíba, pertencente à região hidrográfica do Paraná. Essa bacia está inserida nos estados de Goiás e Minas Gerais e no Distrito Federal, e o rio São Marcos divide os estados de Goiás e Minas Gerais entre os municípios de Cristalina e Ipameri, do lado de Goiás, e Unaí e Paracatu, pelo lado de Minas Gerais. Cristalina é a única sede municipal na bacia, e seu clima é quente e temperado. Chove muito menos no inverno que no verão. Segundo a Köppen e Geiger o clima é classificado como Cwb. A temperatura média é 20.1 °C. A pluviosidade média anual é 1422 mm. O mês mais seco é junho, com a precipitação média de 13 mm. O mês de maior precipitação é dezembro, com uma média de 241 mm. O mês de janeiro é o mais quente do ano com uma temperatura média de 21.3 °C. A temperatura média em junho é de 17.5 °C, sendo a mais baixa de todo o ano. A diferença de precipitação entre o mês mais seco e o mês mais chuvoso é 228 mm. Ao longo do ano as temperaturas médias variam 3.8 °C (climate-data.org).

A agricultura irrigada na bacia está concentrada nos Planaltos e Terraços, regiões planas situadas nas cabeceiras da bacia, onde abundam os Latossolos-Vermelhos e Vermelho-Amarelos de textura média. Os Cambissolos Háplicos Distróficos são igualmente abundantes nas principais regiões irrigadas. Para a hidrologia, os solos podem ser classificados de ‘A’ a ‘D’ quanto às suas capacidades de infiltração de água, onde a classe ‘A’ possui maior capacidade de infiltração e classe ‘D’ menor capacidade de infiltração e conseqüentemente tem o maior potencial de escoamento (Sartori et al., 2005). A **figura 3.1** demonstram os grupos hidrológicos dos solos predominantes na BARSAM.



**Figura 3.1.** Mapa de solos e suas classes hidrológicas na bacia do rio São Marcos (fonte: mapas pedológicos produzidos pelos estados de Goiás, Minas Gerais e pelo Distrito Federal)

A alta capacidade de infiltração e de armazenamento de água dos solos do grupo hidrológico “A”, propicia a recarga dos aquíferos e favorecendo o fluxo de base, que alimenta os córregos, rios e ribeirões durante os longos períodos de estiagem. Durante o período seco, que ocorre no meio do ano, alguns cursos d’água principais e secundários diminuem muito de seu volume de água. Porém, mesmo nos canais de escoamento laterais aos chapadões permanece uma linha úmida d’água superficial, que atravessa toda a estação seca no meio do ano. Este lençol d’água também sofre variações, de um a quatro metros no subsolo superficial dos Cerrados, continuando, porém, tangente à superfície da topografia (Ab’Sáber, 2005).



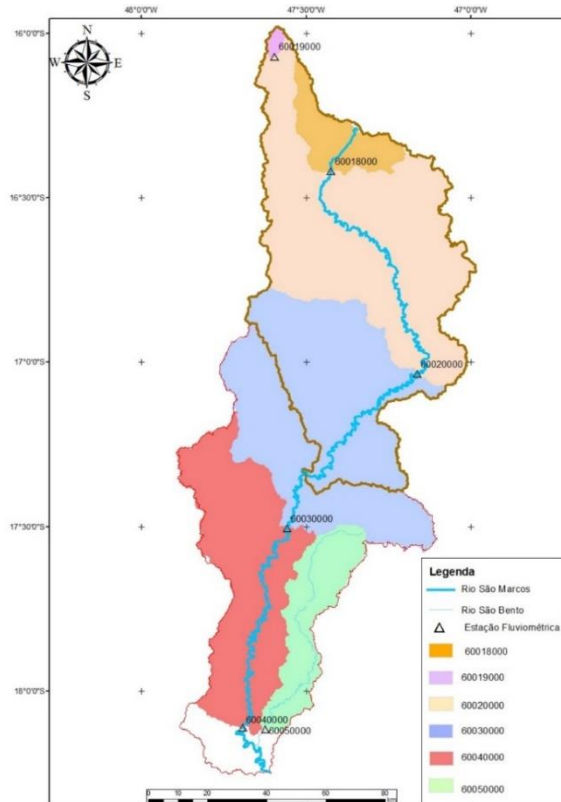
### 3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados foram provenientes de 6 estações fluviométricas do tipo convencionais presentes no banco de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018). A distribuição das estações na bacia apresenta quatro localizadas no Rio São Marcos, uma no Rio São Bento e outra no rio Samambaia (**Figura 3.2**). Embora nenhuma das estações esteja operando atualmente, os dados são adequados para estudos hidrológicos com uma série histórica acima de 30 anos. A **Tabela 3.1** resume as características de cada estação da BARSAM.

**Tabela 3.1** – Dados geográficos, períodos de obtenção de dados e número de dados diários disponibilizados para cada estação fluviométrica

Código	Altitude (m)	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	Rio	Data Inicial	Data Final	Nº de dados diários
60018000	821	573	São Marcos	01/01/78	31/12/80	1.096
60019000	955	45	Samambaia	01/05/09	30/06/14	1.495
60020000	775	4.420	São Marcos	01/07/66	31/07/07	12.977
60030000	660	8.370	São Marcos	01/04/72	31/12/07	12.868
60040000	412	10.700	São Marcos	01/06/69	31/12/07	13.875
60050000	650	922	São Bento	01/06/74	30/09/06	11.754

O método de regionalização adotado foi a regressão linear entre parâmetros da curva de permanência e a área de drenagem a montante da base ottocodificada. A curva de permanência expressa a probabilidade de um determinado evento ser igualado ou ultrapassado a partir da análise de frequência. Os eventos são ordenados em ordem decrescente e expressos em porcentagem do número de ordem ( $n_{ordem}$ ) em relação ao número de elementos da amostra ( $n$ ) (Silva, 2015). A partir da curva de permanência são extraídos vazões de referência (por exemplo, a  $Q_{95}$  que corresponde à vazão que é igualada ou superada em 95% do tempo) e os seguintes parâmetros estatísticos: média das vazões ( $Q_{meedia}$ ); vazão média de longo termo ( $Q_{mlt}$ ) que consiste na média dos valores das vazões médias anuo que é diferente da simples média das vazões); a relação  $Q_{95}/Q_{mlt}$  ( $r_{cp95}$ ); e a vazão específica ( $Q_{esp}$ ) que expressa a relação entre a vazão média anual dividida pela área de drenagem.



**Figura 3.1.** Mapa das áreas de drenagem das estações fluviométricas presentes na bacia do rio São Marcos

A  $r_{cp95}$  de cada estação fluviométrica foi comparada com os valores utilizados pela Agência Nacional de Águas na classificação de regiões quanto aos Níveis de Reservação Natural (**Tabela 3.2**).

**Tabela 3.2** – Níveis de Reservação Natural (adaptado de ANA/ainda não publicado).

Faixa de valores (i) de $r_{cp95}$	Frequência acumulada (Percentis)	Níveis de Reservação Natural
$0.373 < i \leq 0.862$	$P80\% < i \leq P100\%$	Ótimo
$0.253 < i \leq 0.373$	$P60\% < i \leq P80\%$	Bom
$0.161 < i \leq 0.253$	$P40\% < i \leq P60\%$	Regular
$0.085 < i \leq 0.161$	$P20\% < i \leq P40\%$	Ruim
$0.000 < i \leq 0.085$	$P0\% < i \leq P20\%$	Péssimo

A correlação das vazões de referência com as áreas de drenagem das estações fluviométricas é expressa por uma regressão linear simples, conforme as equações:

$$y = a \cdot x + b \quad (1)$$

Onde  $a$  é dado por:

$$a = \frac{n \cdot \sum x \cdot y - \sum x \cdot \sum y}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2)$$

E  $b$  (coeficiente linear) é dado por:

$$b = \bar{y} - a.\bar{x} \quad (3)$$

Onde “y” é a variável dependente (vazão), “x” é a variável independente (áreas de drenagem), “a” é o coeficiente angular (associado às áreas de drenagem), “b” é o coeficiente linear, e “n” é número de estações fluviométricas.

No entanto, os modelos de regionalização baseados na parametrização da curva de permanência podem provocar erros nas estimativas do ramo inferior da curva, onde os escoamentos são menores, embora possa apresentar um bom ajuste global (da Silveira & da Silveira, 2001).

### 3.4 RESULTADOS

A **Tabela 3.3** lista as variáveis hidrológicas extraídas das séries históricas das seis estações fluviométricas da BARSAM. As estações fluviométricas Rio Samambaia (60018000), Rio São Marcos (60019000) e Rio São Bento (60050000) possuem os maiores valores de  $Q_{esp}$  (embora tenham as menores áreas de drenagem dentre as seis estações fluviométricas analisadas), tornando essas regiões com maiores potências de disponibilidade hídrica da BARSAM. Considerando o índice **r<sub>cp95</sub>** para os Níveis de Reserva Natural (**Tabela 3.2**), a estação Rio Samambaia (60019000) é classificada como “ruim”, Ponte São Marcos (60020000) é “regular”, Campo Alegre de Goiás (60030000) e Fazenda São Domingos (60040000) são “Bons”, e Rio São Marcos (60018000) é “ótimo”.

O alto valor **r<sub>cp95</sub>** da estação Rio São Marcos (60018000) pode ser devido ao período histórico (1978-1980) em que essa estação ficou ativa (**Tabela 3.1**). No final dos anos 70, praticamente não havia nenhuma intervenção humana na área a jusante dessa estação que alterasse a vazão natural dos rios. A **Figura 3.3 (a)** demonstra que as vazões  $Q_{95}$  foram mantidas num patamar que corresponde a aproximadamente a 75% das vazões médias durante a estação seca (maio a setembro), o que leva a uma maior **r<sub>cp95</sub>** (**Tabela 3.3**).

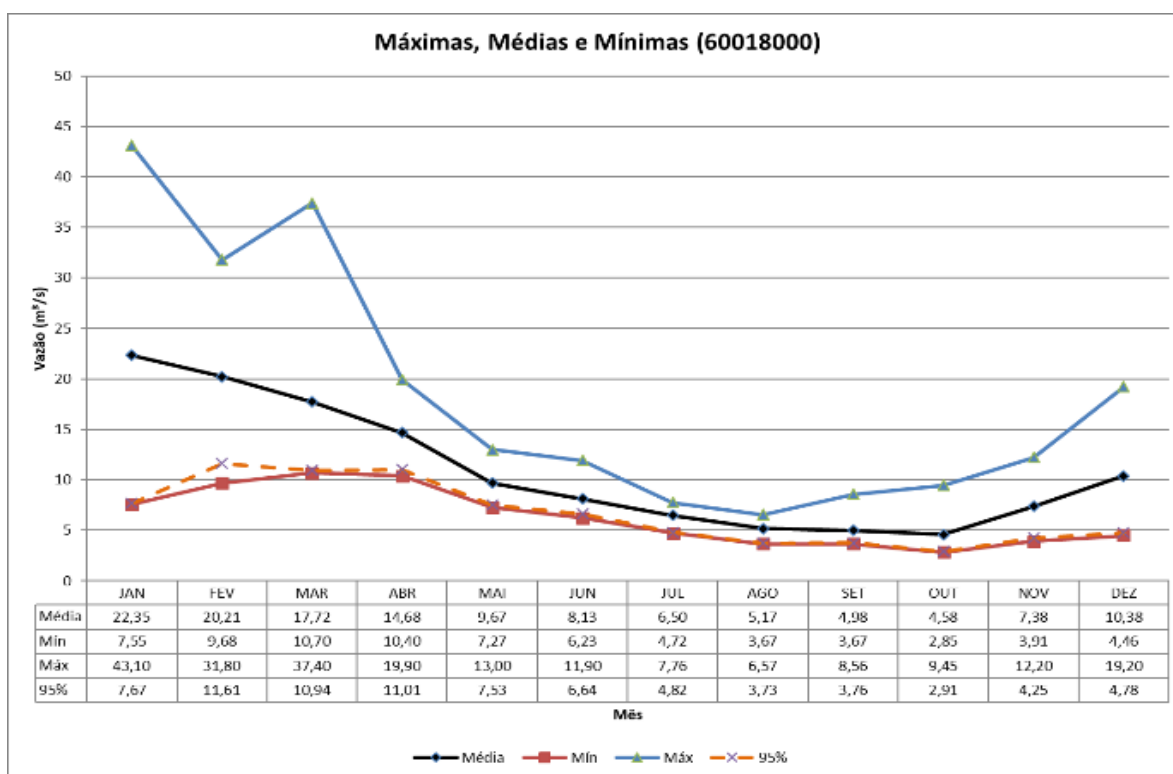
**Tabela 3.3** - Variáveis hidrológicas dos dados históricos de vazão a partir das 6 estações fluviométricas da BARSAM

Código	Nome	$Q_{mlt}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{media}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{95}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{esp}$ (l/s.km <sup>2</sup> )	r <sub>cp95</sub>
60018000	Rio São Marcos	8,90	10,94	3,91	19,03	0,44
60019000	Rio Samambaia	0,44	0,86	0,05	19,16	0,11
60020000	Ponte São Marcos	60,23	72,48	15,35	16,39	0,25
60030000	Campo Alegre de Goiás	114,18	140,13	34,41	16,74	0,30
60040000	Fazenda São Domingos	147,71	180,35	43,63	16,85	0,30
60050000	Rio São Bento	12,49	15,74	3,38	17,07	0,27

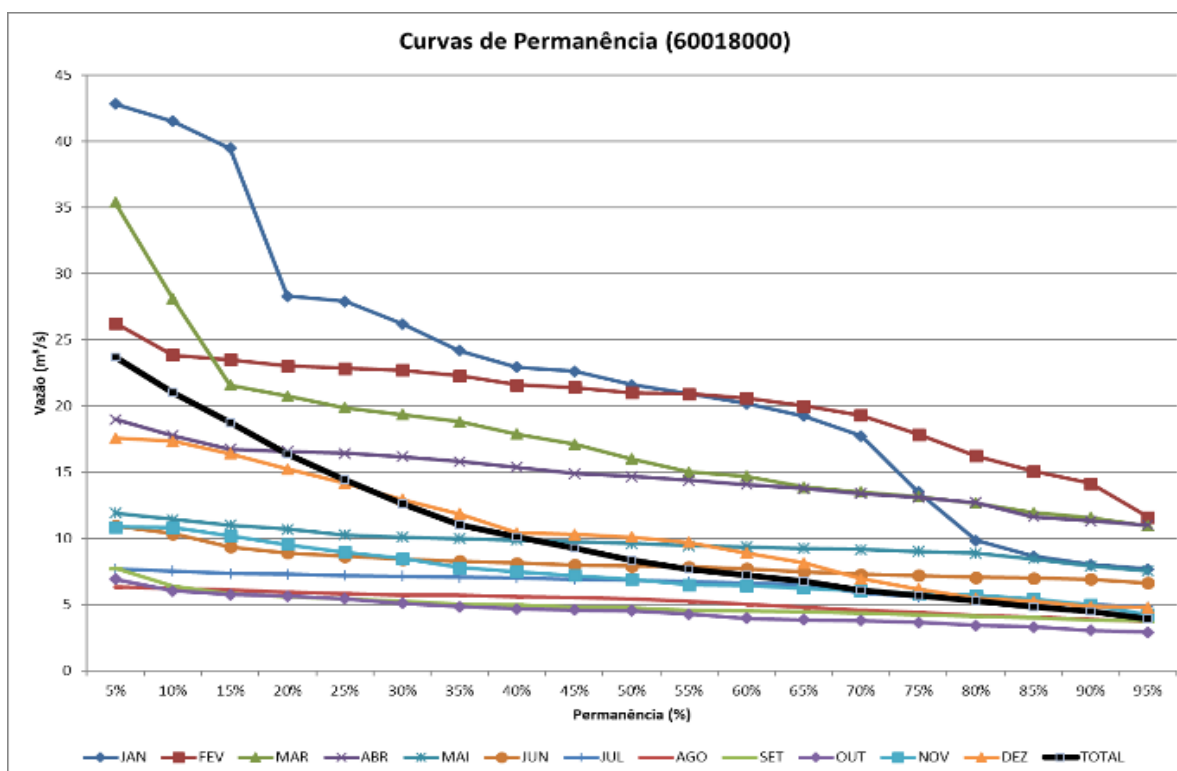
No caso da estação Rio Samambaia (60019000), o baixo valor **r<sub>cp95</sub>** pode ser explicada pelo recente e curto período histórico em que os dados de vazão foram medidos (**Tabela 3.1**), no qual já ocorrera uma intensa expansão da irrigação e dos demais componentes do sistema de irrigação por pivôs centrais (por exemplo a construção de reservatórios artificiais). Os reservatórios e a irrigação a montante dessa estação podem ter impedido que uma quantidade mínima de água fluísse para jusante nos períodos de seca, e conseqüentemente, ocasionaram a diminuição extrema da vazão de referência **Q<sub>95</sub>**. Isso pode ser confirmado ao analisar a **Figura 3.4**, contendo gráficos de vazões mínimas, médias, máximas e a **Q<sub>95</sub>** da estação 60019000. A **Figura 3.4 (a)** demonstra que a média da vazão **Q<sub>95</sub>** entre os meses de maio e junho é zero, embora a vazão média para o mesmo período varie entre 0,42 e 0,29 m<sup>3</sup>/s, o que pode ser considerada uma diferença relativa grande, levando-se em consideração os baixos volumes de vazão que historicamente fluem por essa estação. Portanto, os valores extremos de **r<sub>cp95</sub>** das estações 60018000 e 60019000 (ótimo e ruim, respectivamente) podem estar relacionados com a quantidade de água armazenada em reservatórios e com os diferentes níveis de demanda de água para irrigação, tendo em vista período histórico de coleta dos dados de cada uma.

Os valores de vazões mensais de mínimas, médias, máximas e **Q<sub>95</sub>** das estações 60020000, 60030000, 60040000 e 60050000 (**Figuras 3.5a, 3.6a, 3.7a e 3.8a**) e seus valores **r<sub>cp95</sub>** (**Tabela 3.3**), demonstram que as vazões de referência **Q<sub>95</sub>** estão numa faixa que corresponde 50% das vazões médias durante a estação da seca (maio a setembro). Os gráficos de vazões e de permanência (**Figuras 3.5b, 3.6b, 3.7b e 3.8b**) demonstram um padrão entre os 6 meses de maior e menor vazão.

A

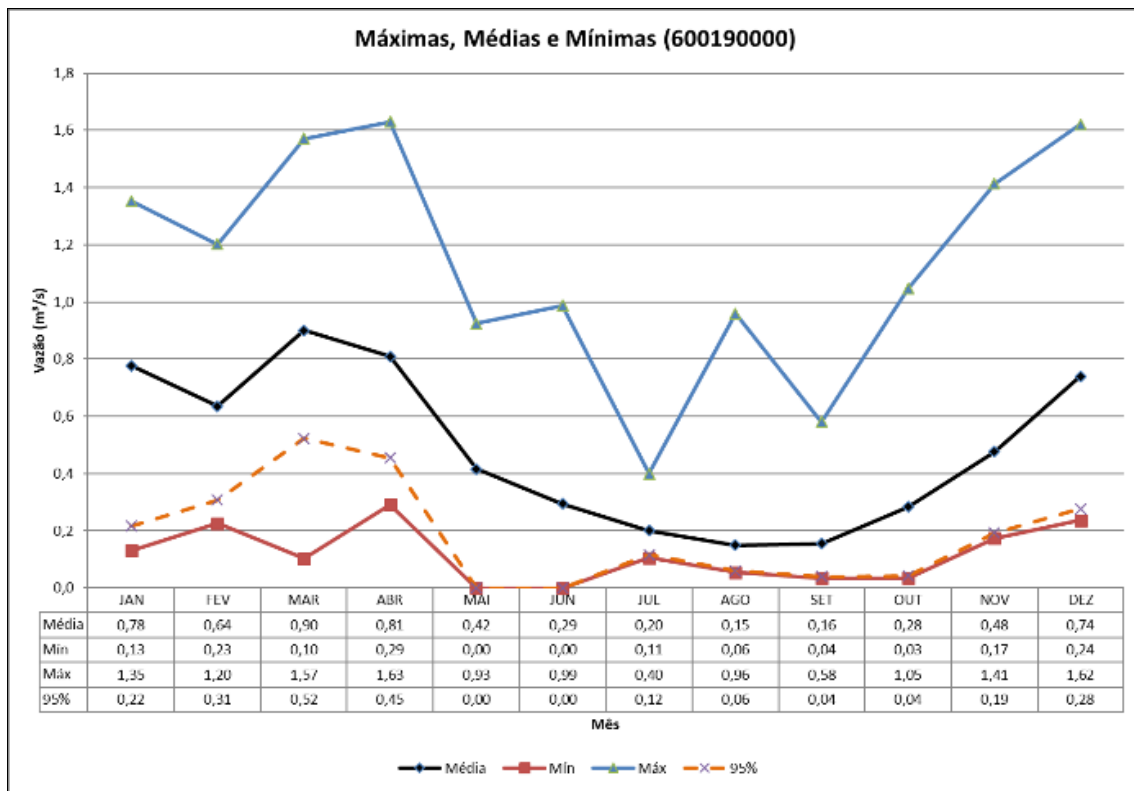


B

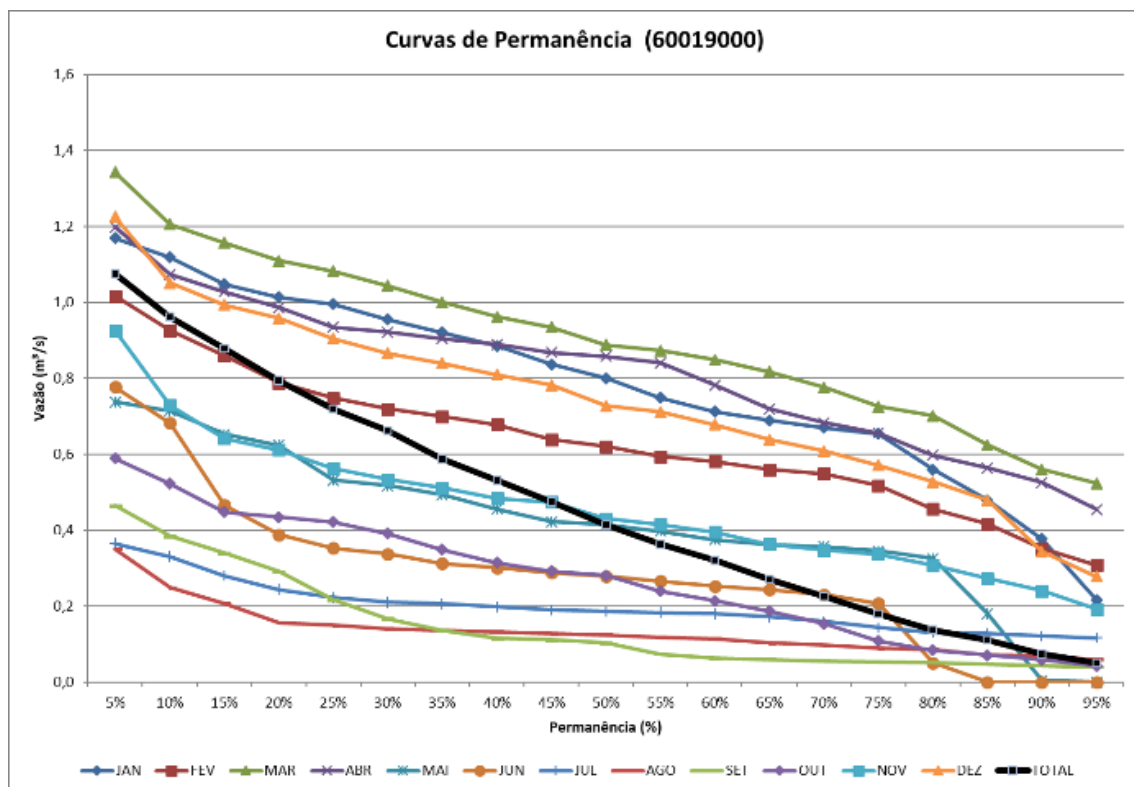


**Figura 3.3** – Gráficos dos dados hidrológicos da estação 60018000: (a) vazões máximas, médias e mínimas das históricas mensais, e (b) curvas de permanência históricas mensais.

A

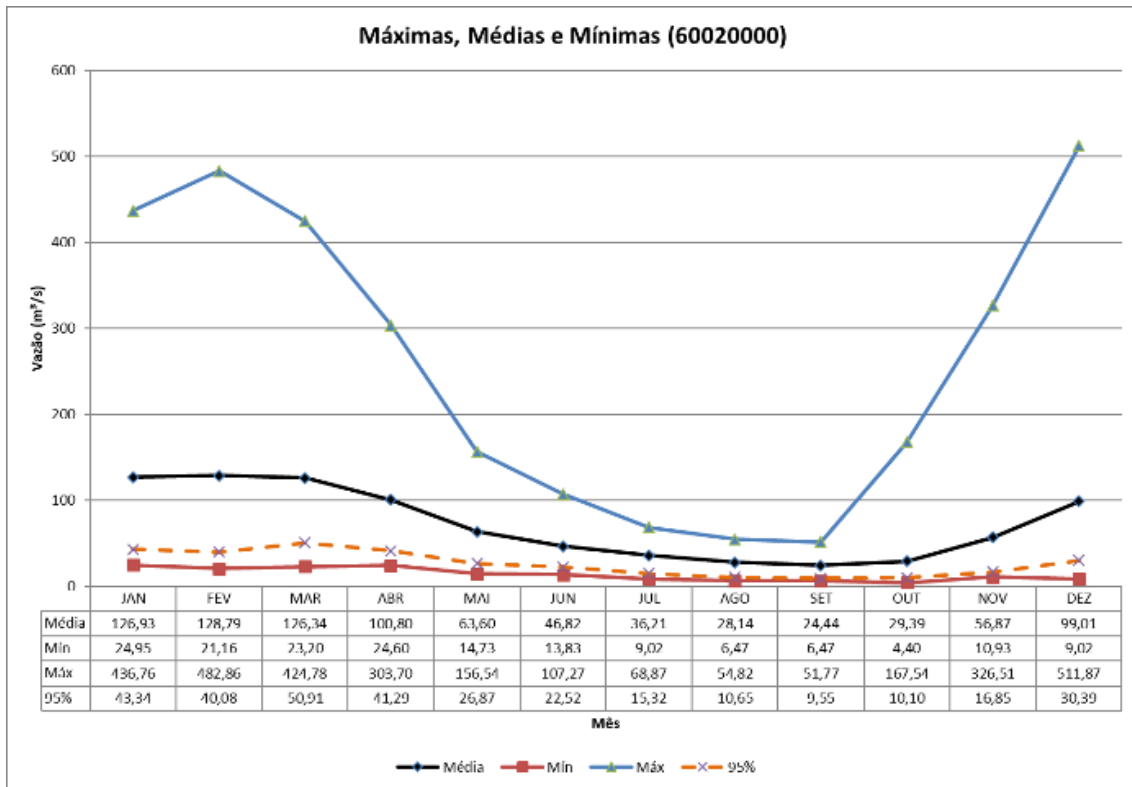


B

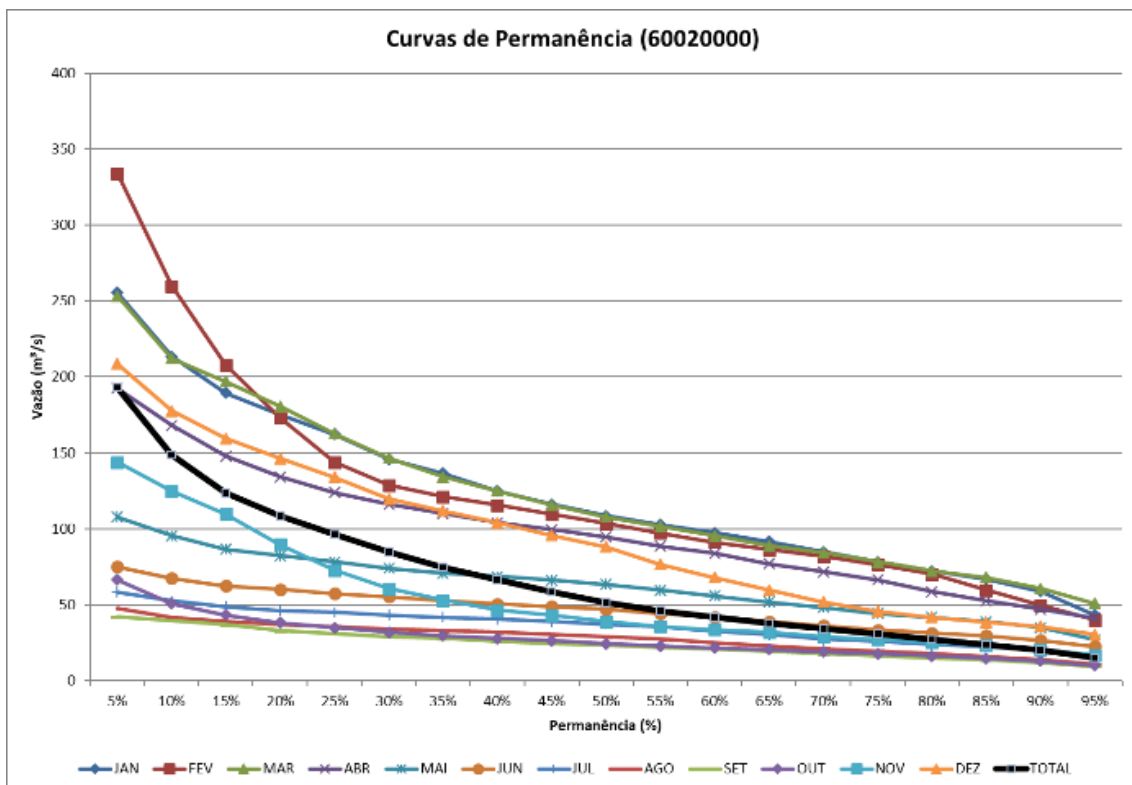


**Figura 3.4** – Gráficos dos dados hidrológicos da estação 60019000: (a) vazões máximas, médias e mínimas das históricas mensais, e (b) curvas de permanência históricas mensais.

A

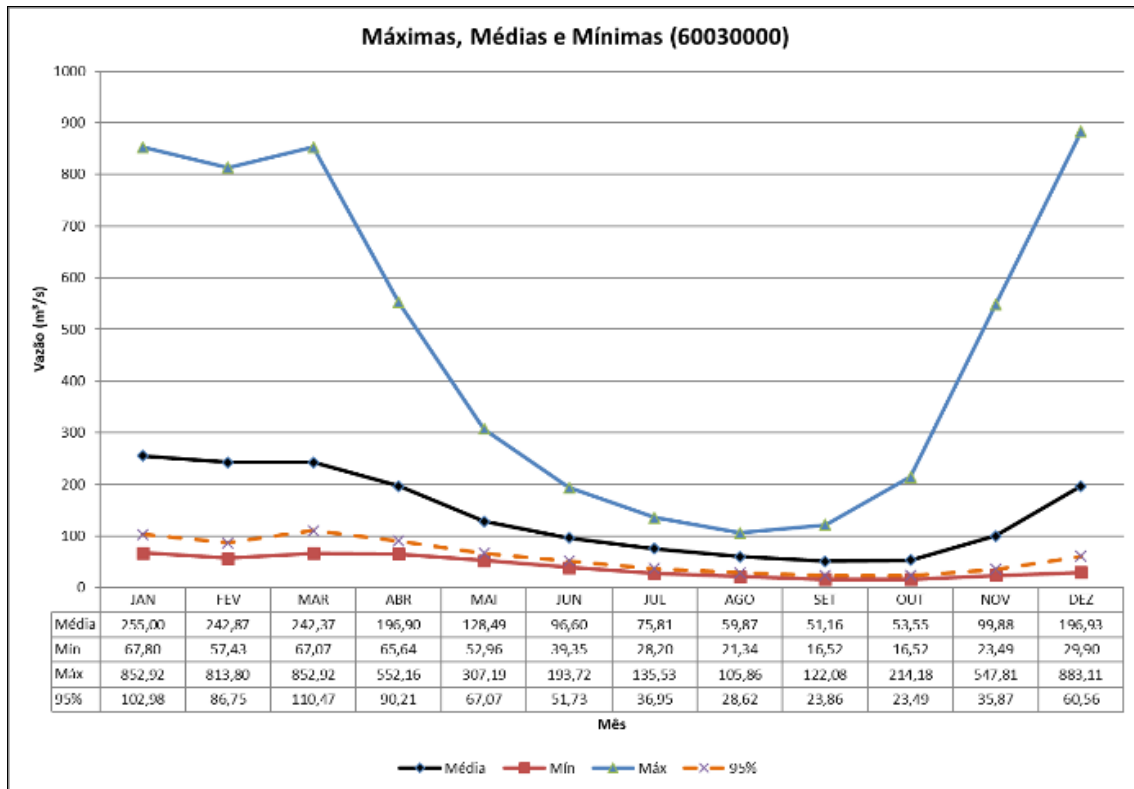


B

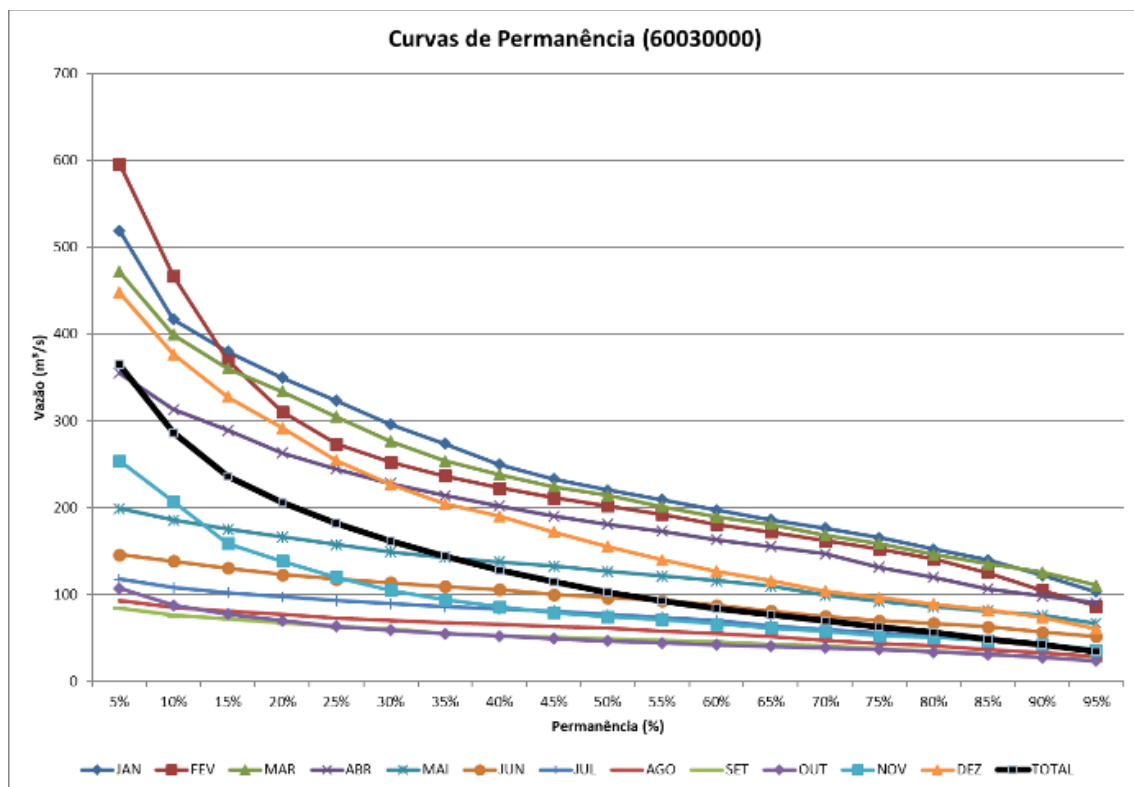


**Figura 3.5** – Gráficos dos dados hidrológicos da estação 60020000: (a) vazões máximas, médias e mínimas das históricas mensais, e (b) curvas de permanência históricas mensais.

A



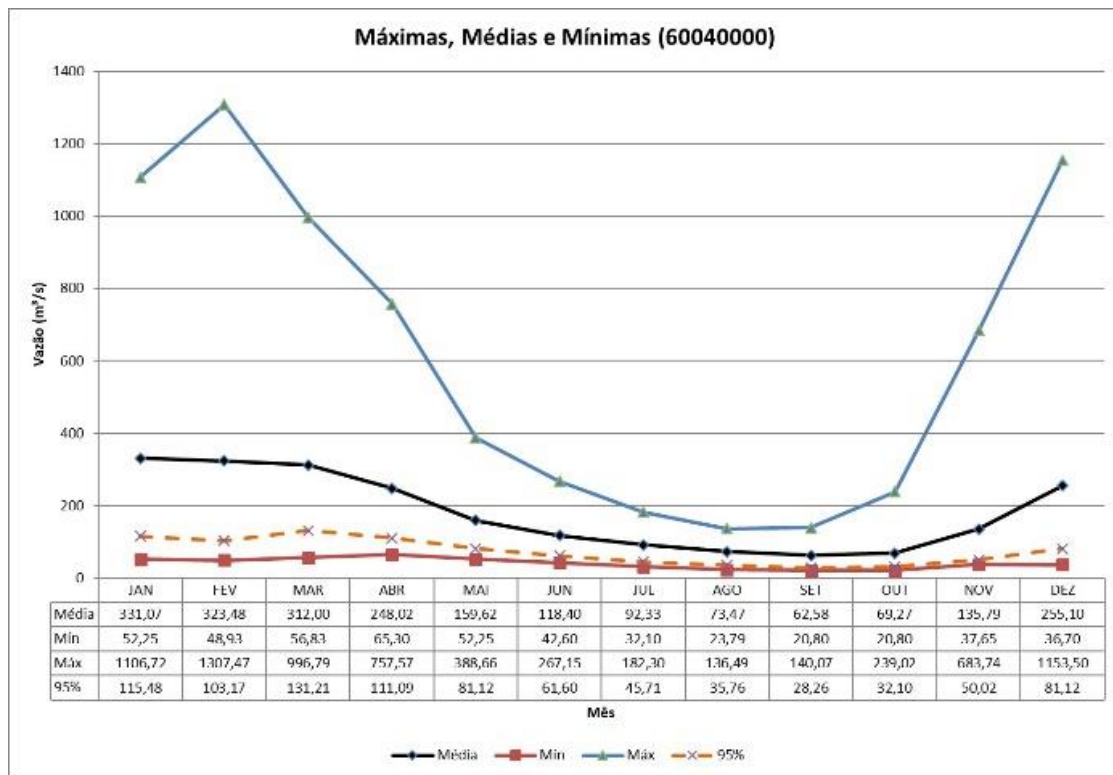
B



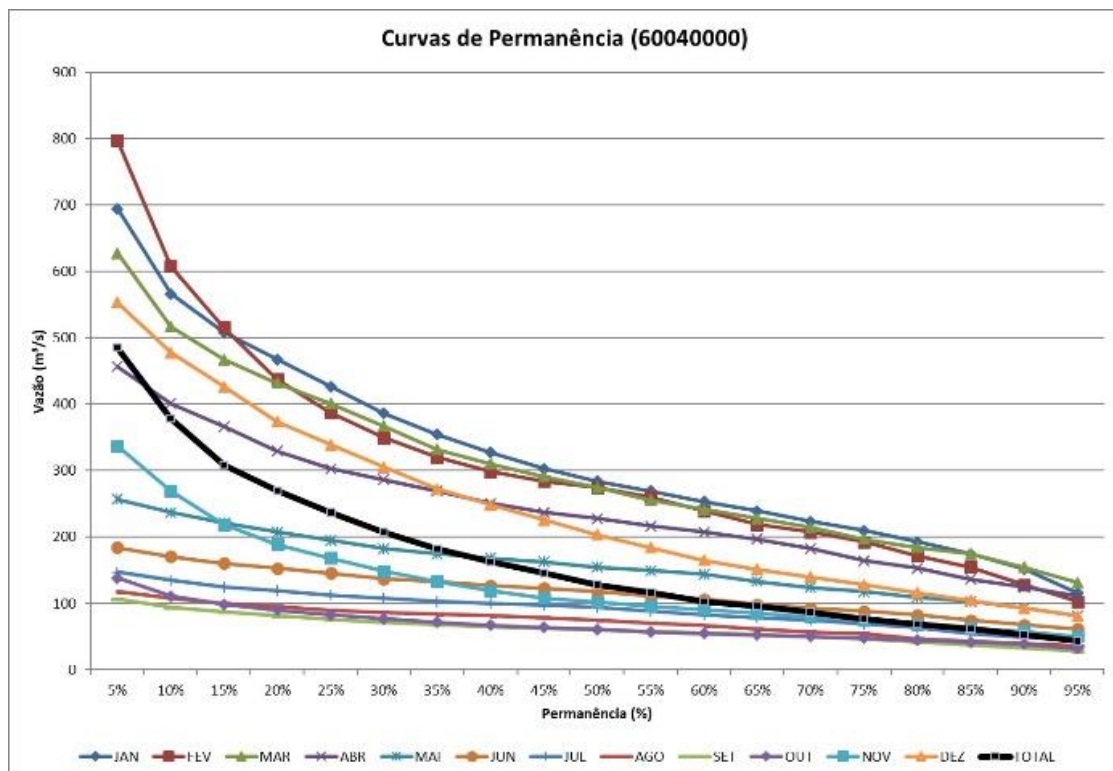
**Figura 3.6** – Gráficos dos dados hidrológicos da estação 60030000: (a) vazões máximas, médias e mínimas das históricas mensais, e (b) curvas de permanência históricas mensais.



A

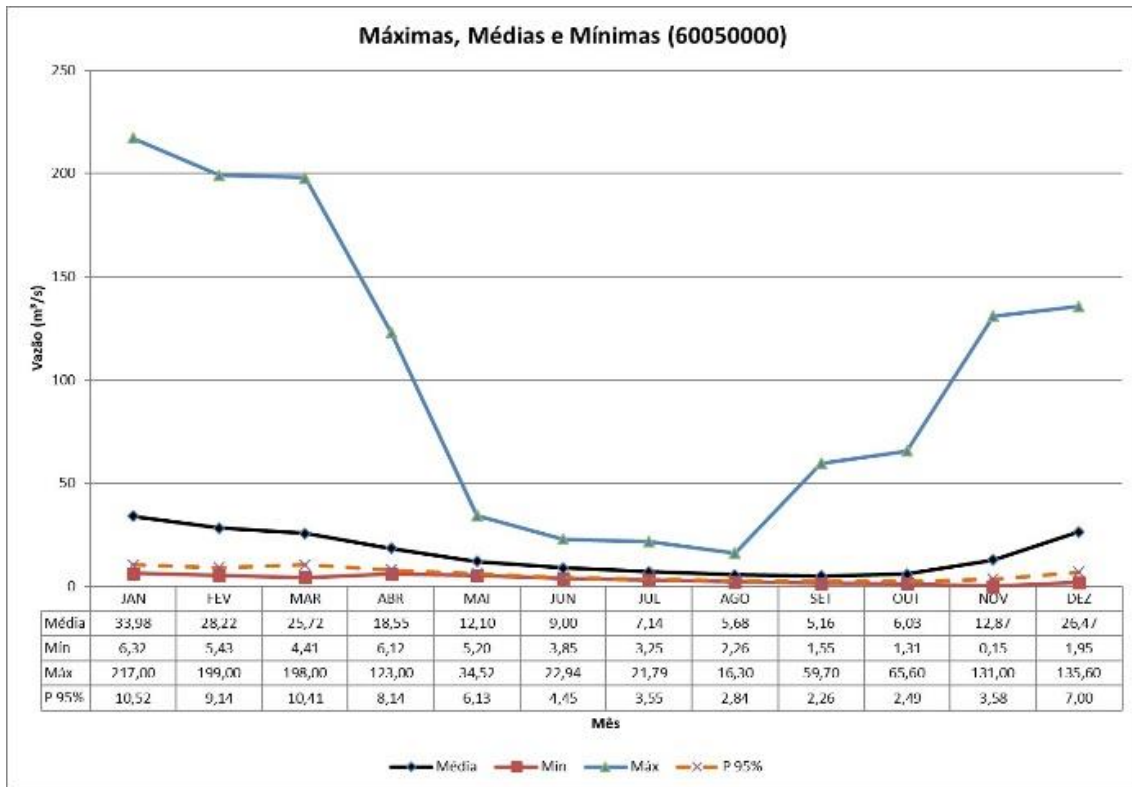


B

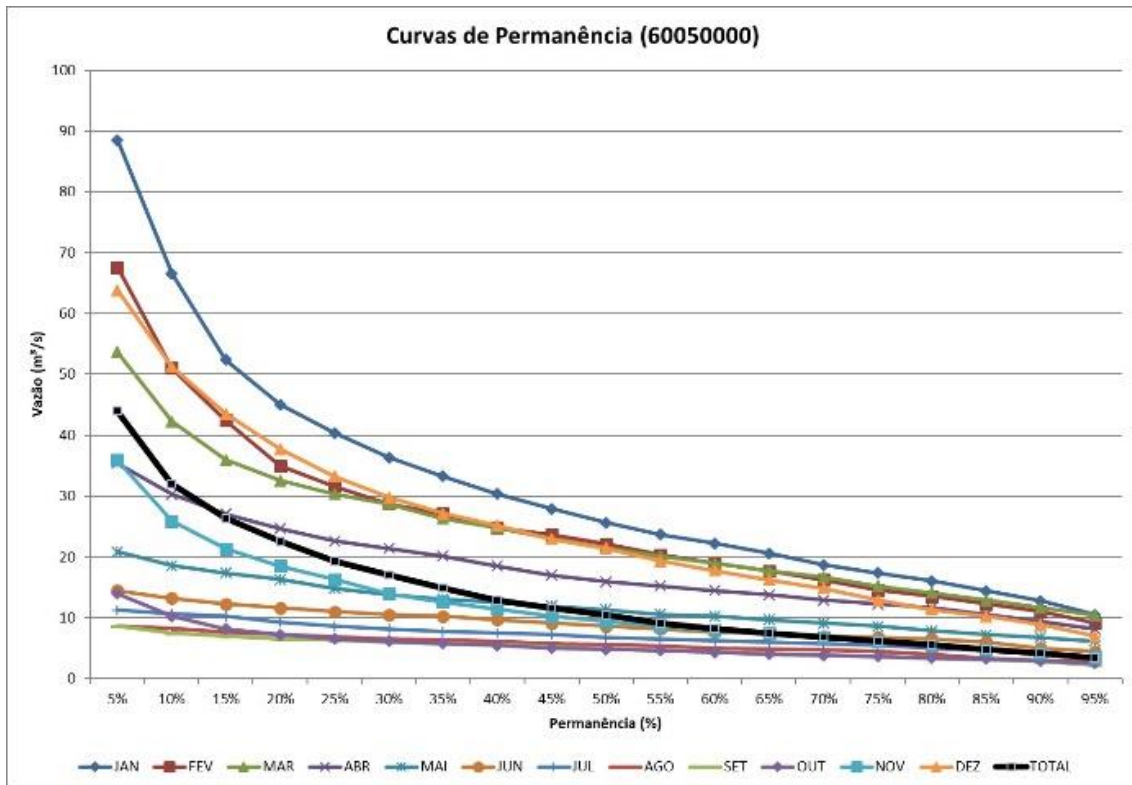


**Figura 3.7** – Gráficos dos dados hidrológicos da estação 60040000: (a) vazões máximas, médias e mínimas das históricas mensais, e (b) curvas de permanência históricas mensais.

A



B



**Figura 3.8** – Gráficos dos dados hidrológicos da estação 60050000: (a) vazões máximas, médias e mínimas das históricas mensais, e (b) curvas de permanência históricas mensais.

A **Tabela 3.4** demonstra que os meses de dezembro a maio são sempre os de maiores vazões, em contraposição entre abril e novembro são os meses de menores vazões. A exceção encontra-se nos dados da estação 60019000, em que o período de maior vazão acontece de novembro a abril, enquanto o período de menor vazão ocorre entre maio e outubro. Essa diferença entre a estação 60019000 e as demais estações está relacionada ao fato de possuir uma pequena área de contribuição nas cabeceiras do Rio Samambaia e uma coleta de dados em um período curto e recente (2009 a 2014) o que diminui o tempo de concentração da água na bacia.

**Tabela 3.4** – Os 6 meses de maior volume de vazão e os 6 meses de menor vazão conforme os dados das estações fluviométricas da BARSAM.

Estação	6 Meses de Maiores Volumes de Vazão*	6 Meses de Menores Volumes de Vazão*
60018000	Jan > Fev > Mar > Abr > Dez > Mai	Jun > Nov > Jul > Ago > Set > Out
60019000	Mar > Abr > Jan > Dez > Fev > Nov	Mai > Jun > Out > Jul > Set > Ago
60020000	Fev > Jan > Mar > Abr > Dez > Mai	Nov > Jun > Jul > Out > Ago > Set
60030000	Jan > Fev > Mar > Dez > Abr > Mai	Nov > Jun > Jul > Ago > Out > Set
60040000	Jan > Fev > Mar > Dez > Abr > Mai	Nov > Jun > Jul > Ago > Out > Set
60050000	Jan > Fev > Dez > Mar > Abr > Mai	Nov > Jun > Jul > Out > Ago > Set

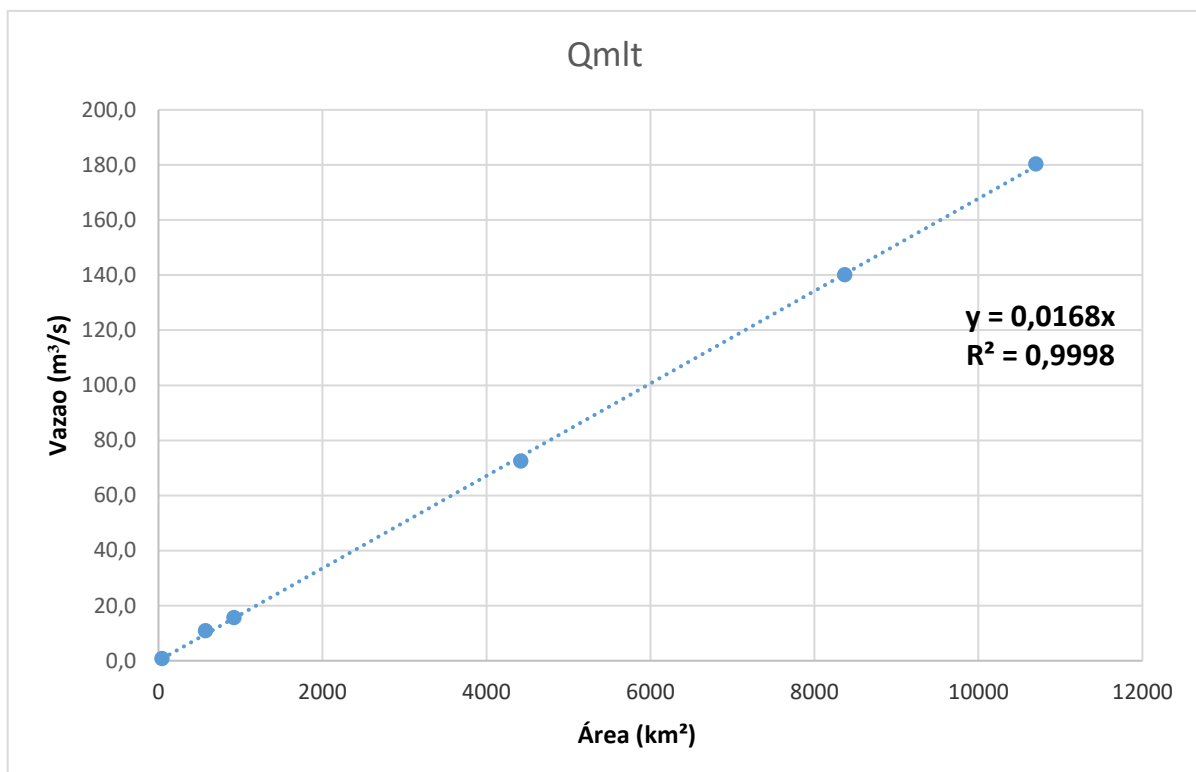
A **tabela 3.5** lista os índices **r<sub>cp95</sub>** para cada mês a partir da regionalização da BARSAM. A comparação dos valores da relação **r<sub>cp95</sub>** (**Tabela 3.5**) com os Níveis de Reservação Natural (**Tabela 3.2**) demonstra um ótimo índice de reservação natural da BARSAM para todos os meses ao longo do ano, embora o índice **r<sub>cp95</sub>** médio anual seja igual a **0,249**, o que é considerado apenas uma capacidade regular, quase boa, de reservação de água na bacia.

**Tabela 3.5** – Índice **r<sub>cp95</sub>** mês a mês para a BARSAM a partir da regionalização mensal para toda bacia.

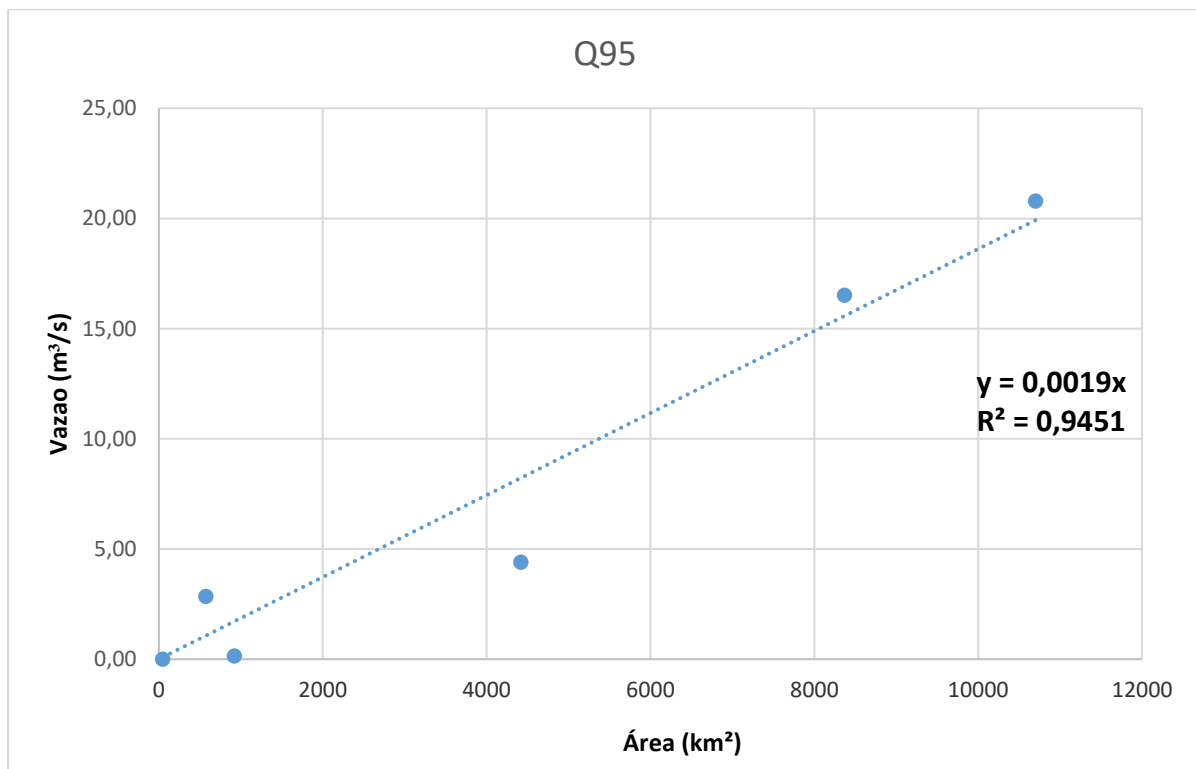
Mês	r <sub>cp95</sub>	Mês	r <sub>cp95</sub>	Mês	r <sub>cp95</sub>	Mês	r <sub>cp95</sub>
<b>Jan</b>	0,36	<b>Abr</b>	0,44	<b>Jul</b>	0,48	<b>Out</b>	0,44
<b>Fev</b>	0,32	<b>Mai</b>	0,50	<b>Ago</b>	0,47	<b>Nov</b>	0,36
<b>Mar</b>	0,43	<b>Jun</b>	0,51	<b>Set</b>	0,44	<b>Dez</b>	0,31

As **figuras 3.9** (A e B) demonstram exemplos de gráficos com as regressões lineares obtidas para a regionalização das vazões na BARSAM, tendo como exemplos a **Q<sub>mlt</sub>** e a **Q<sub>95</sub>**, respectivamente, demonstrando as equações de reta e o erro quadrado.

A



B



**Figura 3.9** – Gráfico demonstrando a regressão linear para obtenção da vazão de referência Qmlt (A) e Q95 (B), onde cada ponto no gráfico representa uma das seis estações fluviométricas utilizadas na regionalização.

### 3.5. CONCLUSÃO

Apesar de estar situada em uma região onde o clima é caracterizado por um longo período interanual sem chuvas, os dados históricos de vazão da BARSAM permitiram calcular índices **r<sub>cp95</sub>** elevados, indicando uma ótima capacidade de regularização de água quando se analisa os dados de vazão mês a mês. Porém na média anual a capacidade de regularização da bacia pode ser caracterizada como de regular para boa (**tabela 3.2**), tendo em vista o seu índice **r<sub>cp95</sub>** igual a 0,249, considerando a **Q<sub>95</sub>** e **Q<sub>mlt</sub>** médias anuais.

A BARSAM é uma bacia com volume de água relativamente elevado com relação às áreas de drenagem a montante, principalmente durante os períodos de novembro a abril. Esse farto volume de água durante o período chuvoso tem sido armazenado nas cabeceiras da bacia, o que é verificado pelo número de reservatórios e de pivôs centrais instalados nas regiões mais próximas as nascentes dos corpos hídricos. O fato de existirem tantos reservatórios para irrigação próximas as cabeceiras da BARSAM é corroborado pelo índice **r<sub>cp95</sub>** da bacia.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, A. N. **Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 3<sup>a</sup> ed., 2005.

ANA: **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>. Acesso em: 17 de janeiro de 2018.

CLIMATE-DATA.ORG – Clima para cidade de Cristalina/GO. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/location/43454/>. Acesso em 9 de junho de 2018.

FURQUIM, M. G. D.; ABDALA, K. de O. Caracterização Preliminar da Agricultura Irrigada em Cristalina-GO, A Estreita Relação Entre Desenvolvimento Sustentável e o Crescimento Econômico. **Irriga**, v. 1 n. 1, p. 129-134, 2016.

HE, Y.; BÁRDOSSY, A.; ZEHE, E. A review of regionalization for continuous streamflow simulation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.15, p.3539–3553, 2011.

HRACHOWITZ, M.; SAVENIJE, H.; BLÖSCHL, G.; MCDONNELL, J.; SIVAPALAN, M.; POMEROY, J.; ARHEIMER, B.; BLUME, T.; CLARK, M.; EHRET, U.; FENICIA, F.; FREER, J.; GELFAN, A.; GUPTA, H.; HUGHES, D.; HUT, R.; MONTANARI, A.; PANDE, S.; TETZLAFF, D.; TROCH, P.; UHLENBROOK, S.; WAGENER, T.; WINSEMIUS, H.; WOODS, R.; ZEHE, E.; CUDENNEC, C. A decade of predictions in ungauged basins (PUB)—a review. **Hydrological Sciences Journal**, v.58, n.6, p.1198–1255, 2013.

MOHAMOUD, Y. Prediction of daily flow duration curves and streamflow for ungauged catchments using regional flow duration curves. **Hydrological Sciences Journal**, V.53, n.4, p.706-724.

- LOUDIN, L.; KAY, A.; ANDREASSIAN, V.; PERRIN, C. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? **Water Resources Research**, v.46, n. 11, W11558, 2010.
- RAZAVI, T.; COULIBALY, P. Streamflow prediction in ungauged basins: review of regionalization methods. **Journal of Hydrologic Engineering**. V.18, n.8, 2013.
- SARTORI, A.; NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V.10, n.4, p.5-18, 2005.
- SILVA, L. P. da. **Hidrologia: Engenharia e Meio Ambiente**. 1. Ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- SIVAPALAN, M. Prediction in ungauged basins: a grand challenge for theoretical hydrology. **Hydrological Processes**, V.17, p.3163-3170, 2003.
- TRANCOSO, R.; PHINN, S.; McVICAR, T.; LARSEN, J.; McALPINE, C. Regional variation in streamflow drivers across a continental climatic gradient. **Ecohydrology**. V.1816, 16p, 2016.
- TUCCI, C.E.M. **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, 2002.
- YASAR, M.; BAYKAN, N. Prediction of flow duration curves for ungauged basins with Quasi-Newton Method. **Journal of Water Resources and Protection**. V.5, p.97-110, 2013.

## CAPÍTULO 4

### IMPACTO DOS PEQUENOS RESERVATÓRIOS SOBRE A DISPONIBILIDADE HÍDRICA E SIMULAÇÕES DE BALANÇO HÍDRICO NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Uma adequada alocação dos recursos hídricos para irrigação é necessária para suprir a demanda mundial crescente por alimentos (Oweis & Hachum, 2006). Nesse contexto, os pequenos e médios reservatórios de água são fundamentais por trazer segurança para os irrigantes contra as adversidades climáticas (Robaina et al., 2009; Collischonn et al., 2011; Hesssari et al., 2016; Bebermeier et al., 2017). Os sistemas de irrigação baseados em pequenos reservatórios que coletam a água da estação chuvosa requerem menos esforços e recursos para sua construção, manutenção e operação, e podem ser mais flexíveis do que os sistemas convencionais de larga escala, baseados na abstração de água de grandes reservatórios que requerem investimentos consideráveis em infraestrutura (Wisser et al., 2010). No entanto, em termos relativos, o custo por 1000 m<sup>3</sup> de água armazenada vai de 1 a 32 dólares para grandes reservatórios, enquanto é de 7 a 110 dólares para pequenos e médios reservatórios (Sakthivadivel et al., 2002).

Apesar dos seus benefícios, os reservatórios promovem diversas mudanças ambientais no regime fluvial, dinâmica de transporte de sedimentos, circulação e qualidade das águas, deposição de sedimentos e área alagada, que comprometem a fauna, flora e ecossistemas aquáticos (Silva, 2015; Tubelis, 2009; Gonçalves et al., 2006). Além disso, a falta de manutenção dos barramentos pode ser uma ameaça à segurança das populações a jusante (Pisaniello et al., 2017). Os reservatórios de irrigação intensiva influenciam mais na vazão do que os reservatórios de dessedentação animal, pois sofrem declínios mais severos da vazão principalmente na época de seca (Nguyen et al., 2017). O impacto hidrológico dos reservatórios aumenta após a barragem e vai progressivamente diminuindo com a distância (Nathan, 2012).

Os reservatórios aumentam a superfície líquida na bacia, causando maiores perdas por evaporação e diminuição da vazão média (Sakthivadivel et al., 1997; Tucci, 2002; Ngigi et al., 2003; Callow & Smettem, 2009; Wisser et al., 2010; Van Meter et al., 2016). Geralmente, a evaporação das superfícies líquidas é maior do que a evapotranspiração das vegetações. Contudo, os reservatórios com área inundada máxima inferior a três hectares não têm influência significativa no ciclo hidrológico da bacia (Collischonn et al., 2011). A maior evaporação na bacia pode ser contrabalanceado pelo decréscimo da evapotranspiração causado pela conversão da vegetação nativa da bacia em pastagens e lavouras,

uma vez que a  $ET_{m\u00e9dia}$  do Cerrado \u00e9 de  $3,42 \text{ mm.dia}^{-1}$ , enquanto que a  $ET_{m\u00e9dia}$  de pastagens plantadas, pastagens naturais e lavouras \u00e9 de  $2,74 \text{ mm.dia}^{-1}$  (Costa et al., 2003).

O consumo de \u00e1gua por culturas agr\u00edcolas normalmente se refere a toda \u00e1gua perdida pelas plantas (transpira\u00e7\u00e3o e gluta\u00e7\u00e3o) e pela superf\u00edcie do solo mais a \u00e1gua retida nos tecidos vegetais, sendo essa menor que 1% do total evaporado durante o ciclo de crescimento da planta (Reichardt & Timm, 2016). O consumo de \u00e1gua pela irriga\u00e7\u00e3o \u00e9 o montante de \u00e1gua que n\u00e3o volta para a bacia, sendo consumida pela evapotranspira\u00e7\u00e3o (Pfister et al., 2011). Em uma irriga\u00e7\u00e3o eficiente n\u00e3o deve haver \u00e1gua perdida por infiltra\u00e7\u00e3o profunda no solo ou por escoamento superficial. O volume de \u00e1gua aplicada na irriga\u00e7\u00e3o deve ser calculado conforme a necessidade h\u00eddrica da cultura e a dura\u00e7\u00e3o de seus est\u00e1gios de desenvolvimento (Allen et al., 1998). Portanto, a irriga\u00e7\u00e3o racional deve utilizar esta\u00e7\u00f5es clim\u00e1ticas para o c\u00e1lculo da evapotranspira\u00e7\u00e3o di\u00e1ria no local. A observa\u00e7\u00e3o dessa pr\u00e1tica pelo irrigante \u00e9 positiva n\u00e3o apenas pela economia de \u00e1gua e energia, mas tamb\u00e9m evita o escoamento superficial e a lixivia\u00e7\u00e3o de fertilizantes e agrot\u00f3xicos para a \u00e1gua subterr\u00e2nea.

Na regi\u00e3o do Cerrado, a incerteza do fornecimento seguro e continuado de \u00e1gua para irriga\u00e7\u00e3o durante a esta\u00e7\u00e3o de seca e ver\u00e2nicos torna o processo de reten\u00e7\u00e3o e armazenamento a \u00fanica maneira de atender \u00e0s diversas demandas h\u00eddricas no decorrer do tempo. Portanto, os pequenos reservat\u00f3rios exercem um papel fundamental no sistema de irriga\u00e7\u00e3o por piv\u00f4s centrais nas localidades de savanas. A disponibilidade e a demanda h\u00eddrica s\u00e3o informa\u00e7\u00f5es fundamentais para o planejamento e amplia\u00e7\u00e3o da irriga\u00e7\u00e3o.

O presente trabalho possui como objetivo simular e avaliar o balan\u00e7o h\u00eddrico da Bacia do Rio S\u00e3o Marcos (BARSAM), regi\u00e3o no Cerrado com alta concentra\u00e7\u00e3o de irriga\u00e7\u00e3o por piv\u00f4 central, considerando a disponibilidade h\u00eddrica dispon\u00edvel e a demanda proveniente de uma situa\u00e7\u00e3o hipot\u00e9tica de alto consumo de \u00e1gua por irriga\u00e7\u00e3o de piv\u00f4s centrais no per\u00edodo de seca. Nesse contexto de condi\u00e7\u00e3o cr\u00edtica, a simula\u00e7\u00e3o adotou a cultura de milho que apresenta uma alta necessidade de irriga\u00e7\u00e3o, superior as outras planta\u00e7\u00f5es presentes na regi\u00e3o (ANA, 2013). A elabora\u00e7\u00e3o do cen\u00e1rio hipot\u00e9tico adotou os piv\u00f4s centrais existentes na BARSAM em setembro de 2006 e considerou todos com concomitante planta\u00e7\u00e3o de milho. Na quantifica\u00e7\u00e3o de \u00e1gua dispon\u00edvel s\u00e3o estimados os seguintes par\u00e2metros dos reservat\u00f3rios: volume, quantidade de \u00e1gua afluyente (usando o m\u00e9todo de regionaliza\u00e7\u00e3o), m\u00e9dia de evapora\u00e7\u00e3o e infiltra\u00e7\u00e3o. Por fim, busca-se uma compara\u00e7\u00e3o entre o balan\u00e7o h\u00eddrico para a safra de inverno considerando como disponibilidade h\u00eddrica a vaz\u00e3o referente a Q95 e a Q95 mais a influ\u00eancia dos reservat\u00f3rios.



## 4.2 ÁREA DE ESTUDO

A BARSAM é uma sub-bacia hidrográfica do rio Paranaíba, pertencente à região hidrográfica do Paraná. Essa bacia está inserida nos estados de Goiás e Minas Gerais e no Distrito Federal, e o rio São Marcos divide os estados de Goiás e Minas Gerais entre os municípios de Cristalina e Ipameri, do lado de Goiás, e Unai e Paracatu, pelo lado de Minas Gerais. A bacia está no domínio morfoclimáticos dos “chapadões tropicais inferiores com cerrados e florestas de galeria”, sendo que sua maior parte incide nos domínios morfoestruturais “**Cinturões Móveis Neoproterozóicos**”, e menor porção da bacia, que abrange a margem esquerda da bacia, consta nos domínios morfoestruturais “**Cratons Neoproterozóicos**” (IBGE, 2009).

As unidades geomorfológicas podem ser subdivididas em depressões, patamares e planaltos. As “**Depressões**” são relevos planos ou ondulados, situados abaixo do nível das regiões vizinhas, elaborados em rochas de classes variadas. Os “**patamares**” são relevos planos ou ondulados, elaborados em diferentes classes de rochas, constituindo superfícies intermediárias ou degraus entre áreas de relevos mais elevados e áreas topográficas mais baixas. Os “**planaltos**” são conjuntos de relevos planos ou dissecados, de altitudes elevadas, limitados, pelo menos em um lado, por superfícies mais baixas, onde os processos de erosão superam os de sedimentação (IBGE, 2009). Com essa definição percebe-se que planaltos, patamares e depressões são todas regiões em que os relevos planos têm predominância, e que a principal diferença entre eles é a altitude e os processos de erosão e sedimentação.

A BARSAM possui vocação agrícola, na qual a riqueza gerada pela agricultura irrigada por pivôs centrais coloca três municípios com terras na bacia (Cristalina, Unai e Paracatu) entre os municípios de maior PIB agrícola do Brasil (IBGE, 2015). Acoplados a esses pivôs estão dezenas de reservatórios de água construídos por meio de barramentos de terra transversais aos corpos hídricos, sendo muito comum o alagamento de veredas. A maior parte dos reservatórios da BARSAM não são operados com descarregadores de fundo ou com algum outro mecanismo que permita regularizar a vazão. A evaporação e infiltração de água no solo nos reservatórios pode ser uma grande fonte de perdas, pois estima-se que a percolação de água no solo em um pequeno reservatório na região da BARSAM esteja por volta de  $31 \text{ mm. dia}^{-1}$  (Rodrigues & Dekker, 2008).

## 4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia pode ser subdividida nas seguintes etapas conforme a **Figura 4.1**.

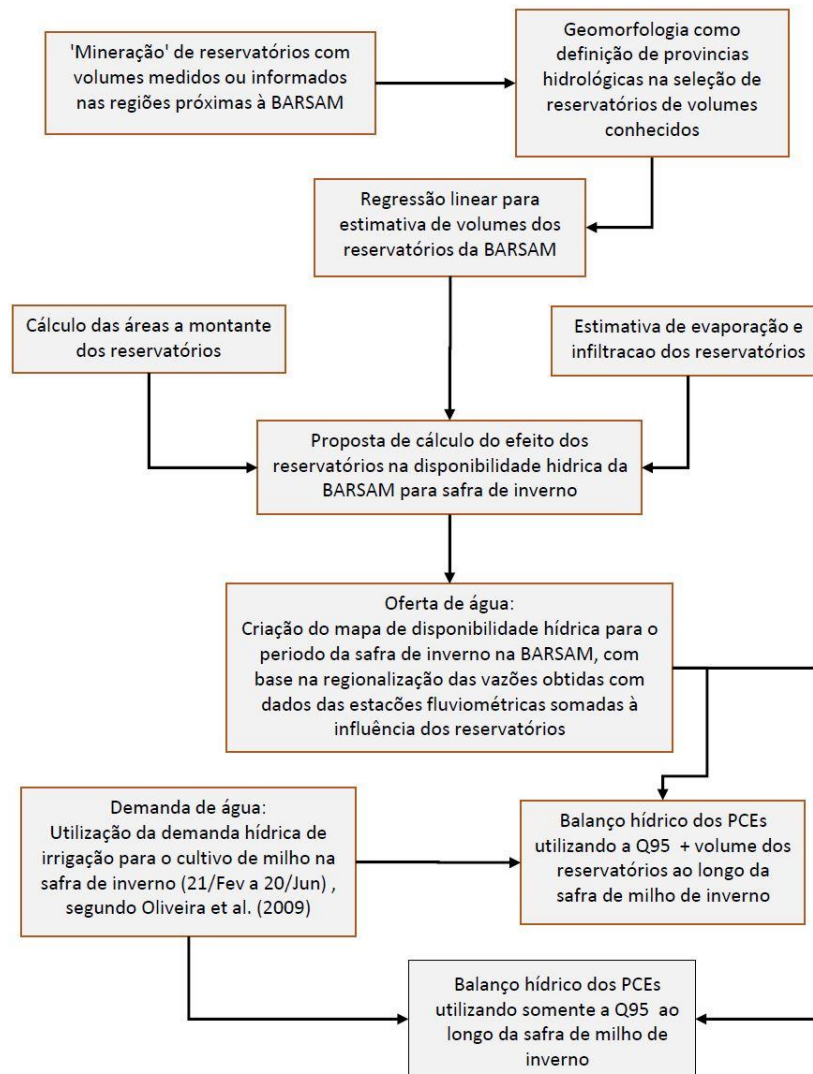
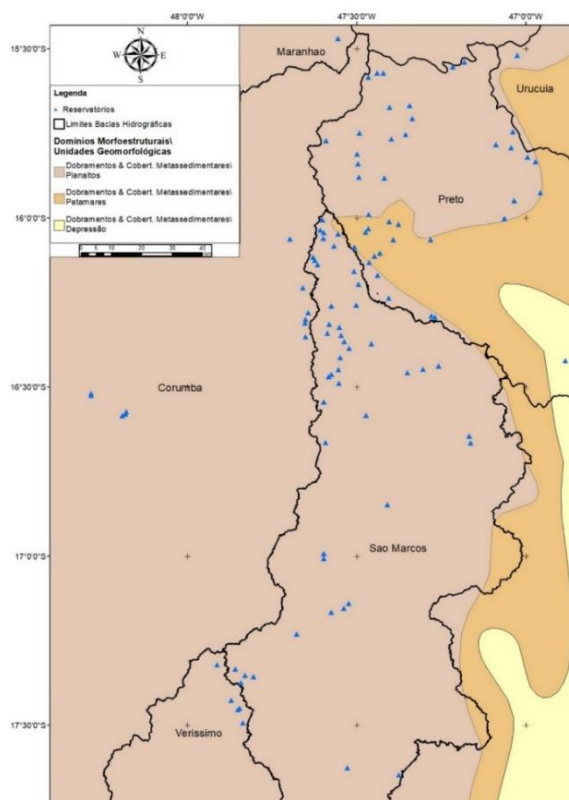


Figura 4.1. Fluxograma das etapas descritas no capítulo 4.

#### 4.3.1 - ESTIMATIVA DO VOLUME DOS RESERVATÓRIOS

A utilização de equações correlacionando área, volume e altura de barramentos para estimar o volume de reservatórios sem dados conhecidos é uma técnica que tem demonstrado bons resultados. (Rodrigues & Liebe, 2013; Robaina et al., 2009). A estimativa de volumes desconhecidos de reservatórios por sua área de espelho d'água tem as seguintes premissas: (a) confiabilidade nos dados de entrada de volumes medidos ou conhecidos dos reservatórios que servirão como base para a estimativa; (b) mapeamento detalhado do perímetro do espelho d'água; e (c) distribuição em uma região hidrologicamente homogênea (Lanna, 1983; Goldenfum, 2001), caracterizados por apresentar similaridade nos fatores integrantes do processo hidrológico. Considerando o Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2016), foram selecionados **69 reservatórios** com descrição do volume d'água na BARSAM e bacias adjacentes (como Maranhão, Verissimo e Corumbá). Esses reservatórios estão sobre o domínio morfoestrutural de “Dobramentos e Coberturas Metassedimentares”, nos quais **67**

incidem na unidade geomorfológica “Planaltos” e apenas dois na “Depressão”. Outros **40** reservatórios analisados tiveram seus volumes medidos por batimetria na bacia do rio Preto (Rodrigues et al., 2012), vizinha à BARSAM na sua porção nordeste com características morfoclimáticas e hidrológicas similares. Esses reservatórios também estão sobre o mesmo domínio morfoestrutural, sendo 30 na unidade de “Planaltos” e 10 na unidade “Patamares” (**Figura 4.2**). A **Tabela 4.1** lista o número de reservatórios com volume conhecidos considerando a fonte de dados e a distribuição nas unidades geomorfológicas.



**Figura 4.2** – Mapa dos reservatórios com volumes conhecidos utilizados na análise sobre os domínios morfoestruturais/unidades geomorfológicas.

Dentre o conjunto de **109** reservatórios com volumes conhecidos, foram selecionados aqueles sobre as unidades geomorfológicas “Planaltos” ou “Patamares” dominantes na região de estudo, eliminando os dois reservatórios sobre a unidade “Depressão”, presentes nas “Serras de Unai”. Do conjunto de **107** reservatórios, foram selecionados aleatoriamente **20** reservatórios para servirem como contraprova, sobrando **97** reservatórios para serem usados para estabelecer a regressão linear para estimar o volume a partir da área para todos os **354** reservatórios utilizados como fonte de água para irrigação por pivôs centrais na BARSAM. Portanto, verifica-se que os reservatórios utilizados possuem regiões hidrológicamente homogêneas, todos localizados ou em “Planaltos”, ou em “Chapadões”, ou em “Patamares”, com climas similares devido a proximidade entre si, permitindo a obtenção de regressões lineares consistentes. O mapeamento dos espelhos d’água dos reservatórios foram

cuidadosamente vetorizados por interpretação visual de imagens de satélite de alta resolução usando sistema de informações geográficas.

**Tabela 4.1** – Tipo de geomorfologia em que estão localizados os reservatórios com dados de volume conhecidos

	<b>Reservatórios com dados de volume conhecidos - Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2016)</b>	<b>Reservatórios com volumes de medidos - Rodrigues et al. (2012)</b>
<b>Dobramentos e Coberturas Metassedimentares \ Planaltos</b>	67 reservatórios	30 reservatórios
<b>Dobramentos e Coberturas Metassedimentares \ Patamares</b>	0 reservatório	10 reservatórios
<b>Dobramentos e Coberturas Metassedimentares \ Depressão – Serras de Unai</b>	2 reservatórios	0 reservatório

A regressão linear entre a área (A) e volume (V) dos reservatórios foram realizadas em duas etapas: (a) primeira regressão para identificar e excluir os outliers, considerando os pontos acima do quantil de 90% e inferior do quantil de 10% de distância da linha de tendência; e (b) segunda regressão sem a presença dos outliers. A segunda regressão foi utilizada para estimar os volumes dos demais reservatórios da BARSAM.

#### 4.3.2 - DEMANDA HÍDRICA DOS SISTEMAS DE PIVÔ CENTRAL PARA O PLANTIO DO MILHO DA SAFRA DE INVERNO

O cálculo do balanço hídrico por ottobacia necessita estabelecer o consumo de água médio por irrigação. A resolução da ANA (2010) estabeleceu que o consumo instantâneo médio anual por hectare irrigado por pivô central na BARSAM é igual a 0,13 L.s<sup>-1</sup>. Contudo, valores maiores de consumo instantâneos médios de irrigação são descritos na região, por exemplo na bacia do Ribeirão Samambaia (Lima et al., 2007) e dos pivôs centrais do Distrito Federal (Sano et al., 2005), nos quais a demanda de pivôs centrais calculados por sensoriamento remoto atinge um consumo de água da ordem de 0,19 L/s.ha<sup>-1</sup>. Dentre os plantios, a cultura do milho necessita de uma lâmina média de água maior do que outras culturas da BARSAM (ANA, 2013). A lâmina média de 0,6 L/s. ha<sup>-1</sup> para a irrigação do milho foi definida por isolinhas de necessidade de irrigação para todos o Estado de Goiás, em mm/dia para 3 safras de milho durante o ano: verão, safrinha e inverno (Oliveira et al; 2009). Portanto, uma simulação hipotética de irrigação do plantio do milho em todos os pivôs centrais da BARSAM ao mesmo período torna-se valiosa para avaliar a demanda máxima de água para irrigação.

O período escolhido foi entre o final de fevereiro e o final de junho, época em que a disponibilidade hídrica regional começa a ficar crítica dentro do ciclo hidrológico anual (outubro a setembro). A análise das isolinhas para o plantio do milho da safra de inverno para a porção do Distrito Federal e Goiás

dentro da BARSAM descreveu uma necessidade de irrigação entre 3,4 e 4,4 mm/dia (Oliveira et al; 2009). A aplicação do valor médio 3,9 mm/dia resulta em uma demanda específica de 0,45 L/s. ha<sup>-1</sup>. A ineficiência dos equipamentos de irrigação por pivô central pode ser simulada com o acréscimo de 20% nesta demanda, chegando a definição da lâmina média de **0,54 L/s. ha<sup>-1</sup>** ou **4,66 mm/dia** para o cultivo do milho da safra de inverno.

A recomendação do período de plantio para safra de inverno está entre 50 e 55 dias julianos. Considerando o valor médio de 52 dias julianos, a data de plantio da simulação aconteceu no dia **21 de fevereiro**, onde os produtores rurais irrigantes da BARSAM poderiam ter plantado a safra de verão em fim de outubro, colhendo-a em fim de fevereiro e plantando a safra irrigada de inverno (no caso o milho) próximo ao período da colheita da safra de verão. Na simulação, considerou-se que o milho plantado para a safra de inverno foi uma variedade de ciclo longo, de 120 dias, com colheita prevista para o 172º dia juliano, que decorre entre os dias **20 e 21 de junho**. Adotando-se 100 dias como o período de irrigação do milho e a demanda de **0,54 L/s. ha<sup>-1</sup>**, a necessidade hídrica total da cultura do milho para a safra de inverno seria de **4.655 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>**.

#### 4.3.3. DISPONIBILIDADE HÍDRICA REAL MÍNIMA NOS RESERVATÓRIOS

A disponibilidade hídrica real mínima no reservatório no período de 100 dias ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) ( $D_{real}$ ) é obtida pela disponibilidade hídrica inicial mínima do reservatório no período de 100 dias ( $D_{inical}$ ) subtraída pela evaporação instantânea ( $E_{inst}$ ) e infiltração instantânea ( $I_{inst}$ ), conforme a seguinte equação:

$$D_{real} = D_{inical} - (E_{inst} + I_{inst}) \quad (4.1)$$

Onde o cálculo da vazão do reservatório ao longo do período de 100 dias, vazão passível de ser utilizada para irrigação, admitindo a não existência da vazão de afluência no reservatório, evaporação e infiltração é expressa por:

$$q_{100} = V/T_{100} \quad (4.2)$$

Onde V é o volume estimado ( $m^3$ );  $T_{100}$  é o número de segundos em 100 dias (segundos);  $q_{100}$  é a vazão do reservatório ao longo de 100 dias ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ). Quando se adiciona a vazão com garantia de ocorrência em 95% do tempo ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ). ( $Q_{95_{100 \text{ dias}}}$ ) obtém-se a disponibilidade hídrica inicial mínima do reservatório no período de 100 dias ( $D_{inicial}$ ):

$$D_{inicial} = q_{100} + Q_{95_{100 \text{ dias}}} \quad (4.3)$$

O cálculo da infiltração instantânea em um reservatório da BARSAM é descrito pela seguinte equação:

$$I_{inst} = \frac{\left( \frac{I_{med} \times \left( A \times \frac{10.000}{2} \right)}{1.000} \right)}{T_1} \quad (4.4)$$

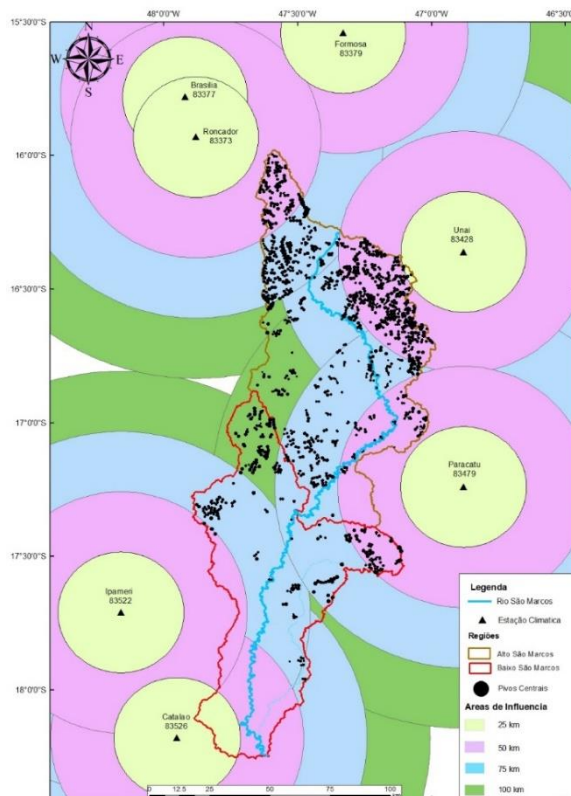
Onde  $I_{inst}$  = Infiltração instantânea ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $I_{med}$  = Infiltração média na BARSAM ( $31 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $A$  = área ( $ha$ ); e  $T_1$  = número de segundos em 1 dia (segundos). A área foi dividida por 2 para simular a forma trapezoidal dos reservatórios, em que a área do espelho d'água sempre é maior do que área do fundo do lago, onde ocorre a maior parte da infiltração de água.

A evapotranspiração média na BARSAM foi obtida a partir dos dados diários de evapotranspiração (1970-2016) de 8 estações climáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nas imediações da bacia. A **Tabela 4.2** lista as médias mensais para cada estação climática e a média mensal para toda a região.

**Tabela 4.2** – Dados médios de evapotranspiração (mm/dia) nas imediações da BARSAM, mês a mês, para o período de 1970 a 2016.

Mês	83526 - CATALÃO	83522 - IPAMERI	83377 - BRASILIA	83428 - UNAÍ	83379 - FORMOSA	83373 - RONCADOR	83479 - PARACATU	Média
Jan	4.6	4.6	4.5	5.2	4.5	4.6	5.1	4.7
Fev	4.4	4.6	4.4	5.1	4.5	4.6	4.9	4.6
Mar	4.0	4.2	4.1	4.6	4.2	4.2	4.5	4.3
Abr	3.5	3.6	3.6	4.2	3.7	3.9	3.9	3.8
Mai	3.0	3.1	3.1	4.0	3.2	3.6	3.4	3.3
Jun	2.8	3.3	2.8	4.1	2.9	3.4	3.3	3.2
Jul	3.0	3.9	3.0	4.9	3.2	3.6	3.6	3.6
Ago	3.8	5.0	3.6	5.8	4.0	4.5	4.7	4.5
Set	4.5	5.2	4.2	6.4	4.6	5.5	5.2	5.1
Out	4.7	5.2	4.4	6.0	4.7	5.6	5.4	5.2
Nov	4.7	4.9	4.4	5.2	4.4	4.7	5.0	4.8
Dez	4.4	4.6	4.4	5.1	4.5	4.5	4.9	4.6

Para obtenção dos valores de evapotranspiração mais representativos da área de estudo, considerou-se os posicionamentos geográficos de cada estação. Círculos de zonas tampão foram criados em volta de cada estação, nas distâncias de 25, 50, 75 e 100 km para facilitar a verificação de forma visual. As estações climáticas do INMET mais próximas das áreas com concentração de pivôs centrais da BARSAM são as seguintes: Ipameri, Unaí, Roncador e Paracatu (**Figura 4.2**). O cálculo da evapotranspiração pela média ponderada pelo número de dias irrigados mensalmente (21 de fevereiro – 1 de junho) foi 3,9 mm/dia (**Tabela 4.3**).



**Figura 4.3** – Distância das estações climáticas do INMET na BARSAM, com destaque para as áreas de maior concentração de pivôs centrais.

**Tabela 4.3** – Média ponderada pelo número de dias irrigados por mês, para cálculo da evapotranspiração média na BARSAM para o período de 100 dias irrigados entre 21 de fevereiro e 1º de junho.

Mês	Dias	83522 - IPAMERI	83428 - UNAÍ	83373 - RONCADOR	83479 - PARACATU
Fev	7	4,6 mm/dia	5,1 mm/dia	4,6 mm/dia	4,9 mm/dia
Mar	31	4,2 mm/dia	4,6 mm/dia	4,2 mm/dia	4,5 mm/dia
Abr	30	3,6 mm/dia	4,2 mm/dia	3,9 mm/dia	3,9 mm/dia
Mai	31	3,1 mm/dia	4,0 mm/dia	3,6 mm/dia	3,4 mm/dia
Jun	1	3,3 mm/dia	4,1 mm/dia	3,4 mm/dia	3,3 mm/dia
Méd. Pond.		<b>3,7 mm/dia</b>	<b>4,32 mm/dia</b>	<b>3,94 mm/dia</b>	<b>3,97 mm/dia</b>

O cálculo da evaporação instantânea de cada reservatório foi dado pela seguinte equação:

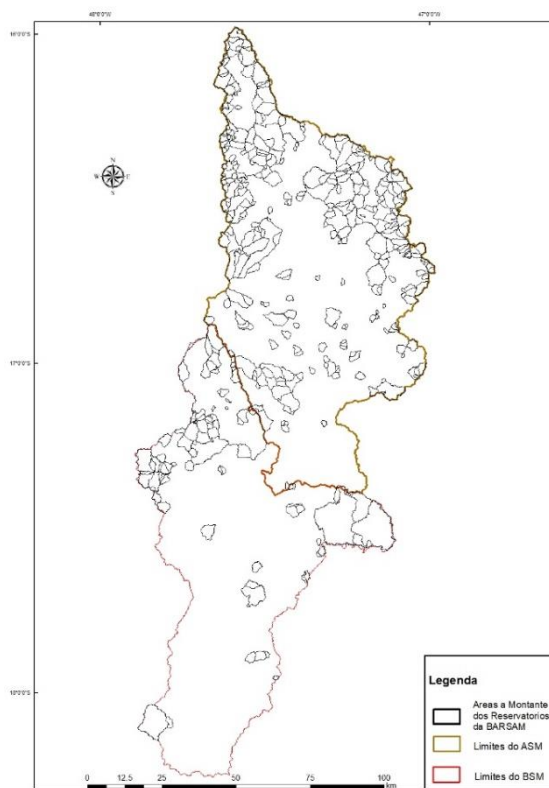
$$E_{inst} = \left( \frac{E_{100} \times A \times 10.000}{1.000} \right) / T_1 \quad (4.5)$$

Onde  $E_{inst}$  é a evaporação instantânea ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $E_{100}$  é a evapotranspiração média na bacia no período de 1000 dias ( $3,9 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $A$  é a área ( $ha$ ); e  $T_1$  é o número de segundos em 1 dia (segundos).

#### 4.3.4 – REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES E ELABORAÇÃO DO MAPA DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA

A área a montante de cada reservatório é uma informação essencial para relacionar o seu volume com a vazão de referência proveniente da curva de permanência da regionalização. A área a montante

a partir do ponto de barramento que forma o espelho d'água foi extraída dos dados SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) usando ferramentas do ArcGis (**Figura 4.3**).



**Figura 4.3** – Mapa das áreas a montante dos reservatórios da BARSAM.

O método de regionalização das vazões permitiu estimar o aporte de água para cada reservatório. No SIG, a tabela de atributos da camada de reservatórios foi criada com **264 campos** (colunas) usando um script na linguagem **Python**, referente a cada uma das 264 regionalizações criadas para as 22 referências de vazão da curva de permanência utilizadas nos 12 meses do ano. Um fragmento do script em Python utilizado para criar os 264 campos e os cálculos de disponibilidade hídrica está no **ANEXO I**, item **II**.

Como a simulação de irrigação foi feita para um período específico do ano (21/02 - 01/6), foram adicionados mais **22 campos** à tabela de atributos da BHO para a obtenção das médias das vazões referentes aos 22 parâmetros da curva de permanência utilizados. Como exemplo a equação 9 demonstra um cálculo das disponibilidades hídricas para o período de **100 dias** usando o parâmetro  $Q_5$  da curva de permanência.

$$Q_{5_{100 \text{ dias}}} = \frac{((Q_{5_{\text{Fev}}} * 7 \text{ dias}) + (Q_{5_{\text{Mar}}} * 31 \text{ dias}) + (Q_{5_{\text{Abr}}} * 30 \text{ dias}) + (Q_{5_{\text{Mai}}} * 31 \text{ dias}) + (Q_{5_{\text{Jun}}} * 1 \text{ dia}))}{T_{100}} \quad (4.6)$$



Onde  $Q_{5_{100 \text{ dias}}}$  é a disponibilidade hídrica com 5% de garantia de ocorrência para os 100 dias ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $Q$  é a vazão de referência à curva de permanência; e  $T_{100}$  é o número de dias em 100 dias.

Portanto, o mapa de disponibilidade hídrica foi feito usando as bases hidrológicas otocodificada (BHO) da Agência Nacional de Águas (ANA), que adota os sistemas de codificação de bacias hidrográficas propostas por Pfafstetter (Teixeira et al., 2007). Um trecho da BHO é a feição da hidrografia situada entre duas confluências, existindo em cada trecho uma ottobacia na cardinalidade de 1 para 1 (1:1). A **Figura 4.4** apresenta os mapas de disponibilidade hídrica para as vazões máximas, médias e mínimas nos meses em que ocorre o plantio da safra de inverno na BARSAM.

#### 4.3.5 - BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico foi feito utilizando a ferramenta BALANÇO HIDRICO que se acopla como um plug-in no SIG livre de código aberto OpenJUMP, sendo desenvolvida pela Coordenação de Estudos Hidrológicos (COHID) da SPR/ANA. O balanço hídrico entre demanda e disponibilidade hídrica adota as ottobacias do rio, o que implica que cada ottobacia corresponde uma única vazão de referência.

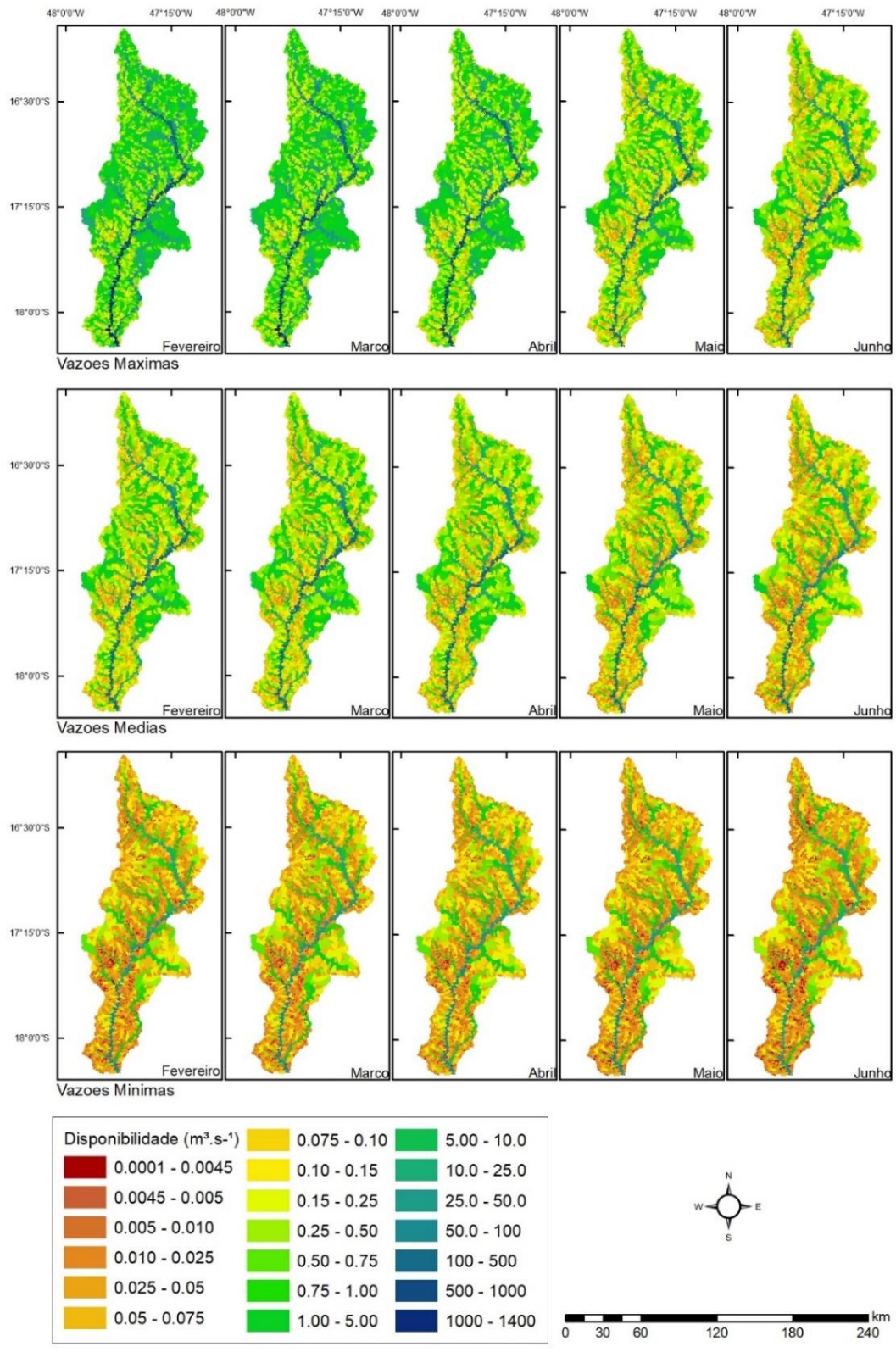
Como dado de entrada de disponibilidade hídrica na ferramenta foi utilizada a camada de ottobacias (BHO). Foi criado o campo “Disponibilidade Hídrica” na tabela de atributos da camada BHO, para o qual foi atribuída a vazão de referência  $Q_{95_{100 \text{ dias}}}$ , correspondente à vazão com 95% de garantia para o período analisado de 100 dias. Porém, se sobre a ottobacia existisse o ponto de barramento formador de um reservatório, o campo “Disponibilidade Hídrica” dessa ottobacia recebia o valor de vazão de referência correspondente a vazão de referência do respectivo reservatório. No caso da ottobacia conter mais de um reservatório, para o campo “Disponibilidade Hídrica” foi atribuída a vazão de referência correspondente ao maior volume de água.

Por outro lado, como entrada de demanda hídrica foi utilizada a camada dos pivôs centrais existentes em setembro de 2016 (PCEs). Foi criado o campo “Demanda de Irrigação” na tabela de atributos dessa camada, e a ela atribuída o valor de demanda conforme a equação:

$$D_{\text{total}} = \frac{(A \times D_{\text{unitaria}})}{1.000} \quad (4.7)$$

Onde  $D_{\text{total}}$  = Demanda Total do pivô ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $D_{\text{unitaria}}$  = Demanda Unitaria do pivô ( $L \cdot ha^{-1}$ );  $A$  = área ( $ha$ );

O balanço hídrico calculado foi do tipo “distribuído, onde os cálculos são feitos de montante para jusante. São consideradas as demandas associadas à ottobacia e a disponibilidade hídrica adotada corresponde as vazões remanescentes dos dois trechos imediatamente a montante, somada a vazão incremental do trecho.



**Figura 4.4** – Disponibilidade hídrica entre os meses de fevereiro a junho, quando ocorre a safra de inverno na BARSAM: vazões máximas, médias e mínimas históricas para o período em questão.

Se a disponibilidade hídrica da ottobacia for menor do que a demanda hídrica incidente sobre si, o(s) pivô(s) central(ais) que capta(m) água nessa ottobacia terá(ão) sua(s) necessidade(s) hídrica(s) parcialmente atendida(s), resultando em valores de atendimento menores que 100% e maiores ou iguais a 0%. Por outro lado, não haverá vazão remanescente nessa ottobacia, o que significa que a vazão de água que ela passará para a ottobacia imediatamente a jusante será igual a 0 (zero).

#### 4.3.6. EFEITOS SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA NA UHE BATALHA

Para se avaliar os efeitos da irrigação concomitante de milho por todos os PCEs sobre a geração de energia pela UHE Batalha, foi feita um balanço hídrico. Nesse balanço hídrico boa parte da demanda hídrica do milho será abastecida por reservatórios já existentes na bacia. A forma como esses reservatórios atuam no aumento da disponibilidade hídrica é objeto de proposta de cálculo mais adiante.

Assim, o efeito da demanda hídrica do milho sendo plantado ao mesmo tempo por todos os PCEs durante a safra de inverno, somada a parte da água retida em reservatórios, foi modelada de forma a se sobrepor ao período crítico do sistema elétrico brasileiro (junho de 1949 a novembro de 1956). Dessa forma buscou-se avaliar os efeitos desse cenário de irrigação sobre a geração de energia da UHE Batalha.

### 4.4 RESULTADOS

#### 4.4.1 – RESULTADO DA ESTIMATIVA DE VOLUMES DOS RESERVATÓRIOS

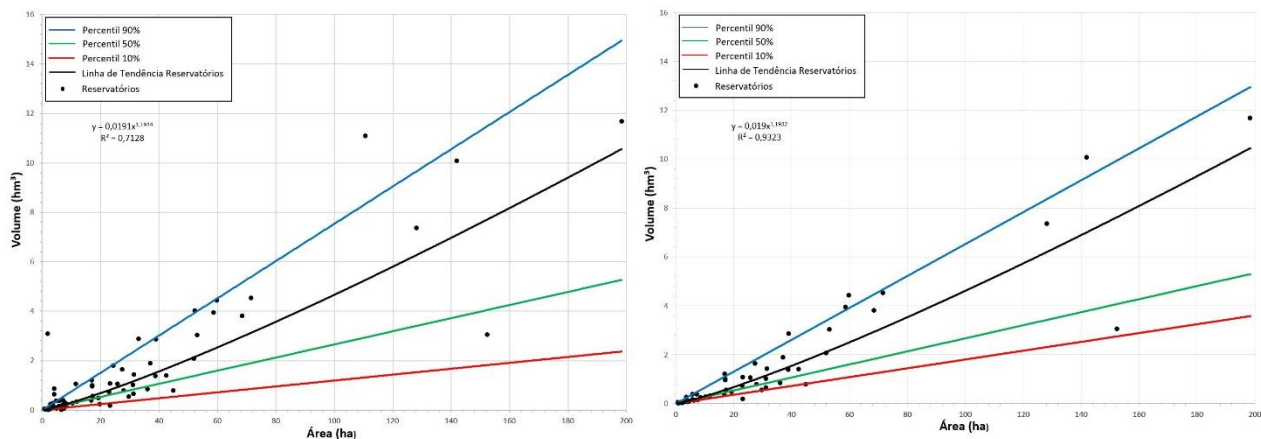
A **Figura 4.5** demonstra as duas regressões lineares entre área e volume dos reservatórios conhecidos, considerando todos os dados e com a retirada dos outliers (> 90% e <10% percentis). A regressão sem outliers retirou 18 reservatórios (oito com valor > percentil 90%; e dez com < percentil 10%) e apresenta a seguinte equação:

$$V = 0,019 \times A^{1,1932}; \quad R^2 = 0,9323 \quad (4.8)$$

Onde “V” é o volume (hm<sup>3</sup>) (V) e “A” é a área do espelho d’água (ha) (A) dos reservatórios.

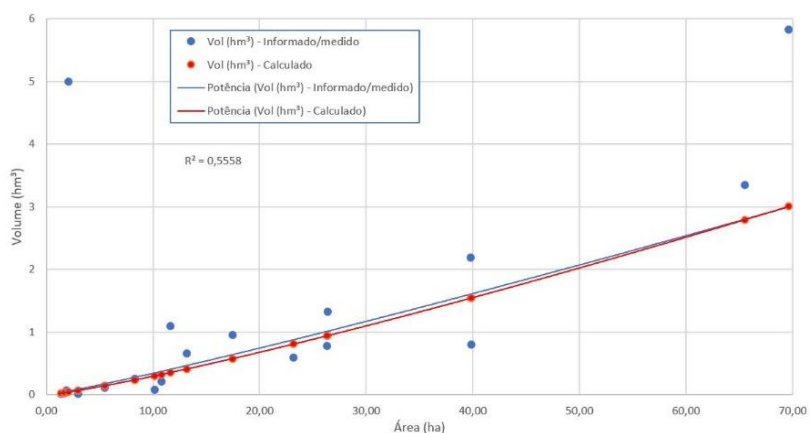
a

b



**Figura 4.5** - Regressão linear entre área e volume dos reservatórios com dados de volume conhecidos: (a) considerando todos os dados; e (b) retirando os outliers (> 90% e < 10 % percentis).

A **Figura 4.6** demonstra o resultado da contraprova feita com **20** reservatórios selecionados aleatoriamente. Desse grupo de 20 reservatórios, sete correspondem a reservatórios com volumes medidos por batimetria na bacia do rio Preto, e 13 a reservatórios com volumes informados por usuários e constantes no relatório de segurança de barragens da ANA. Pode-se verificar que a linha de tendência potencial dos dados informados ou medidos fica bem próxima da linha de tendência potencial dos volumes calculados por meio da equação 4.8, embora o **R²** tenha sido de **0,55** e a correlação entre os dados de volume medidos/informados tenha sido de **0,67** com os dados de volume calculados.



**Figura 4.6** – Relação entre os dados de volume calculados e os dados de volume medidos/informados dos 20 reservatórios retirados da regressão linear para servirem como contraprova.

Os volumes estimados para os **354 reservatórios** tiveram **correlação de 0,90** com os **97** reservatórios de volumes conhecidos. A diferença entre os dois conjuntos de dados de volume foi de **7,0 hm³** a mais para os reservatórios com volumes conhecidos, mostrando uma tendência a subdimensionamento da equação utilizada. No total, o volume estimado dos 354 reservatórios foi de **250 hm³** ou **25 bilhões** de litros de água de disponibilidade hídrica armazenada de forma artificial na

bacia, que aproximadamente permitiria irrigar **5.350 ha** de plantio de milho durante toda uma única safra de inverno, mesmo que não houvesse outras entradas de água no sistema.

Deve-se salientar que como o universo de reservatórios de volumes conhecidos tem no máximo 198 ha, qualquer reservatório com área superior poderá ter o seu volume superestimado com o uso da **equação 4.8**. Um exemplo disso é a aplicação dessa formulação para se estimar os volumes dos dois grandes reservatórios das hidrelétricas na BARSAM, Serra do Facão e Batalha (18.944 ha e 9,374 ha, respectivamente), cujas somas dos volumes estimados foi de **4.500 hm<sup>3</sup>**, o que é 95% maior do que a soma dos volumes conhecidos desses reservatórios (**2.301 hm<sup>3</sup>**).

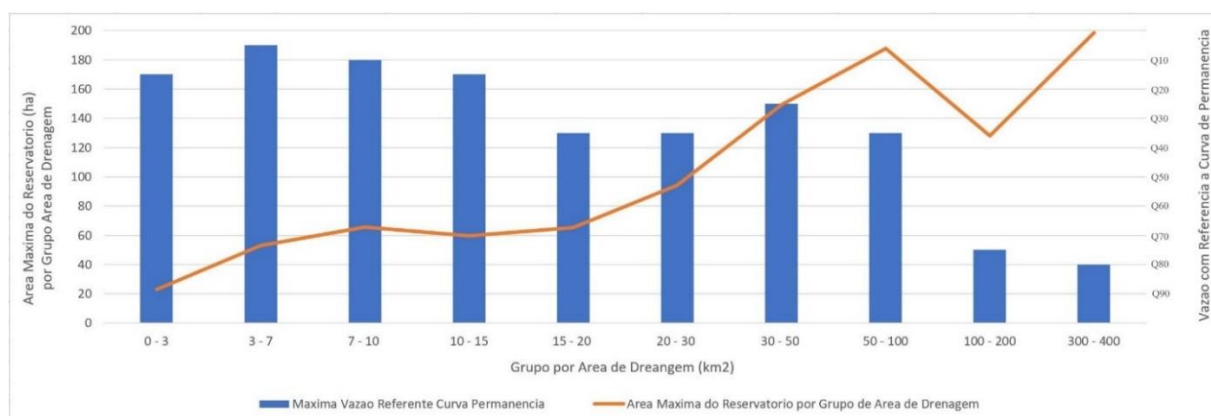
#### 4.4.2 – RESULTADOS DOS EFEITOS DOS RESERVATÓRIOS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

Os resultados da sobreposição da camada dos polígonos dos reservatórios e a camada das ottobacias em ambiente SIG possibilitou traçar as relações entre os seguintes fatores: (a) áreas de drenagem a montante, (b) capacidades de disponibilização de água equivalentes às vazões de referência do trecho do barramento, e (c) área dos espelhos d’água. Na **Tabela 4.4**, a coluna **Disponibilidade Hídrica Média em Relação à Curva Permanência** demonstra a média em que os reservatórios, separados por grupos de área a montante, conseguem atingir como disponibilidade hídrica para o período de 100 dias dessa análise. A coluna **Máximo Aumento na Disponibilidade Hídrica sobre a Vazão de Referência** demonstra a máxima disponibilidade hídrica que um reservatório existente na BARSAM conseguiu atingir dentro de seu grupo de área a montante, para os 100 dias desta análise. As colunas de **Área Média do Espelho (ha)** e **Área Máxima do Espelho (ha)** trazem as informações de área média e de área máxima de espelho de reservatório por grupos de área de drenagem a montante.

**Tabela 4.3** – Áreas médias e máximas de espelhos d’água e influências médias e máximas dos reservatórios, por grupos de áreas a montante, relacionadas às vazões dos trechos onde se encontram os seus barramentos, referenciadas à curva de permanência.

Área a Montante (km <sup>2</sup> )	Disponibilidade Hídrica Média em Relação à Curva de Permanência	Área Média do Espelho (ha)	Máximo Aumento na Disponibilidade Hídrica em Relação à Curva de Permanência	Área Máxima do Espelho (ha)
0 - 3	Q90	3.13	Q 15	23,02
3 - 7	Q 85	8.04	Q 5	53,13
7 - 10	Q 80	12.70	Q 10	65,44
10 - 15	Q 85	13.98	Q 15	59.81
15 - 20	Q 90	8.93	Q 35	65.30
20 - 30	Q 85	20.11	Q 35	94.18
30 - 50	Q 85	31.07	Q 25	149.43
50 - 100	Q 85	33.65	Q 35	187.56
100 - 200	Q 90	30.87	Q 75	128.12
300 - 520	Q 90	75.32	Q 75	198,38

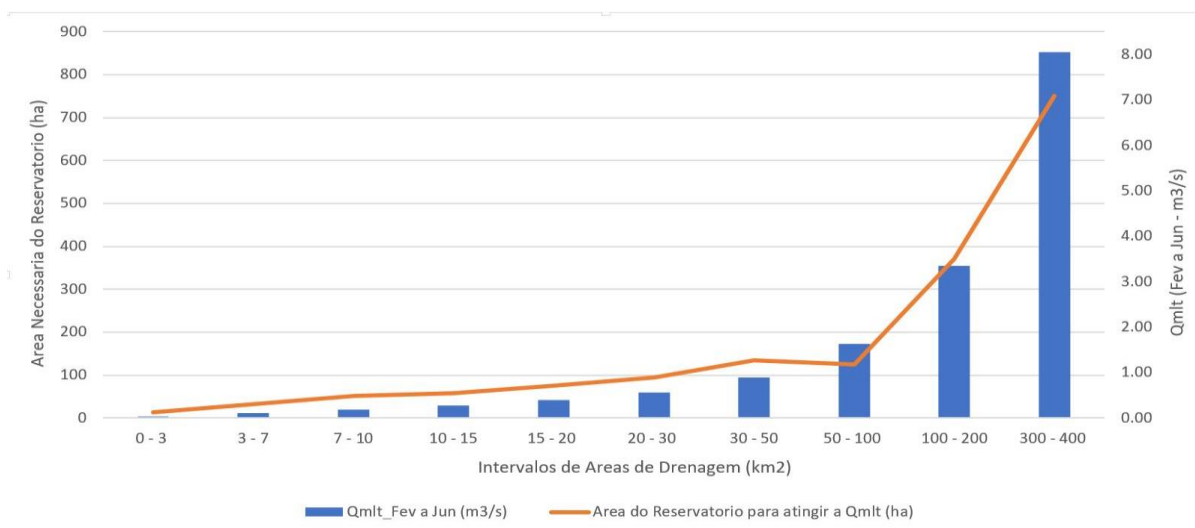
A **Figura 4.7** ilustra a relação entre a área do maior espelho d'água, por grupo de área de drenagem (**Tabela 4.3**), com as vazões que esses reservatórios conseguem disponibilizar com referência à curva de permanência. Pode-se verificar que quanto maior a área de drenagem a montante de um reservatório, maior precisa ser a sua área de espelho d'água para poder exercer alguma influência na disponibilidade hídrica, com referência à curva de permanência. A **Tabela 4.4** e a **Figura 4.8** exemplificam a relação entre “área do espelho d'água” x “regularização da Qmlt” x “área a montante do reservatório”.



**Figura 4.7** – Relações entre os maiores espelhos d'água da BARSAM por grupo de áreas de drenagem a montante e as respectivas correspondências às vazões de curva de permanência

**Tabela 4.4** – Tabela exemplificativa da área necessária do espelho d'água de um reservatório para conseguir regularizar a Qmlt relativa ao trecho onde esteja situado o seu barramento.

Área a montante (km²)	Qmlt_Fev a Jun (m³/s)	Área do reservatório para atingir a Qmlt (ha)	Volume (hm³)	Q95 (m³/s)	Evaporação média (m³/s)	Infiltração média (m³/s)	Vazão Disponível (100 dias - m³/s)
0 - 3	0.04	14	0.4519	0.02	0.0062	0.0251	0.0360
3 - 7	0.10	32	1.2234	0.03	0.0141	0.0574	0.1001
7 - 10	0.19	52	2.1958	0.06	0.0229	0.0933	0.1980
10 - 15	0.28	58	2.5046	0.12	0.0255	0.1041	0.2803
15 - 20	0.39	75	3.4137	0.17	0.0330	0.1345	0.3976
20 - 30	0.56	95	4.5386	0.25	0.0418	0.1704	0.5631
30 - 50	0.89	135	6.9308	0.39	0.0594	0.2422	0.8906
50 - 100	1.63	125	6.3171	0.71	0.0550	0.2242	1.1619
100 - 200	3.35	371	23.4282	1.47	0.1632	0.6656	3.3529
300 - 400	8.05	750	54.7056	3.39	0.3299	1.3455	8.0463

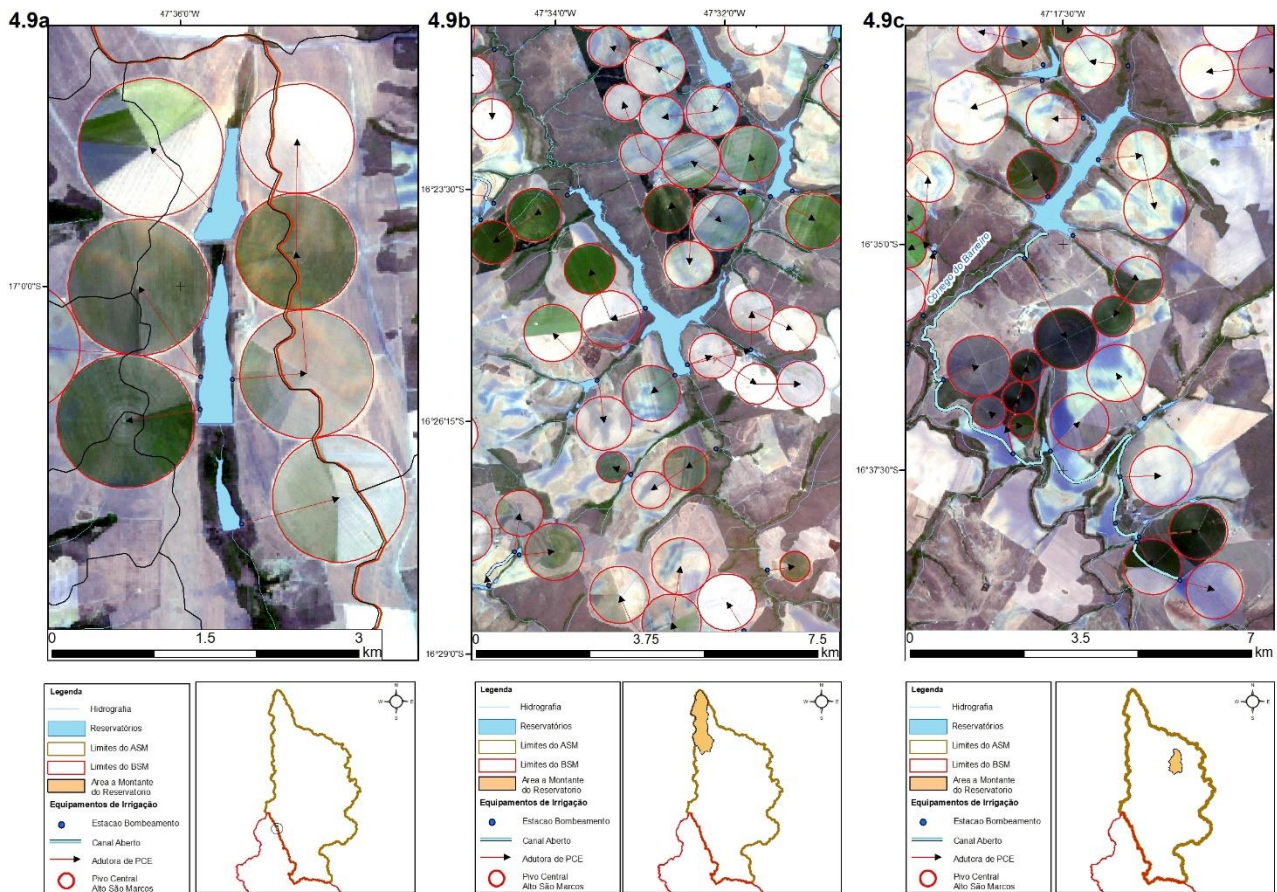


**Figura 4.8** – Áreas de espelhos d’água de reservatórios, por grupos de área de drenagem a montante, necessárias para se atingir a disponibilidade hídrica referente a Qmlt no trecho de curso d’água do barramento.

A **Figura 4.9** demonstra três dos maiores reservatórios de irrigação encontrados na BARSAM, contendo nos detalhes das figuras as áreas de drenagem de cada um deles. A **Tabela 4.5** lista as relações desses reservatórios entre as áreas de espelho d’água e as áreas de drenagem a montante e a capacidade de disponibilidade hídrica na vazão de referência do local onde se encontram.

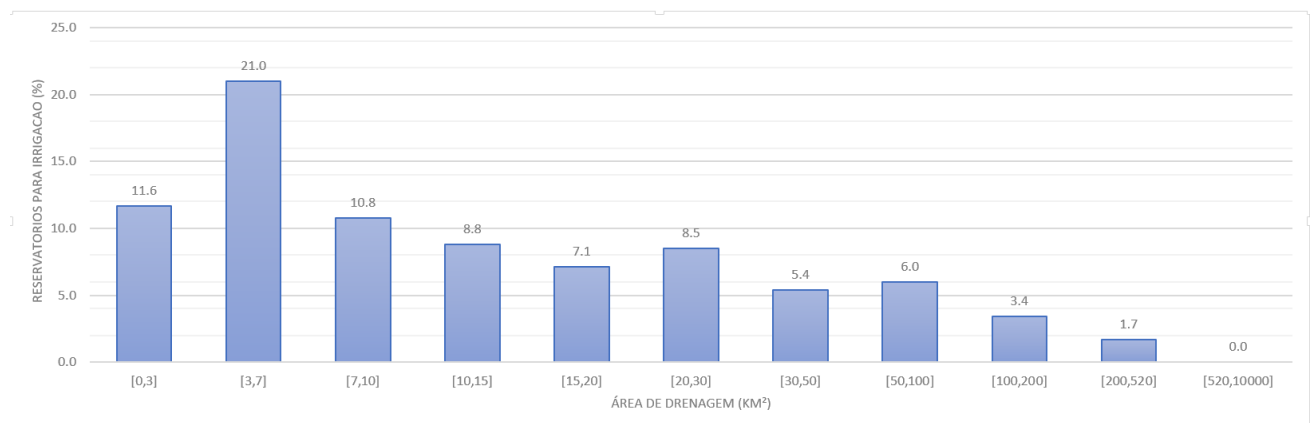
**Tabela 4.5** – relações dos reservatórios da **Figura 4.8** entre as áreas de espelho d’água x áreas de drenagem a montante x capacidades de disponibilizar água com referência ao local na bacia onde se encontram.

Figura	Área do Espelho (ha)	Área a Montante (km <sup>2</sup> )	Volume Estimado (hm <sup>3</sup> )	Disponibilidade Hídrica em Relação a Vazão de Referência	Vazão Instantânea Equivalente a Vazão de Referência	Área Irrigada (ha)
<b>20 a</b>	33	5	0,14	Q30	0,65 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	710
<b>20 b</b>	152	519	8,44	Q90	6,04 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	854
<b>20 c</b>	103	147	5,25	Q85	1,72 m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	364



**Figura 4.9** - Sistema de reservatórios no córrego Vereda Grande (a); reservatório no córrego Vereda Buritizinho (b); Sistema de canais interligando reservatórios no Córrego do Barreiro (c) – Imagens Sentinel – setembro de 2016.

A **Figura 4.10** demonstra a ocorrência de reservatórios para irrigação pelos principais grupos de áreas de drenagem a montante. Pode-se verificar que a presença de reservatórios predomina nas regiões mais altas na bacia, de pequenas áreas de contribuição de drenagem e, conseqüentemente, com menores volumes nos corpos hídricos.



**Figura 4.10** – Frequência de ocorrência de reservatório por grupos de área de drenagem a montante do local de barramento do reservatório.



A **Tabela 4.6** demonstra o caso de 19 reservatórios cujos volumes estimados, quando relacionados às respectivas áreas de drenagem a montante, propiciam uma determinada capacidade de armazenamento e determinado volume de afluência mínimo no reservatório que são superados pela soma da média de infiltração com a média da evaporação. Portanto, tais reservatórios possivelmente exerce um efeito negativo sobre a disponibilidade hídrica no local onde se encontram.

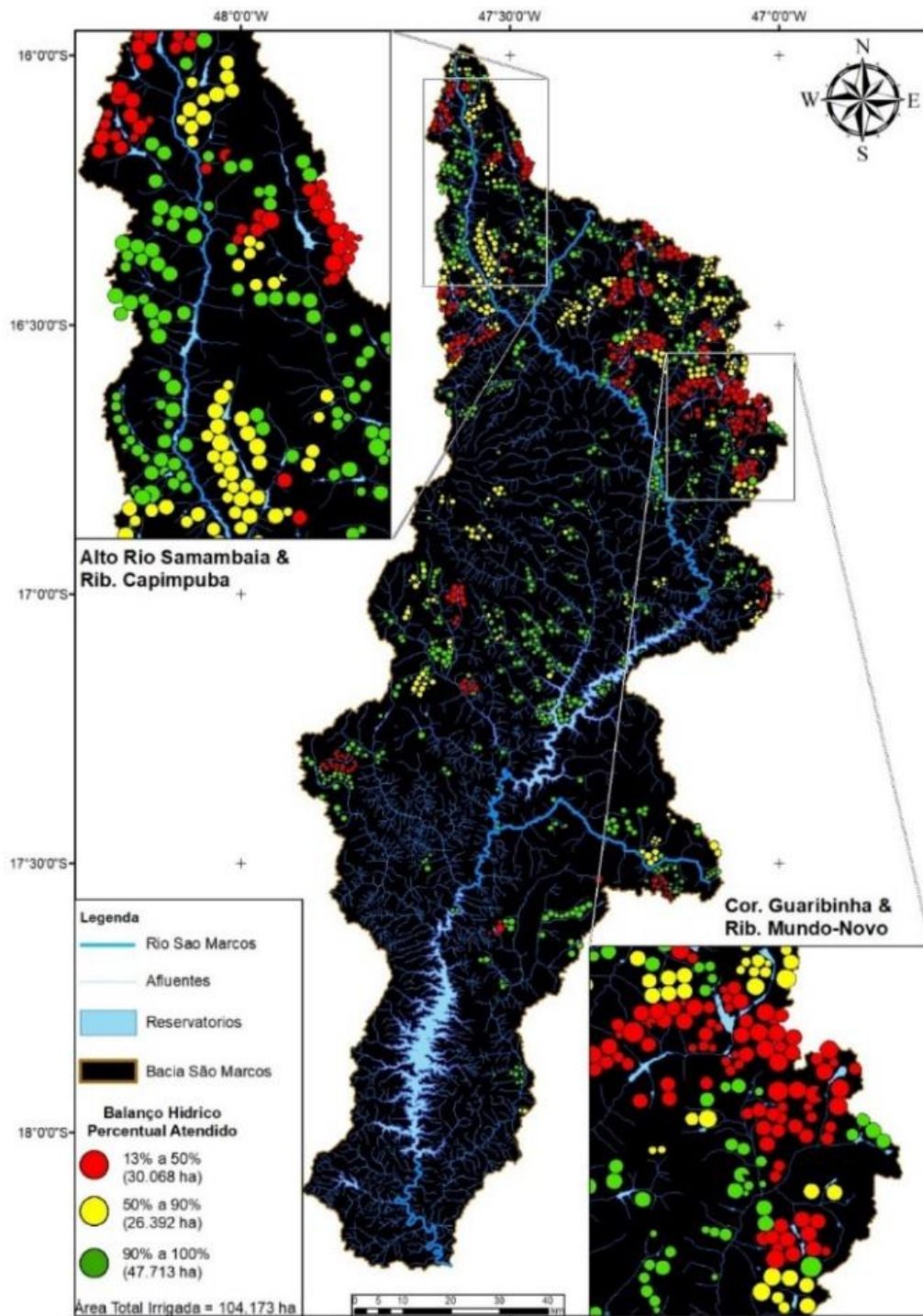
**Tabela 4.6** – Características de áreas a montante e de tamanho de espelho d'água dos 19 reservatórios cuja disponibilidade hídrica somada a Q95 no período de análise é menor do que as perdas por evapotranspiração e infiltração.

	Área a Montante	Área do Espelho
Mínima	1,3 km <sup>2</sup>	0.01 ha
Média	52 km <sup>2</sup>	0.3 ha
Máxima	178 km <sup>2</sup>	2,54 ha

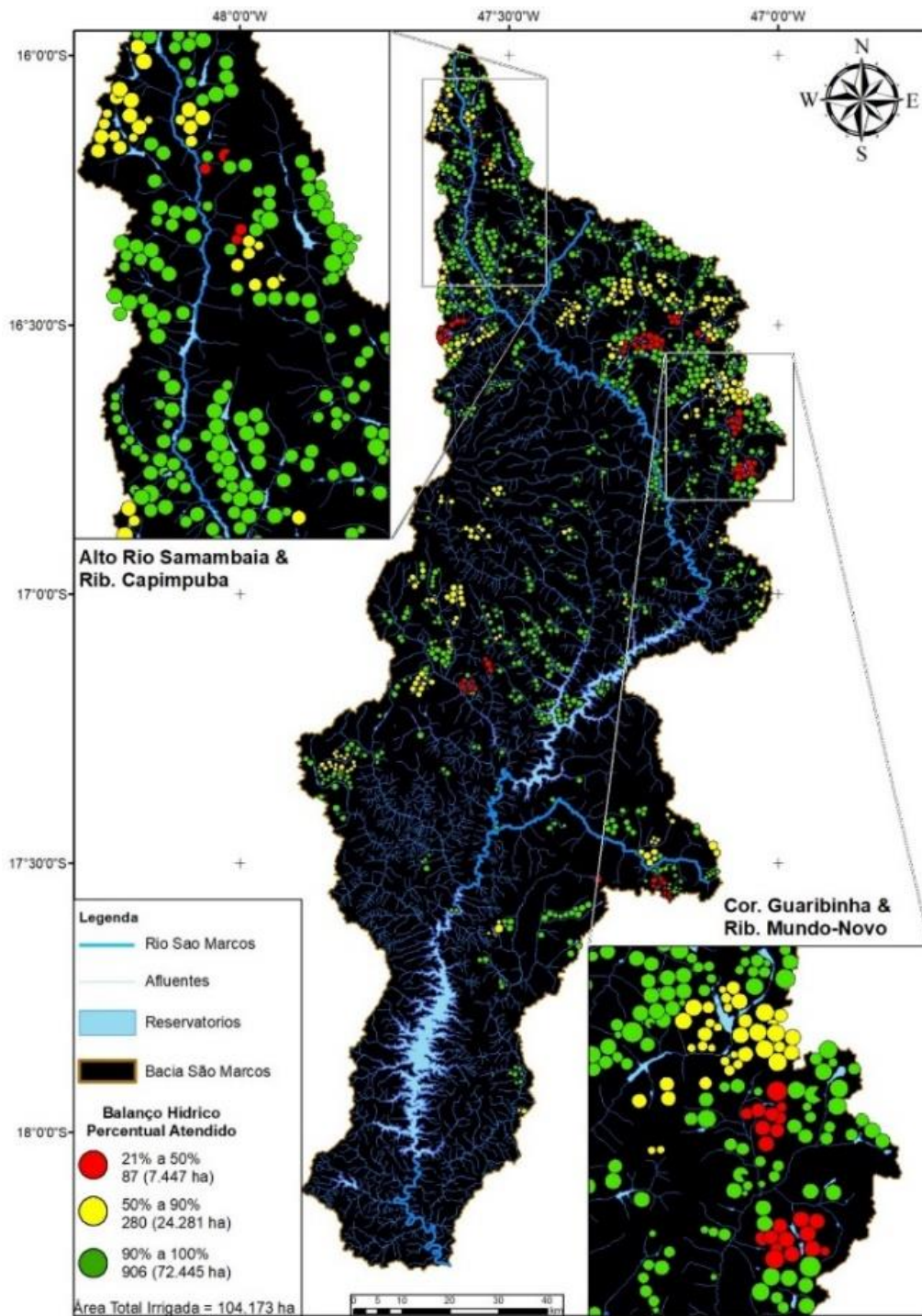
#### 4.4.3 – RESULTADOS DO BALANÇO HÍDRICO

A **Figura 4.11** demonstra o balanço hídrico feito apenas com a vazão de referência Q95<sub>100 dias</sub> como disponibilidade hídrica para os PCEs, sem considerar a influência dos reservatórios no aumento da oferta de água. A **Figura 4.12** demonstra o balanço hídrico, que é o resultado entre a demanda necessária para se cultivar milho em todos os pivôs da BARSAM na safra de inverno, e a oferta de água mínima garantida em 95% do tempo somada com os volumes estimados dos reservatórios distribuídos ao longo de 100 dias, que é o período em que o milho seria irrigado.

As **Figuras 4.11** e **4.12** proporcionam uma comparação entre o balanço hídrico feito apenas com a Q95<sub>100 dias</sub> como disponibilidade hídrica para o milho e esse somada à disponibilidade hídrica proporcionada pelos reservatórios. Verifica-se que a utilização de vazão mínima de referência com garantia de 95% do tempo em 100 dias (**Figura 4.11**) gera um déficit na irrigação no qual a maioria dos pivôs tem um percentual de atendimento da necessidade hídrica do milho abaixo de 90%, sendo a maior parte dessa parcela abaixo de 50%. Por outro lado, a **Figura 4.12** demonstra que a inclusão do efeito dos reservatórios na disponibilidade hídrica para cálculo do balanço hídrico aproxima-se do real efeito dos reservatórios na disponibilidade hídrica da bacia. Isso porque se por um lado, mesmo adicionando a disponibilidade hídrica promovida pelos reservatórios, ainda se tem 7.447 ha com déficit hídrico de até 50%, e 24.281 ha com déficit hídrico entre 50% e 10%, ainda sim se teve 72.445 ha com demanda 100% atendida, considerando que se trata de uma situação irreal, extrema, de plantio concomitante de milho por todos os irrigantes da bacia. Na realidade, a irrigação ocorre em uma miscelânea de culturas com necessidades hídricas inferiores às do milho, como soja, feijão e café dentre outras, sendo que também é comum os irrigantes deixarem alguns de seus pivôs simplesmente desligados nessa época do ano.



**Figura 4.11** – Balço hídrico utilizando como disponibilidade hídrica a  $Q_{95,100}$  dias para os PCEs, ignorando-se a existêcia dos reservat3rios, e demanda simulando a irriga33o do milho concomitante por todos os piv3s para safra de inverno.



**Figura 4.12** – Resultado do balanço hídrico considerando a influência dos reservatórios, calculado por meio da equação 4.1. Em vermelho os pivôs com 21% a 50%, em amarelo os pivôs com 50% a 90%, e em verde os pivôs com 90% a 100% de suas demandas atendidas.

#### 4.4.4 – EFEITOS SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA NA UHE BATALHA

A UHE Batalha começou a operar em janeiro de 2013 com potência instalada de 52,5 MW (Silva & Hora, 2015), com geração de energia firme de **34 MW/hora**. Se o cenário mostrado na **Figura 4.11** se tornasse realidade e acontecesse a irrigação do milho concomitante em 47.713 ha de PCEs plenamente atendidos por água na safra de inverno, a UHE Batalha teria uma geração de **32,7**

**MW/hora** de energia firme. Por outro lado, caso o cenário mostrado na **Figura 4.12** se tornasse realidade e acontecesse a irrigação do milho concomitante em 72.445 ha de PCEs plenamente atendidos por água na safra de inverno, a UHE Batalha teria uma geração de **31,5 MW/hora** de energia firme. Ambos os valores de energia firme aqui apresentados são resultantes da sobreposição da demanda de irrigação do milho durante a safra de inverno sobre o período crítico do sistema elétrico brasileiro (junho de 1949 a novembro de 1956).

#### 4.5 CONCLUSÃO

Dados de capacidade de regularização de pequenos reservatórios são escassos na literatura científica. Consequentemente foi necessário um teste da influência dos reservatórios sobre a disponibilidade hídrica na BARSAM, no qual foi feito o balanço hídrico na bacia supondo-se uma situação extrema de irrigação simultânea, durante 100 dias no período da safra de inverno, por todos os 1.273 pivôs centrais cultivados com uma cultura altamente demandante de água que é o milho. A principal conclusão que se pode tirar deste trabalho é a de que as duas características fundamentais que definem a capacidade de regularização dos reservatórios são: a afluência que chega ao reservatório e seu tamanho. A primeira é uma característica diretamente relacionada a área de drenagem a montante do reservatório, e a segunda é uma característica diretamente relacionada a sua capacidade de armazenamento. Em outras palavras, o que define se um reservatório é capaz de regularizar um maior ou menor valor referenciado à curva de permanência depende da vazão que chega até ele (ou vazão de entrada no reservatório, que por sua vez depende da quantidade de chuva que precipita, do uso do solo e dos tipos de solos da área de drenagem a montante), e do volume armazenado (relacionado à área do espelho e da forma e profundidade do fundo do reservatório).

Embora quase 30% da área irrigada por PCEs (**31.206 ha**) estejam localizados em regiões com áreas de drenagem com mais de 100 km<sup>2</sup>, quase 80% dos reservatórios possuem área de drenagem a montante menor do que 100 km<sup>2</sup>. Ou seja, a partir de determinada altura em uma bacia hidrográfica o volume de água nos corpos hídricos se torna cada vez mais capaz de abastecer sistemas de irrigação, o que determina que a importância da presença dos reservatórios, para fins de irrigação, é inversamente proporcional ao tamanho da área de drenagem a montante do local onde é construído o seu barramento.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ANA. **Resolução nº 562. Estabelece o marco regulatório do uso da água na bacia do São Marcos/ Brasília: ANA, 25 de outubro de 2010.**

ANA. **Plano de recursos hídricos e do enquadramento dos corpos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do rio Paranaíba / Agência Nacional de Águas. 312 p. Brasília: ANA, 2013.**

ANA. **Relatório de segurança de barragens 2016 / Agência Nacional de Águas. 225 p. Brasília: ANA, 2017.**

BERBEMEIER, W.; MEISTER, J.; ROHANA, C.; MIDDELHAUFE, I.; SCHUTT, B. Tank cascade systems as a sustainable measure of watershed management in south Asia. **Water**. v.9 (3), 2017.

CALLOW, J; SMETTEM, K. The effect of farm dams and constructed banks on hydrologic connectivity and runoff estimation in agricultural landscapes. **Environmental Modelling & Software**, v.24, p. 959-968, 2009.

COLLISCHONN, B.; de PAIVA, R.C.D.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F.S.C.; SCHETTINI, E.B.C.; FAN, F.M. Modelagem Hidrológica de uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, V.16, n.4, p.119-133, Out/Dez, 2011.

GOLDENFUM, J. Pequenas bacias hidrológicas: Conceitos básicos. In: de PAIVA, J; de PAIVA, E. (Editores). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. (p.125 – 168), UFSM/ABRH, Porto Alegre, 2001.

GONÇALVES, R. G.; PALMA, A. R. T.; MOTTA, P. C.; BAR, M. E.; CUBA, C. A. C. Arthropods associated with the crown of *Mauritia flexuosa* (Arecaceae) palm trees in three different environments from Brazilian Cerrado. **Neotropical Entomology**. v.35, 2006.

HESSARI, B.; BRUGGEMAN, A.; AKHOOND-ALI, A.; OWEIS, T.; ABBASI, F. Supplemental irrigation potential and impact on downstream flow of Karkheh river basin in Iran. **Hydrology and earth System Sciences**. V.20, p.1903-1910, 2016.

IBGE. **Manual Técnico de Geomorfologia / Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. Ed.. 182 p. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.**

LANNA, A. Províncias hidrológicas e bacias representativas. In: **V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos**, Blumenau, Anais... Florianópolis: ABRH, 1983.

LIMA, J.; SANO, E. ; SILVA, E.; & LOPES, S. Levantamento da área irrigada por pivô-central no cerrado por meio da análise de imagens de satélite: uma contribuição para a gestão dos recursos hídricos. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Anais... São Paulo, ABRH, 2007.

NATHAN, R.; LOWE,L. The hydrologic impacts of farm dams. **Australian Journal of Water Resources**. V.16, n.1, 2012.

NGIGI, S.; What is the limit of up-scaling rainwater harvesting in a river basin. **Physics and Chemistry of the earth**. v.28, n.20-27, p.943-956, 2003.

- NGUYEN,H.; RECKNAGEL, F.; MEYER, W.; FRIZENSCHAF, J. Analysing the effects of forest cover and irrigation farm dams on streamflows of water-scarce catchments in South Australia through the SWAT model. **Water**. v.9, n.33, 2017.
- OLIVEIRA, L.; da SILVA, M.; Regionalização da lamina suplementar de irrigação e época de semeadura do milho no estado de Goiás e Distrito Federal. **Bioscience Journal**. v. 25, n. 4, p. 43-52, 2009.
- 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, p.57-73, 2006.
- PFISTER, S.; BAYER, P.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Environmental impacts of water use in global crop production: hotspots and trade-offs with land use. **Environmental Science and Technology**, v. 45, p. 5761-5768, 2011.
- PISANIELLO, J.D.; TINGEY-HOLYOAK, J.L. Water Storage Equity and Safety Assurance Policy to Mitigate Potential ‘Dual-Extreme Cumulative Threats’ in Agricultural Catchments. **Journal of Hydrology**, 545, 55-71, 2017.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.; Água e sustentabilidade no sistema solo-planta-atmosfera. Barueri, SP : Manole, 2016.
- ROBAINA, A.; PEITER, M.; PARIZI, A.; SOARES, F.; GOMES, A. Modelagem do volume de reservatórios para fins de outorga e planejamento agrícola. **Ciência Rural**. v.39, n.9, p.2482-2487, 2009.
- RODRIGUES, L.; SANO, E; de AZEVEDO, J. A.; da SILVA, E. M. Distribuição espacial e área máxima do espelho d’água de pequenas barragens de terra na bacia do rio Preto. **Espaço & Geografia**, v.10, p. 379-400, 2007.
- RODRIGUES, L.; DEKKER, T. Avaliação da taxa de infiltração em pequenas barragens. **ITEM Irrigação e Tecnologia Moderna**, v.80, p.57-61, 2008.
- RODRIGUES, L.; SANO, E; STEENHUIS, T.; PASSO, D. Estimation of small reservoir storage capacities with remote sensing in the Brazilian savannah region. **Water Resource Management**, v.26, p.873-882, 2012.
- RODRIGUES, L.; LIEBE, J. Small reservoirs depth-area-volume relationships in savannah regions of Brazil and Ghana. **Water Resources and Irrigation Management**. v.2, n.1, p.1-10, 2013.
- SAKTHIVADIVEL, R.; FERNANDO, N.; BREWER, J. Rehabilitation planning for small tanks in cascades: a methodology based on rapid assessment. **International Water Management Institute Reserch Report 13**. Colombo, Sri Lanka, 2002.
- SANO, E.; LIMA, J.; SILVA, E.; OLIVEIRA, E.. Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no Distrito Federal entre 1992 e 2002. **Engenharia Agrícola**. v.25, n.2, p.508-515, 2005

SILVA, L.; HORA, M. Conflito pelo uso da água na bacia hidrográfica do rio são marcos: estudo de caso da UHE Batalha. **Engevista**, v. 17, n. 2, p. 166-174, 2015.

TEIXEIRA, A.; PRADO, A.; SILVA, M.; WARREN, M.; HAUSCHILD, R.; SOUSA, F.; NETO, V.; Topologia hídrica: uma proposta para gestão de recursos hídricos utilizando sistema de informações geográficas. In: **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 2007.

TUBELIS, D. P. Veredas and their use by birds in the Cerrado, South America: a review. **Biota Neotropical**. v.9, n.3, 2009.

TUCCI, C.E.M. **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: Ed. Universidade UFRGS, 2002.

VAN METER, K.; STEIFF, M.; McLAUGHLIN, D.; BASU, N. The socioecohydrology of rainwater harvesting in India: understanding water storage and release dynamics across spatial scales. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.20, p.2629-2647, 2016.

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

## **CAPÍTULO 5**

### **GEOPROCESSAMENTO APLICADO NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS ADEQUADAS À INSTALAÇÃO DE PIVÔS CENTRAIS NA BACIA DO RIO SÃO MARCOS**

#### **5.1 INTRODUÇÃO**

Diante da importância da irrigação para o aumento da produtividade agrícola, a identificação de áreas adequadas para implantação dos sistemas de irrigação é uma informação estratégica para o gerenciamento de bacias hidrográficas. Nesse contexto, a utilização dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na agricultura torna-se uma ferramenta importante no monitoramento e na gestão territorial, permitindo analisar diferentes escalas de mapeamento (Santos et al., 2013), criar de forma prática e menos onerosa bancos de dados e documentos cartográficos (Carvalho et al., 2005), modelar a ocupação territorial e a utilização dos recursos hídricos (Bielenki & Barbassa 2012). Portanto, técnicas de geoprocessamento produzem informações valiosas para a análise espacial, principalmente em bacias com elevado grau de demanda pelos recursos naturais (Hoces et al., 2012). Brunckhost & Bias (2014) estabeleceram áreas aptas à irrigação na bacia do São Marcos utilizando técnicas de geoprocessamento, cruzando planos de informação tais como mapa de declividade, mapa de distância dos corpos hídricos e mapa de cobertura e uso do solo.

A agricultura irrigada por pivôs centrais é uma atividade importante na Bacia do Rio São Marcos (BARSAM) e uma de suas características é a exigência de terrenos relativamente planos, com declividade máxima inferior a 15%. Por conseguinte, o mapeamento das áreas de agricultura de sequeiro que se encaixam nesse tipo de relevo é uma informação importante para o planejamento de uma possível expansão da agricultura irrigada na BARSAM.

Com a utilização do modelo digital de elevação do SRTM para identificação da declividade do terreno na BARSAM e, sob a hipótese de que as áreas identificadas como vegetação nativa em mapeamento de uso da terra e ocupação do solo não serão convertidas para agricultura irrigada, o objetivo nesse capítulo é identificar as áreas de lavouras de sequeiro, pastagens ou silvicultura na BARSAM, cuja declividade do terreno seja menor ou igual a 15%, reunindo assim as condições ambientais e topográficas necessárias para uma possível expansão da agricultura irrigada por pivôs centrais naquela bacia.



## 5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.2.1 ELABORAÇÃO DO MAPA DE ÁREAS ADEQUADAS A INSTALAÇÃO DE PCPs

Pivôs Centrais Potenciais (PCPs) são figuras geométricas de formato circular que simulam pivôs centrais que poderiam ser instalados na bacia hidrográfica. O mapa de áreas aptas a instalação de PCPs descreve as futuras instalações de pivôs centrais considerando os seguintes fatores: (a) áreas convertidas de vegetação natural para usos agrosilvopastoris; e (b) declividade do terreno de até 15%. O mapeamento das áreas convertidas de vegetação natural para usos agrosilvopastoris foi feita por interpretação visual de imagens de alta resolução espacial.

A inclinação do relevo é fundamental para definir a atividade agrícola possível de ser instalada em uma bacia hidrográfica. As regiões mais planas e suave podem comportar extensas áreas de plantio de monoculturas de ciclo anual devido à facilidade da mecanização da atividade agrícola, enquanto que os relevos mais movimentados são indicados para pastagens ou culturas de ciclo perene. A declividade também influencia a drenagem do terreno, definindo as calhas dos cursos d'água, fontes de captação de água para irrigação e o método de irrigação mais econômico. O mapa de declividade foi feito a partir dos dados da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução espacial de 30 metros, usando o programa *Spatial Analyst* do *ArcGis* 10.5.

Os dados SRTM foram produzidos pela Agência Espacial dos Estados Unidos (NASA) a partir de interferometria de radar (Farr et al., 2007). Muitos estudos confirmaram a acurácia vertical do SRTM em cerca de 16 metros (Marini et al., 2017; Alcântara et al., 2010; Tighe & Chamberlain, 2009), com melhor acurácia em relevos planos e cobertura vegetal ausente ou de pequeno porte. No entanto, outros estudos demonstraram que os dados SRTM tem acurácia pior do que cerca de 16 metros (Sharma & Tiwari, 2014; LaLonde et al., 2010), principalmente em áreas cobertas por vegetação de maior porte ou com relevo mais movimentado.

### 5.2.2 CRUZAMENTO DE CAMADAS

O mapa de áreas adequadas para instalação de PCPs' é o resultado da integração dos mapas de cobertura e uso da terra e declividade do terreno, considerando pesos que expressam a aptidão à instalação de PCPs. Essa operação utilizou a ferramenta de álgebra de mapas. Como resultado gerou-se um mapa de áreas aptas (pixel com valor 1) e inaptas (pixel com valor 0) à instalação de PCPs.

O mapa vetorial de cobertura e uso da terra foi convertido para o formato raster, utilizando a resolução espacial da imagem SRTM de 30 metros (na realidade 30,71 metros). Os pesos para as classes de uso da terra e ocupação do solo foram os seguintes: (a) peso 1 (um) para as classes de

lavoura, pastagem e silvicultura; e (b) peso 0 (zero) para as demais classes. A opção do peso 1 (um) para as classes lavoura, pastagem e silvicultura deve-se aos investimentos da conversão da área de Cerrado para uma atividade econômica agrosilvopastoris, presume-se que os solos da área são adequados a essas atividades.

Os pesos do mapa de declividade basearam-se nas informações encontradas na literatura que citam as limitações dos sistemas de pivô central quanto à topografia do terreno, recomendando que a declividade não ultrapasse 15% (Mello & da Silva, 2009; Mantovani et al., 2007; Gomes, 1999). Consequentemente, para o mapa de declividade os pesos foram definidos da seguinte forma: (a) peso 1 (um) para declividade inferior que 15%; e (b) peso 0 (zero) para declividade superior que 15%.

### 5.2.3 CRIAÇÃO DO MAPA DE MÁXIMA EXPANSÃO DE PCPs

O mapa de máxima expansão de PCPs foi criado a partir de uma sequência de operações para locação de PCPs. Para o melhor entendimento desse processo, abaixo são enumeradas a sequência de operações utilizada nessa metodologia:

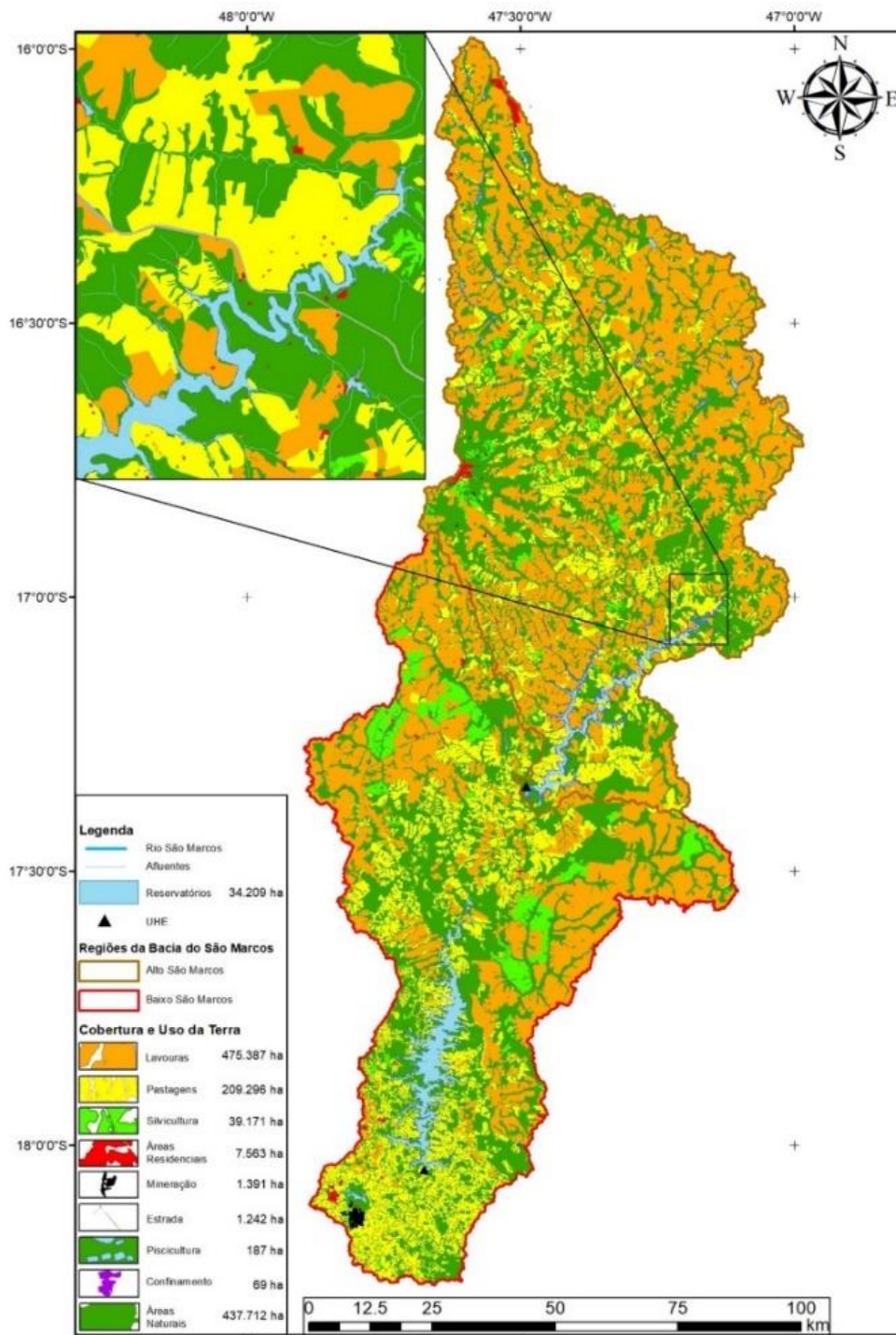
1. Locação manual em ambiente SIG de polígonos circulares com área mínima de 25 ha, ocupando a maior área possível sem sobrepor com um pivô central existente e respeitando os limites fundiários dos imóveis rurais certificados (INCRA – 2015);
2. Edição manual para definição do atributo CODPCP (código do pivô potencial) de cada polígono circular representante de PCP, para coincidir com o atributo COBACIA (código da ottobacia) cujo trecho de rio correspondente poderia servir de fonte de água para irrigação;
3. Geração automática das coordenadas geográficas do centróide de cada PCP;
4. Geração automática das coordenadas geográficas dos nós mais a jusante e dos pontos médios dos trechos dos rios correspondentes a cada ottobacia;
5. Criação automática de linhas, simulando adutoras virtuais, que levariam água da foz ou do ponto médio de cada trecho de rio até o centro dos PCPs. Ou seja, cada centróide de PCP foi ligado ou à foz, ou ao ponto médio do trecho de rio de mesmo código (CODPCP = COBACIA);
6. Para cada PCP foi eliminada a linha (adutora virtual) com maior distância, quando comparados os comprimentos do centróide à foz ou ao ponto médio de cada trecho de rio correspondentes a cada ottobacia. Esse procedimento visava atribuir a menor distância possível do PCP à sua fonte de água;
7. Identificação automática de todas as ottobacias com disponibilidade hídrica insuficiente para abastecer todos os PCPs e PCEs a ela relacionados (conforme a demanda de água considerada

para os pivôs centrais e conforme a metodologia de definição das disponibilidades hídricas de cada ottobacia, ambos descritos no capítulo 4);

8. No caso das ottobacias com disponibilidade hídrica insuficiente, identificadas no passo 6, os códigos da ottobacias (COBACIA) imediatamente a jusante foram atribuídos ao campo CODPCP de cada PCP, e assim por diante, de montante para jusante, até que cada PCP tivesse água suficiente para ser abastecido pela disponibilidade hídrica local da ottobacia em que estava relacionado;
9. Repetição dos procedimentos 5 e 6 para os PCPs que tiveram suas adutoras virtuais transferidas para trechos de rios mais a jusante.

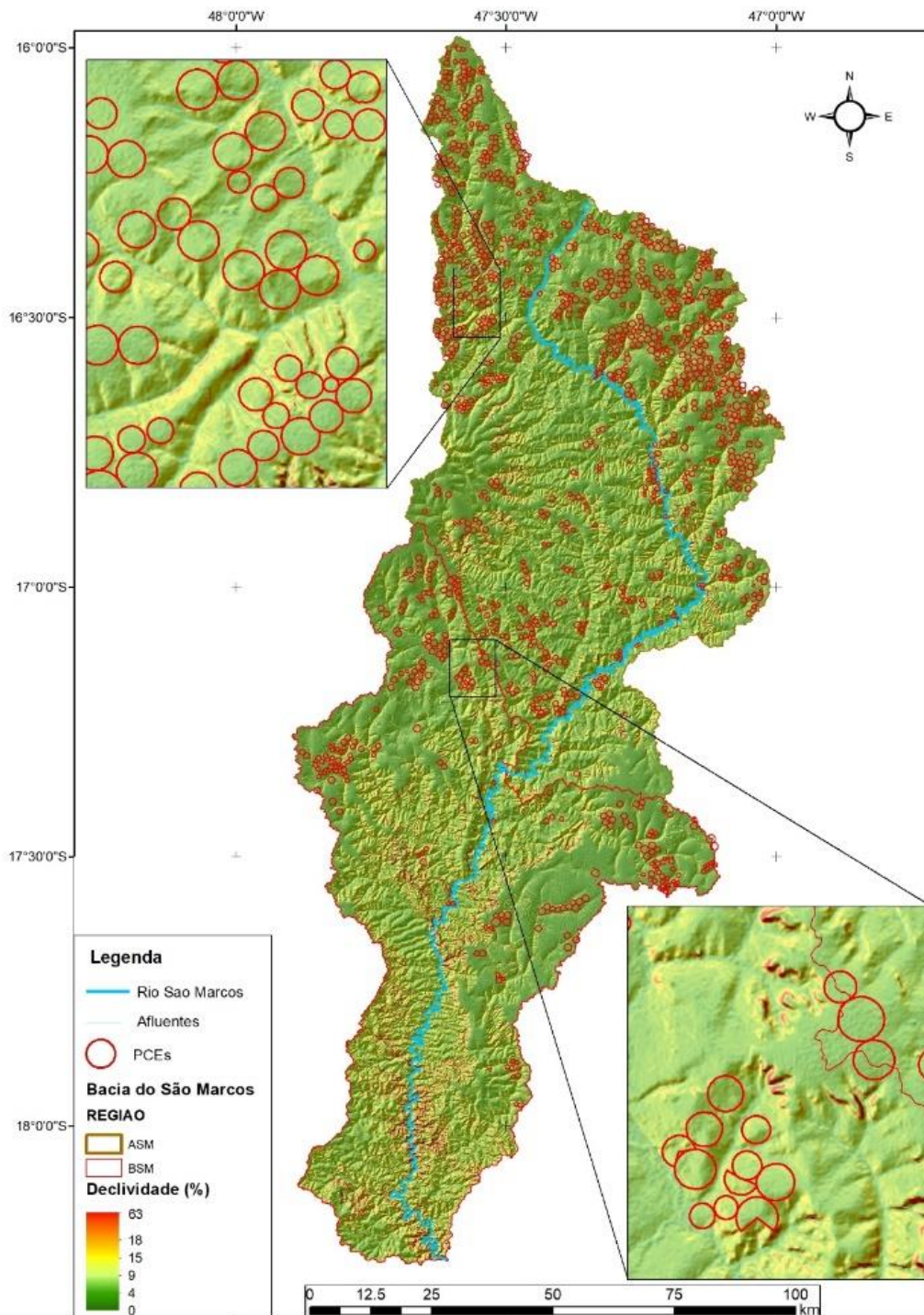
### 5.3. RESULTADOS

A **Figura 5.1** mostra as áreas totais das três principais classes de uso econômico mapeadas manualmente na BARSAM. Verifica-se que o uso agrícola é a atividade econômica responsável pela maior extensão de terras convertidas de áreas naturais para uso antrópico (com 475.250 ha), seguida da pecuária (com 208.817 ha) e depois pelas áreas de silvicultura (39.171 ha).



**Figura 5.1** – mapa de uso da terra e cobertura do solo gerado por classificação manual

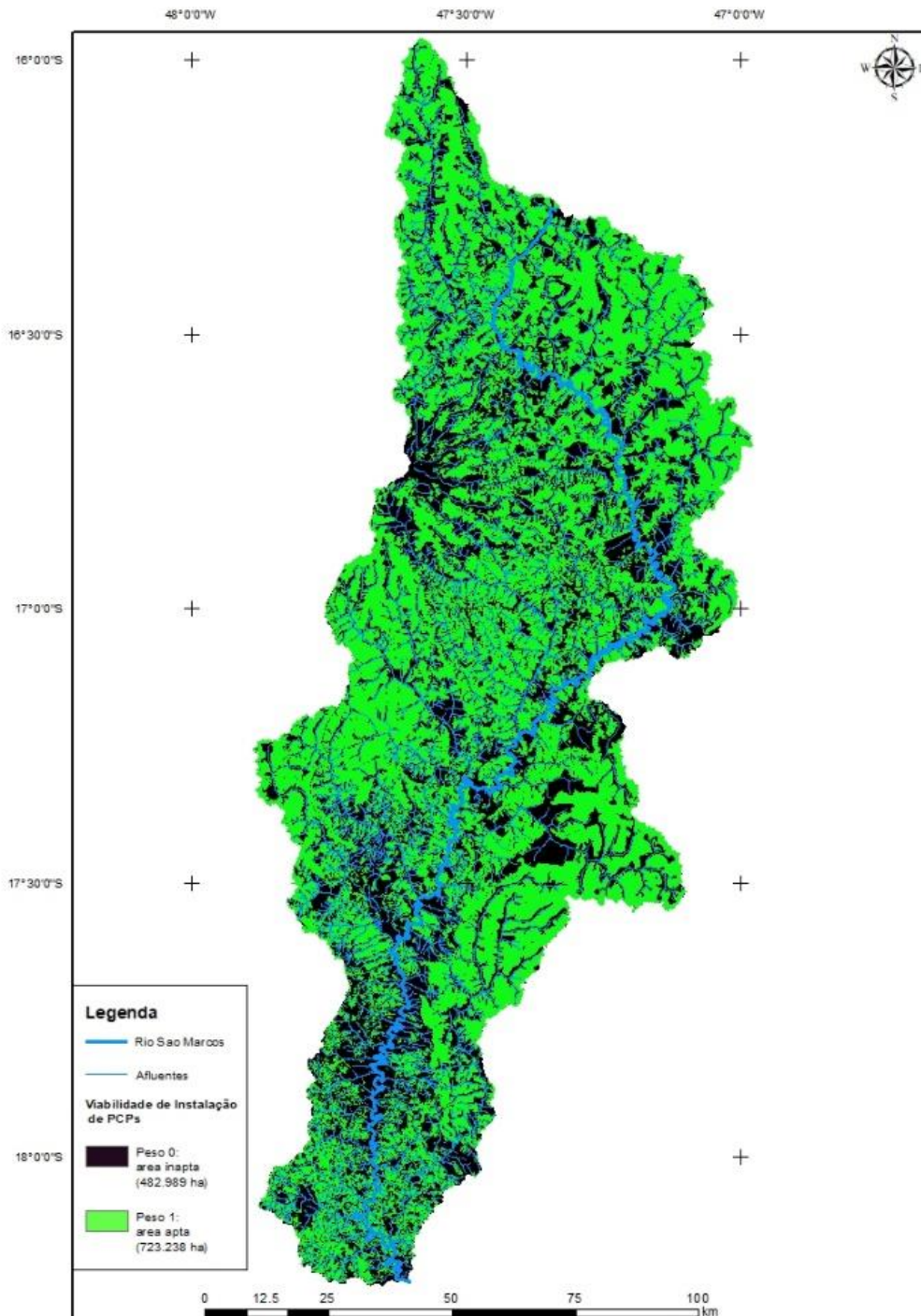
A **Figura 5.2** demonstra o mapa de declividade da BARSAM, criado a partir das imagens do SRTM com pixels de 30 metros de resolução espacial, com a sobreposição dos PCEs para visualizar a declividade média dos terrenos com PCEs instalados.



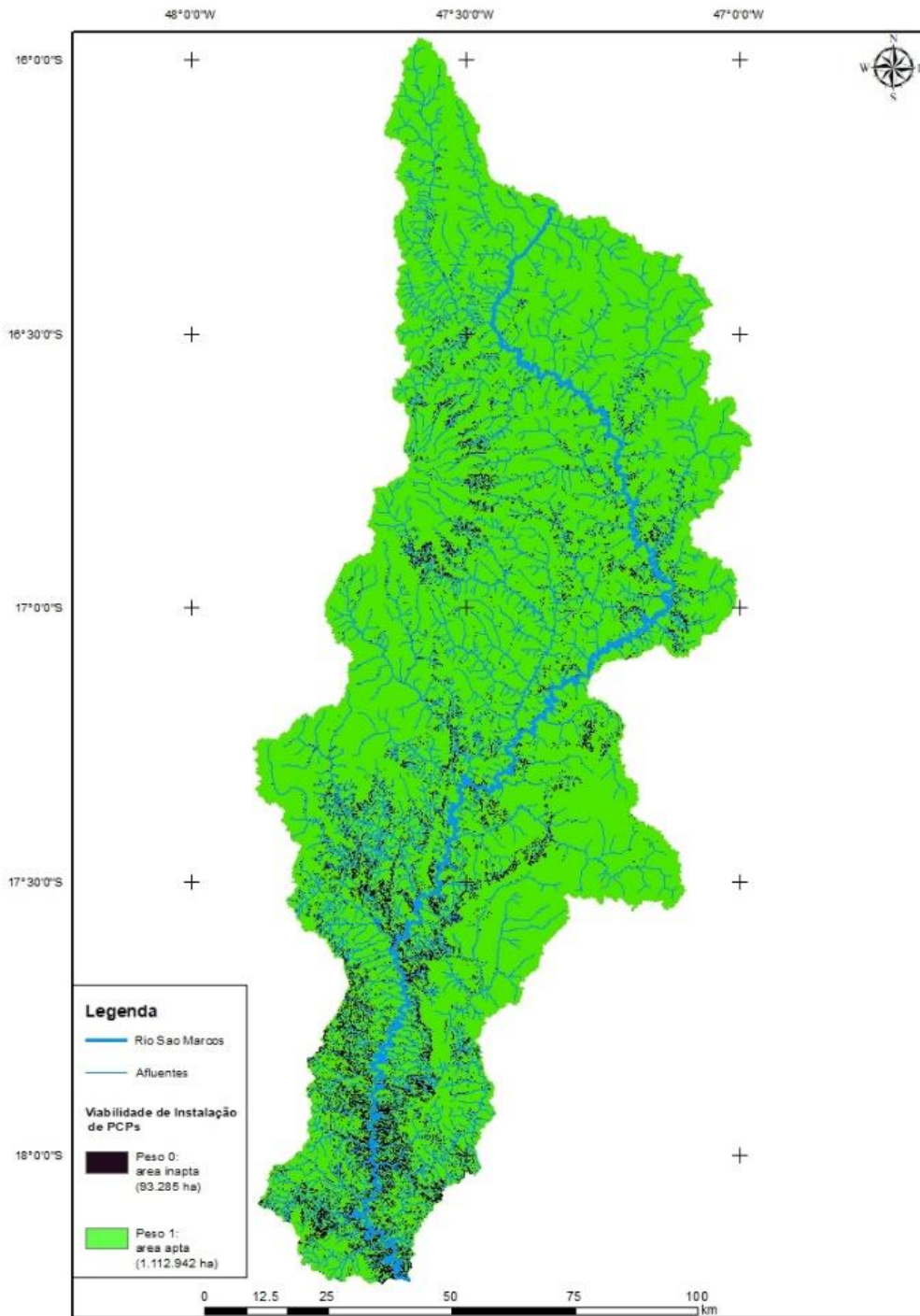
**Figura 5.2.** Mapa de declividade do relevo da bacia do Alto São Marcos com PCEs sobrepostos.

O resultado da conversão do mapa de uso da terra e ocupação do solo para raster com a definição dos pesos (1 – um - para áreas de lavouras, pastagens e silvicultura; e 0 – zero – para as demais áreas) é apresentado na **Figura 5.3**. O resultado da definição dos pesos para o mapa de declividade (1 – um - para áreas com declividade entre 0 e 15%; e 0 – zero – para declividades maiores que 15%) é apresentado na **Figura 5.4**. O resultado da integração entre o mapa de aptidão à instalação de PCPs quanto às classes de uso da terra e cobertura do solo (**Figura 5.3**), multiplicado pelo mapa de aptidão

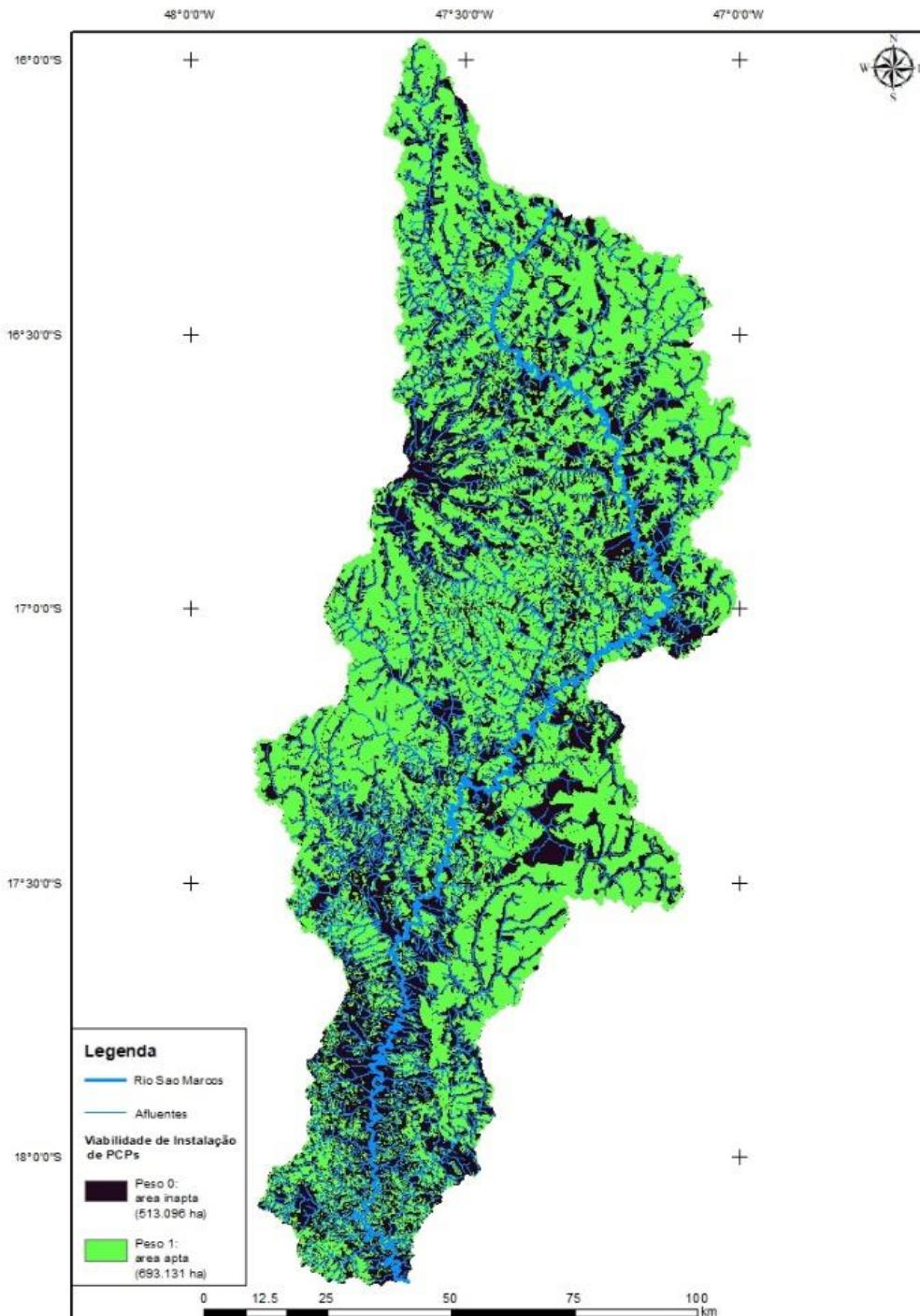
à instalação de PCPs quanto à declividade do terreno (**Figura 5.4**) é apresentado na **Figura 5.5**. Somadas, as áreas propícias à instalação de pivôs centrais na BARSAM chegam a cerca de 6.931 km<sup>2</sup>.



**Figura 5.3.** Mapa de aptidão à instalação de PCPs quanto às classes de uso da terra e cobertura do solo.



**Figura 5.4.** Mapa de aptidão à instalação de PCPs quanto à declividade.



**Figura 5.5.** Mapa final de aptidão à instalação de PCPs.

A **Figura 5.2** demonstra claramente que, segundo os dados do SRTM, a maior parte da **BARSAM** possui relevo com declividades inferiores a 15%, com um percentual de 92% da área da bacia se encaixando nessa classe. Quando se analisa o mapa de áreas convertidas de cerrado para uso agrosilvopastoril (**Figura 5.1**), pode-se verificar que existiam 723.238 ha nessa condição em 2016, ou quase 60% da área da bacia. Porém a **Figura 5.5** demonstra que dos 723.238 ha convertidos de cerrado para uso agrosilvopastoril, apenas 693.131 ha possuem declividades iguais ou inferiores à 15%, ou



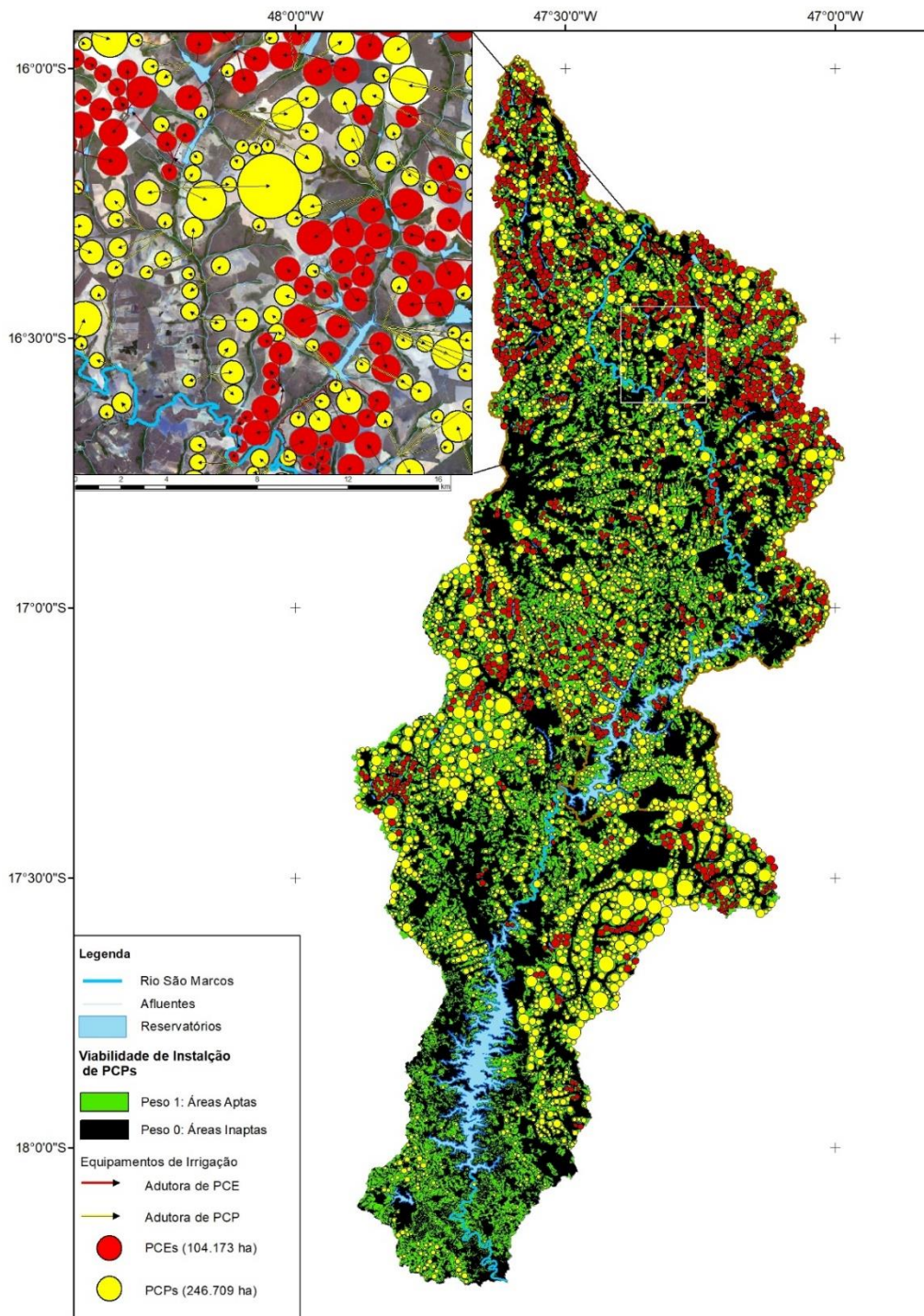
seja, 30.107 ha de áreas convertidas de cerrado para uso agrosilvopastoril possuem declividades superiores a 15%, e não são passíveis de serem convertidas para agricultura irrigada por pivôs centrais.

A **Figura 5.6** demonstra o mapa final com os PCPs (polígonos amarelos) locados sobre as áreas propícias à instalação de novos pivôs centrais (regiões em verde da **Figura 5.5**). No detalhe encontram-se os PCPs com as respectivas adutoras virtuais, com as setas indicando a direção da água dentro da adutora, sobre o fundo composto pela imagem do satélite Sentinel de setembro de 2016.

O mapa da BARSAM com a locação máxima de PCPs (**Figura 5.6**) demonstra que existiriam 588.958 ha disponíveis dos 693.131 ha propícios à instalação de pivôs centrais, descontando os 104.173 ha que já estavam sendo irrigados em 2016 (presença de PCEs). Contudo, devido a forma circular do pivô central, que aproveita apenas 75% da área em que está inserindo, restariam **441.718 ha**. Mais ainda, como foi adotado a área mínima de 25 ha para a criação de um PCP e foram respeitados os limites das fazendas georreferenciadas na bacia, segundo cadastro da Incra/Sigef, a área efetivamente disponível para ampliação da irrigação na BARSAM é de cerca **246.709 ha**.

A **Tabela 5.1** lista o número de PCPs pelas classes de tamanho de área irrigada e suas respectivas distâncias aos locais onde captam água nos corpos hídricos da BARSAM. Analisando essa tabela, infere-se que as regiões dos Planaltos e Terraços com terras convertidas para uso agrosilvopastoril e aptas para instalação de pivôs centrais permitiriam a instalação de grandes PCPs, sendo 172 com mais de 200 ha e chegando até 840 ha de área. Por outro lado, 60% dos PCPs são pequenos pivôs da ordem de 25 a 50 ha. Outro grupo de tamanho de PCPs representativo é o que vai de 50 a 200 ha, com 1.333 PCPs, ou 35% do total de PCPs. Os PCPs com áreas maiores que 200 ha teriam poucas chances de existir, se for mantido o padrão de culturas cultivadas na BARSAM e o nível tecnológico de irrigação existente atualmente. Isso porque pivôs muito grandes, da ordem de 600 hectares de área irrigada, são projetados de irrigação com pequenas lâminas de água, da ordem de 2mm por aplicação, e são propícios para culturas que suportam melhor o estresse hídrico, com a cana-de-açúcar. Mas essa cultura não é cultivada na BARSAM, por isso é improvável que pivôs maiores que 250 ha sejam algum dia implementados na bacia.

Por outro lado, como o objetivo deste trabalho é avaliar a área máxima de ampliação da irrigação por pivôs centrais na BARSAM, buscou-se abranger a maior área possível do PCP sobre o mapa de áreas adequadas à instalação de novos pivôs, pois 4 pivôs de 200 ha não cabem dentro de um pivô de 800 ha, haja vista que pelo seu formato circular o pivô desperdiça 25% da área.



**Figura 5.6** – Mapa da BARSAM com a localização máxima de PCPs tendo como fatores limitantes áreas já convertidas para uso agrosilvopastoril e declividade máxima do terreno de 15%.

**Tabela 5.1** – Tabela de detalhamento das dimensões do 3.779 PCPs.

Classe de PCP por área irrigada	Total de PCPs	Área do PCP (ha)			Distância da Captação (m)		
		Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Mín.
25 a 50 ha	2.274	50	32	25	11.195	1.507	24
50 a 75 ha	643	75	60	50	11.283	1.739	495
75 a 100 ha	317	100	86	75	7.008	1.871	428
100 a 150 ha	258	150	121	100	10.184	2.103	717
150 a 175 ha	59	175	161	150	8.868	2.119	826
175 a 200 ha	56	200	186	175	9.017	2.288	808
200 a 300 ha	94	300	239	200	8.207	2.555	948
300 a 400 ha	45	400	342	300	8.543	2.948	1.297
400 a 600 ha	21	597	484	402	5.183	3.281	1.230
600 a 874 ha	12	874	727	601	4.357	3.473	2.515

#### 5.4. CONCLUSÃO

Todas as ferramentas de geoprocessamento utilizadas nesse estudo são de simples operação e proporcionaram resultados satisfatórios. De modo geral, para fins de planejamento dos usos dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, os resultados alcançados podem ser conseguidos com uso de mapas de uso da terra e ocupação do solo de menor escala, sendo desnecessária a análise visual e classificação manual em imagens de alta resolução espacial. Da mesma forma, a utilização de mapa de declividade do terreno gerado a partir dos dados do SRTM proporciona bons resultados a nível de planejamento quando aplicados em bacias de relevo suave e suave ondulado e vegetação de savanas, como a BARSAM, sendo desnecessária a aplicação de algoritmos para diminuição do efeito da vegetação, por exemplo.

Contudo, a vetorização manual dos PCPs é de simples execução, mas demanda muito tempo. Mais ainda, a vetorização das adutoras e definição dos corpos hídricos de onde os PCPs retirariam água dos corpos hídricos é uma fase fundamental para um possível cálculo de balanço hídrico na bacia, mas que também demanda muito tempo até que se consiga um arranjo ótimo onde cada PCP seja relacionado da maneira mais lógica possível, sob os prismas econômico e hidrológico. Para ambos os processos de vetorização, o ideal é que seja desenvolvido algum script de programação que consiga vetorizar PCPs e suas adutoras, levando em consideração uma área mínima de PCP (e talvez uma área máxima), e a menor distância conjugada com a menor diferença de nível possível para o traçado das adutoras, considerando os dados altimétricos de algum MDE, como o SRTM por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCANTARA, E.; NOVO, E.; STECH, J.; ASSIREU, A.; NASCIMENTO, R.; LORENZZETTI, J.; SOUZA, A. Integrating historical topographic maps and SRTM data to derive the bathymetry of a tropical reservoir. **Journal of Hydrology**. V. 389, p. 311-316, 2010.

ARABINDA, S.; TIWARI, K. A comparative appraisal of hydrological behavior of SRTM DEM at catchment level. **Journal of Hydrology**. V. 519, p. 1394-1404, 2014.

BIELENKI, C.; BARBASSA, A. P. **Geoprocessamento e Recursos Hídricos**. EdUFSCar, São Carlos, 2012.

BRUNCKHORST, A.; BIAS, E. de S. Aplicação de SIG na Gestão de Conflitos Pelo Uso da Água na Porção Goiana da Bacia Hidrográfica do Rio São Marcos, Município de Cristalina – GO. **Geociências**, v.33, n.2, p.228-243, 2014.

CARVALHO, D.; CEDDIA, M.; da SILVA, W.; TANAJURA, E.; VILLELA, A. Estimativa do custo de implantação da agricultura irrigada, utilizando o sistema de informação geográfica. **Engenharia Agrícola**. V.25, n.2, p. 395-408, 2005.

FARR, T.; ROSEN, P.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**. V.45, 2007

GOMES, H. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento**. Universidade Federal da Paraíba, 1999.

HOCES, E.; ARUMI, J. RODRIGUEZ, A.; PAZ, V. Geographic information system supported farm irrigation system design and planning. **Water Resources and Irrigation Management**. V.1, p. 7-14, 2012.

KREBSFER, Manual técnico do pivô Krebsfer. Disponível em: <<https://krebs.com.br/irrigacao/arquivos/pivos-manual-de-montagem.pdf>>. Acesso em: 30 de mar. 2018, 19:12:00.

LaLONDE, T.; SHORTRIDGE, A.; MESSINA, J. The influence of land cover on Shuttle Topography Mission (SRTM) Elevations in low-relief areas. **Transactions in GIS**. V.14, p. 461-479, 2010.

MARINI, L.; MARCATO JR., J.; PARANHOS FILHO, A.; BARROS, W.; HIGA, L. Análise da acurácia altimétrica dos modelos digitais de superfície SRTM, Aster e Topodata e aplicação da representação 3d do Pantanal da Nhecolândia. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ - Vol. 40 - p. 48-54, 2017.**

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação: princípios e métodos. Viçosa: UFV, 2007. 318p.

MELLO, J.; da SILVA, L. **Irrigação**. Departamento de Engenharia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2009. Disponível em: <<https://www.scribd.com/document/182616038/Apostila-Irrigacao>>. Acesso em: 30 mar. 2018, 19:14:30.

SANTOS, K.; OLIVEIRA, W.; KOPP, K. Geoprocessamento como um instrumento para a gestão dos recursos hídricos e gestão territorial nas microbacias Foz Ribeirão dos Pereiras/Rio Anicuns e microbacias Ribeirão dos Pereiras – Goiás. In: **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, 13 a 18 de Abril de 2013.

SHARMA, A.; TIWARI, K. A comparative appraisal of hydrological behavior of SRTM DEM at catchment level. **Journal of Hydrology**. V. 519, p. 1394-1404, 2014.

TIGHE, M.; CHAMBERLAIN, D. Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP USA digital terrain model over several USA study sites. In: **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) and Management Association for Private Photogrammetric Surveyors (MAPPS) Fall Conference**, San Antonio, Texas, November, 2009

## CAPÍTULO 6

### CENÁRIOS DE AMPLIAÇÃO DA AGRICULTURA IRRIGADA NA BARSAM

#### 6.1. INTRODUÇÃO

O geoprocessamento vem se configurando como ferramental impreterível em estudos científicos sobre expansão de áreas irrigadas, porém tais estudos tradicionalmente focam apenas nas características climáticas locais e na aptidão das terras (Moreira, 2018; Brunckhorst & Bias, 2014; Chen et al., 2010 (1); Chen et al., 2010 (2); de Sousa et al., 2007; Bucene, 2002), e raramente incluem outros tipos de análises tais como a existência de água suficiente para irrigação (Feizizadeh & Blaschke, 2012), a intensidade de irrigação necessária de acordo com os métodos de irrigação utilizados e as culturas irrigadas (Yu et al, 2011), os locais de retirada de água dos cursos d'água que permita realizar um balanço hídrico para cada trecho da hidrografia, a localização precisa das terras irrigadas e considerações acerca da viabilidade técnica e econômica da expansão da irrigação.

A expansão da irrigação por pivôs centrais na Bacia do rio São Marcos (BARSAM) dependerá de diversos fatores e poderá ter diversas configurações espaciais. Os principais parâmetros que devem ser analisados na simulação da expansão de irrigação por pivôs centrais são fundiários, edafológicos, topográficos, hidrológicos e hidráulicos. No caso das bacias muito modificadas pelo uso antrópico, os parâmetros fundiários e edafológicos podem ser substituídos por mapas de cobertura e uso da terra, uma vez que se pode considerar que as áreas já convertidas para usos agrosilvopastoris apresentam solos adequados para irrigação. Os dados topográficos podem ser supridos pelos modelos digitais de elevação (por exemplo, o SRTM), permitindo avaliar o relevo adequado para a instalação de pivôs centrais como equacionar as questões hidráulicas no que tange à potência necessária de motores elétricos e bombas hidráulicas para bombear água dos corpos hídricos para as bases das torres das linhas móveis dos PCPs. Dentre os parâmetros hidrológicos da BARSAM, os dados de vazão de estações fluviométricas e o volume de pequenos reservatórios são fundamentais para avaliação.

#### *DIMENSIONAMENTO DE PIVÔS CENTRAIS*

O dimensionamento dos pivôs centrais no planejamento da expansão da agricultura irrigada na BARSAM só é possível mediante o uso de uma metodologia simplificada, pois são muitas as especificações técnicas que só podem ser escolhidas pelo projetista mediante análise pormenorizada das condições de operação de cada pivô central individualmente. Por exemplo, a definição da pressão de serviço de um pivô é baseada no tipo do aspersor que será utilizado. O aspersor é o elemento mecânico de maior importância no sistema de aspersão, sendo responsável pela pulverização do jato

d'água. Um dos primeiros procedimentos a serem realizados em um projeto de irrigação por aspersão é a escolha do aspersor (Biscaro, 2009). Uma vez que o pacote de bicos de pulverizadores é escolhido, as principais especificações passam a ser a pressão de serviço e a vazão na base da torre do pivô (Adusumilli & Almas, 2007). Em pivôs centrais, a eficiência da aplicação de água é largamente baseada na escolha do pacote de aspersores (Martin et al., 2011). O projeto correto e a operação do sistema são parâmetros essenciais para alta eficiência, boa distribuição e uniformidade de aplicação da água (Rogers & Koelliker, 2011). Os primeiros pivôs centrais produzidos em 1950 operavam com altas pressões de 80 a 100 psi (56 a 70 m.c.a) e eram equipados com canhões nos finais das linhas móveis apontados para o céu, que pulverizavam água para cima, resultando em perdas por evaporação significativas e altas demandas de energia. Hoje, pressões baixas, como 10 a 15 psi (7 a 10 m.c.a) são projetadas para pivôs centrais com linhas móveis de 400 metros de comprimento, operando em terrenos com aclives moderados, em sistemas de irrigação do tipo LESA (*Low Elevation Slow Application*) e LEPA (*Low Energy Precision Application*). A eficiência de aplicação de água nesses sistemas é de 85 a 98% (Fipp & New, 2005). As eficiências de aplicação podem ser de 60 a 70% para sistemas como o MESA (*Mid Elevation Spary Application*), de 70 a 80% para sistemas como o LESA, e maiores do que 90% para sistemas como o LEPA (Rajan et al., 2015). Nos EUA o milho tem sido irrigado por esses três sistemas sob pivô central (Colaizzi et al., 2011).

Outras especificações técnicas de projeto de um pivô central que só podem ser escolhidas pelo projetista por se tratarem de parâmetros hidráulicos para o quais não existem fórmulas matemáticas definidas, são as escolhas do diâmetro da linha móvel e da velocidade permitida média da água, ou velocidade econômica (m/s) para todo o projeto. Por exemplo, recomenda-se que a escolha do diâmetro da linha móvel de um pivô central seja baseada em uma análise econômica, considerando o balanço entre o custo do material e o custo da energia. Diâmetros maiores resultam em menores perdas de carga na tubulação e, conseqüentemente, menor potência requerida para o sistema, resultando em menor consumo de energia. Por outro lado, a escolha de diâmetros maiores significa custos mais elevados com a aquisição do equipamento (da Silva & de Azevedo, 1998). Para pivôs com menos de 30 ha, o diâmetro de tubulação recomendado é de 127 mm; para 30 – 40 ha, 168,3 mm; para 40 – 75 ha, 219,1 mm; e para 75 – 100 ha, 254 mm (Montero et al., 2013). Quanto a velocidade econômica do projeto, quanto maior a velocidade da água, menor tem que ser o diâmetro da tubulação. E quanto menor for o diâmetro da tubulação, maiores são as perdas de carga e maior será o custo de bombeamento. Para tubulações de PVC a velocidade econômica varia entre 0,62 e 1,97 m.s<sup>-1</sup> (Perroni, 2008).

## *QUALIDADE DAS MELHORES TERRAS PARA IRRIGAÇÃO*

Uma das características que barateiam o custo de operação de um pivô central e o seu tamanho. Quanto maior a área irrigada por um único pivô central, menores serão os seus custos relativos de instalação. Para se instalar um grande pivô central é necessário que a região de instalação tenha topografia adequada em toda a área a ser irrigada, e seja grande o suficiente para comportar todo o perímetro do pivô central, sem barreiras físicas ou naturais no caminho da linha móvel do pivô.

As distâncias de até 1.000 m em torno dos cursos d'água são consideradas como a máxima distância viável para se conduzir a água até a área irrigada sem que haja grandes investimentos em infraestrutura ou bombeamento (Hessari et al., 2016). O custo por hectare de um sistema de pivô central tem redução dos custos com o aumento da área irrigada para um mesmo comprimento de adutora. Por conseguinte, quando o comprimento da adutora aumenta, para uma mesma área, o custo por um hectare de pivô central também tende a aumentar (Perroni, 2008).

O montante de energia necessária para o bombeamento de água em um pivô central depende do local da fonte de água e a elevação relativa até o local do descarregamento do bombeamento (Martin et al., 2011). A variação no comprimento da adutora e no desnível geométrico entre o centro do pivô e a fonte de água variam de forma diretamente proporcional ao custo de produção em um pivô central (Oliveira & Zocoler, 2013).

Nesse sentido, um arranjo economicamente interessante, ao custo de US\$ 976. ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, seria obtido por pivôs com linhas móveis com 485 m de comprimento (74 ha) e diâmetro de tubulação de 219,1 mm, e irrigação do tipo LEPA; salientando que os sistemas LEPA requerem topografia do terreno planas (Montero et al., 2013).

## *OBJETIVOS DO PRESENTE ESTUDO SOBRE EXPANSÃO DA IRRIGAÇÃO NA BARSAM*

Este estudo visa proceder a análises de geoprocessamento enriquecidas com informações hidrológicas para propor cenários de expansão da irrigação na BARSAM, que incluam não somente as a aptidão das terras para irrigação, mas também realizar o balanço hídrico da bacia, para o qual se faz necessário a indicação dos locais precisos das terras irrigadas, a disponibilidade e a definição dos locais de retirada da água e a intensidade de irrigação demandada pela cultura do milho plantado na safra de inverno com o uso de pivôs centrais. Mais ainda, os cenários de expansão de irrigação na BARSAM serão complementados com cálculos hidráulicos necessários para o dimensionamento simplificado de pivôs centrais potenciais (PCPs), para que se possibilite fazer considerações acerca da viabilidade econômica da expansão da irrigação na BARSAM. Por fim será apresentada a área irrigada com maior probabilidade de ser acrescentada as áreas que já vem sendo irrigadas na bacia, e os efeitos



desse cenário mais provável de ampliação da irrigação na BARSAM sobre a geração de energia elétrica na UHE Batalha.

## 6.2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 6.2.1 SIMULAÇÕES E BALANÇO HÍDRICO: OFERTA E DEMANDA

No **capítulo 5** foi proposto um mapa de ampliação máxima da agricultura irrigada por pivôs centrais na BARSAM, no qual foram vetorizados 3.779 PCPs que ocupariam a maior área possível com pivôs centrais. No cálculo do balanço hídrico da BARSAM foi utilizada como demanda hídrica valores de **0,54 L/s. ha<sup>-1</sup>** ou **4,66 mm/dia** para a irrigação do plantio de milho na safra de inverno no período de 100 dias (de 21 de fevereiro a 1 de junho) em todos os pivôs centrais existentes (PCEs) e virtuais (PCPs). Como oferta hídrica foram utilizados dois parâmetros: (a) **Q<sub>95</sub>** que corresponde à vazão que é igualada ou superada em 95% do tempo; e (b) reservatórios virtuais, tendo como base os estudos desenvolvidos no **capítulo quatro** que correlacionam os volumes de armazenamento de água de reservatórios existentes na BARSAM e suas respectivas áreas de drenagem a montante na influência sobre a disponibilidade hídrica na bacia. A **Tabela 6.1** lista as relações de tamanho de reservatório, área de drenagem a montante e capacidade de regularização hídrica utilizadas para simulação dos reservatórios virtuais.

**Tabela 6.1** – Tabela sugestiva de tamanho de espelho d'água de reservatório para armazenar volume de água suficiente para disponibilidade hídrica da área do espelho d'água de um reservatório para conseguir regularizar a Q<sub>mlt</sub>, dependendo da área de drenagem a montante de onde esteja situado.

Vazão média 100 dias (m <sup>3</sup> /s)	Grupo de Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	Referencial à Curva de Permanência	Área Necessária (ha)	Área Max. Atual (ha)	Volume (hm <sup>3</sup> )	Q <sub>95</sub> <sub>100</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Evap. Média (m <sup>3</sup> /s)	Infiltr. Média (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Disponível (100 dias - m <sup>3</sup> /s)
0.034	0 - 3 km	Q40	13	23	0.4133	0.015	0.0057	0.0233	0.034
0.105	3 - 7 km	Q40	29	53	1.0866	0.046	0.0128	0.0520	0.107
0.183	7 - 10 km	Q45	41	65	1.6491	0.084	0.0180	0.0736	0.183
0.257	10 - 15 km	Q50	51	59	2.1451	0.124	0.0224	0.0915	0.258
0.341	15 - 20 km	Q55	60	65	2.6090	0.174	0.0264	0.1076	0.342
0.464	20 - 30 km	Q60	72	94	3.2499	0.251	0.0317	0.1292	0.466
0.686	30 - 50 km	Q65	91	149	4.3093	0.392	0.0400	0.1633	0.687
1.169	50 - 100 km	Q70	125	187	6.3171	0.717	0.0550	0.2242	1.169
1.884	100 - 200 km	Q85	117	128	5.8332	1.474	0.0515	0.2099	1.888
2.852	200 - 300 km	Q90	109	-	5.3561	2.478	0.0479	0.1955	2.854
4.078	300 - 400 km	Q90	142	198	7.3661	3.544	0.0625	0.2547	4.079
5.171	400 - 500 km	Q90	170	-	9.1496	4.494	0.0748	0.3050	5.173

Onde:

- Vazão Média 100 dias (m<sup>3</sup>/s)

- Indica as vazões médias no período de análise de 100 dias (vide **Capítulo 4**) por grupos de regiões de áreas de drenagem da coluna Área de Drenagem
- Grupo de Área de Drenagem (km<sup>2</sup>)
  - O mesmo que “grupos de áreas de drenagem a montante”. Cada grupo tem uma vazão média correspondente. Para cada reservatório se supõe que a vazão afluyente mínima que chegará até ele durante os 100 dias da análise ficará em torno dos valores constantes na coluna **Q95<sub>100</sub> (m<sup>3</sup>/s)**.
- Referencial à Curva de Permanência
  - É a referência dos valores da coluna “**Vazão Média 100 dias**” à curva de permanência obtida com a regionalização das vazões da BARSAM (vide **Capítulo 3**).
- Área necessária (ha)
  - Área necessária que um reservatório deve ter para armazenar água suficiente para atingir a vazão referente à coluna **Vazão Média**
- Área Max. Atual (ha)
  - Demonstra os maiores reservatórios existentes no respectivo grupo de área a montante. Coluna apenas informativa para comparação com a coluna “**Área Necessária**”.
- Volume (hm<sup>3</sup>)
  - Volume referente à área do reservatório constante na coluna **Área Necessária**
- Q95<sub>100</sub> (m<sup>3</sup>/s)
  - Valor médio de vazão referente à Q95 (obtida com a regionalização, **Capítulo 3**)
- Evap. Média (m<sup>3</sup>/s)
  - Valor médio de evaporação conforme a área do reservatório (**Capítulo 4**).
- Infiltr. Média (m<sup>3</sup>/s)
  - Valor médio de infiltração da água no subsolo em reservatórios na BARSAM (Rodrigues & Dekker, 2008).
- Vazão Disponível (100 dias - m<sup>3</sup>/s)
  - Vazão disponível média proporcionada pelos respectivos reservatórios

#### 6.2.2. DIMENSIONAMENTO SIMPLIFICADO DOS PIVÔS CENTRAIS POTENCIAIS (PCPs)

O cálculo simplificado das potências necessárias de uma estação de bombeamento para levar água de um corpo hídrico até o centro do PCP utilizou os dados de altitude do modelo digital de elevação (MDE) do SRTM. O SRTM disponibiliza dados de altitude em pixels com resolução espacial de 30 metros, e esses dados foram utilizados no cálculo da diferença geométrica entre o ponto do pivô central

e o local de retirada de água na fonte, como também para calcular o aclave/declive máximo existente dentro do perímetro dos PCPs.

### *CÁLCULOS DE COMPRIMENTO DA LINHA MÓVEL ( $L_{Mov}$ )*

Para se chegar a potência necessária da bomba do pivô central o primeiro passo foi o dimensionamento da sua lateral de irrigação, ou linha móvel. Como a área dos PCPs já era conhecida e fora calculada em hectares pelo software de SIG, as equações 6.1 e 6.2 demonstram os cálculos para se obter o comprimento da linha móvel.

$$R = \frac{A \times 10.000}{\pi} \dots\dots\dots(6.1)$$

Onde:

$R$  = raio irrigado do PCP (m)

$A$  = Área do PCP (ha)

O raio irrigado ( $R$ ), corresponde à distância do centróide do PCP até o último aspersor, acrescido de uma fração do raio molhado desse último aspersor. Em sistemas que não usam canhão final, recomenda-se utilizar como raio irrigado adicional o comprimento equivalente à metade do espaçamento do último aspersor ( $w$ ). Sendo **9 metros** um valor comum para difusores postos na extremidade da linha móvel (da Silva & de Azevedo; 1998), chega-se ao comprimento da linha móvel pela equação 6.2:

$$L_{Mov} = R - \left(\frac{w}{2}\right) \dots\dots\dots(6.2)$$

Onde:

$L_{Mov}$  = Comprimento da linha móvel do PCP (m)

$w$  = espaçamento do último aspersor (9 metros)

### *CÁLCULO DA VAZÃO DO SISTEMA ( $Q$ )*

O cálculo da **vazão do sistema** depende do comprimento da linha móvel, do requerimento de água da cultura do milho e da eficiência de irrigação.

Como eficiência de irrigação, para os PCPs de até 50 ha utilizou-se a eficiência de 90%, considerando que os menores PCPs poderiam utilizar a irrigação do tipo LESA (*Low Elevation Spray Application*). Os demais PCPs com áreas maiores que 50 ha se utilizou a eficiência de 85%.

Como requerimento de água do milho utilizou-se a média de demanda hídrica do milho para a safra de inverno para a região da BARSAM que é de 4,66 mm.dia<sup>-1</sup>. Contudo, nessa demanda hídrica do milho já está sendo considerado a eficiência de irrigação em torno de 80%, portanto a utilização de 4,66 mm.dia<sup>-1</sup> como demanda hídrica do milho está 20% acima da média para a região para a safra de inverno.

Para o cálculo da vazão do sistema foi utilizada a equação 15.

$$Q = \left( \frac{K \times (R^2) \times l}{T \times Ef} \right) / 1000 \dots\dots\dots(6.3)$$

Onde:

$Q$  = Vazão do sistema (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>);

$K$  = Constante igual a 8,7266 x 10<sup>-4</sup>;

$l$  = Requerimento de água do milho para a safra de inverno na BARSAM (4,66 mm/dia);

$T$  = Tempo de operação por dia (21 horas);

$Ef$  = Eficiência de irrigação (decimal de 85%);

**CÁLCULO DA PERDA DE CARGA NA LINHA MÓVEL ( $h_{fLMOV}$ )**

A perda de carga varia diretamente com a vazão e o comprimento da linha móvel, e indiretamente com o diâmetro da tubulação. Para a tubulação da linha móvel foi utilizado apenas um diâmetro de tubo, para simplificação da metodologia, tendo em vista que o objetivo deste trabalho não é projetar o dimensionamento de todos os 3.779 PCPs, mas sim ter algum parâmetro de avaliação da viabilidade de cada PCP. Para os PCPs de até 100 ha, foram escolhidos tubos de aço galvanizado de diâmetros comerciais de acordo com os parâmetros informados por Montero et al (2013). Para os demais PCPs com áreas maiores do que 100 ha, foram escolhidos aleatoriamente os diâmetros de tubulações de aço galvanizado comumente utilizados em pivôs centrais, variando somente conforme a área do PCP (**Tabela 27**).

**Tabela 6.2.** Diâmetros de tubos de aço galvanizado escolhidos para compor as linhas móveis dos 3.779 PCPs.

PCP – Área (ha)	Diâmetro (mm)
25 a 30 ha	127
30 a 40 ha	168,3
40 a 75 ha	219,1
75 a 100 ha	254
> 75 ha	254

Como coeficiente de rugosidade do aço galvanizado utilizou-se o valor de 120.

Para estimar o valor da perda de carga na linha móvel dos PCPs, utilizou-se a fórmula de Hazen-Williams, conforme se segue na equação 6.4:

$$h_f = \left( K \frac{\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}}{(D)^{4,87}} \right) \times L_{Mov} \quad (6.4)$$

Onde:

$h_f$  = Perda de carga em tubulações (m.c.a);

$K$  = Constante igual a  $1,22 \times 10^{10}$ ;

$Q$  = Vazão do sistema ( $m^3.s^{-1}$ );

$C$  = coeficiente de rugosidade do aço galvanizado (120);

$D$  = Diâmetro da tubulação;

$L_{Mov}$  = Comprimento da linha móvel do PCP (m)

A perda de carga inicial da linha móvel ( $h_{fILM}$ ) precisa ser multiplicada por um fator ( $F$ ) pois em tubulações com saídas, como são as linhas moveis de pivôs centrais, a perda de carga é menor do que em uma tubulação sem saídas, como as adutoras. Na linha móvel com saídas (aspersores), a vazão decresce do início para o final da linha e com isso há redução gradativa da perda de carga na tubulação (da Silva & de Azevedo, 1988). Essa redução na perda de carga pode ser obtida pela equação 6.5.

$$h_{fILM} = F \times h_f \quad (6.5)$$

Onde:

$h_{fILM}$  = perda de carga inicial na linha móvel (m.c.a)

$F = 0,548$

A perda de carga na linha móvel ( $h_{fLMOV}$ ) envolve perdas de cargas localizadas que são produzidas nas conexões (curvas, saídas de agua, registros) e precisam ser consideradas. Para este trabalho foi considerado um acréscimo de 10% sobre as perdas de carga inicial da linha móvel ( $h_{fILM}$ ). A **equação 6.6** demonstra o cálculo final da perda de carga na linha móvel ( $h_{fLMOV}$ ).

$$h_{fLMOV} = h_{fILM} \times 1,1 \quad (6.6)$$

Onde:

$h_{fLMOV}$  = perda de cargas na linha móvel (m.c.a)

## CÁLCULO DAS DIFERENÇAS DE NÍVEL NO TERRENO

Utilizando procedimentos no ambiente SIG e com base nos dados de altitude do SRTM, foram obtidas para cada PCP as cotas do centro do PCP (ou ponto pivô) e da maior elevação/depressão dentro da área irrigada pelo PCP. O cálculo da diferença de nível na linha móvel foi feito com a **equação 6.7**.

$$D_{nlm} = Z_{area} - Z_{ctr} \quad (6.7)$$

Onde:

$D_{nlm}$  = Diferença de nível na linha móvel (m);

$Z_{area}$  = Cota da maior elevação/depressão na área irrigada pelo PCP;

$Z_{ctr}$  = Cota de altitude do centro do PCP;

Para o cálculo do aclave/declive mais forte na área irrigada pelo PCP foi utilizada a **equação 6.8**.

$$i = D_{nlm}/R \quad (6.8)$$

Onde:

$i$  = Aclave/declive mais forte na área irrigada pelo PCP (%);

Para o cálculo da elevação/declinação da linha móvel dos PCPs foi utilizada a **equação 6.9**.

$$Z_{mov} = i \times R/100 \quad (6.9)$$

Onde:

$Z_{mov}$  = Elevação/Declinação na linha móvel (%);

## ATRIBUIÇÃO DE VALORES PARA PRESSÃO DE SERVIÇO ( $P_s$ )

A pressão de serviço ( $P_s$ ) de um pivô central deve ser suficiente para suprir a pressão no final da linha móvel para o último aspersor, acrescida da elevação/declinação do final da linha ( $Z_{mov}$ ), do diferencial atribuído as perdas de cargas localizadas ( $h_c$  -), mais a altura da linha móvel em relação ao solo ( $h_a$ ). Pela **equação 6.10** se pode calcular a pressão no final da linha móvel ( $P_{mov}$ ).

$$P_{fMOV} = P_s + Z_{mov} + h_c + h_a \quad (6.10)$$

Onde:

$P_{fMOV}$  = Pressão no final da linha móvel (m.c.a);

$P_s$  = pressão de serviço (m.c.a)

$Z_{mov}$  = elevação/declinação do final da linha móvel (%);

$h_c$  = perdas de cargas localizadas (10% de acréscimo sobre  $h_{fLMOV}$  )

$h_a$  = altura da linha móvel em relação ao solo (2,5 metros)

Como a pressão necessária para o ultimo aspersor ( $P_{mov}$ ) e a pressão de serviço ( $P_s$ ) de cada um dos 3.779 PCPs é desconhecida, as pressões de serviço ( $P_s$ ) foram atribuídas de forma aleatória. Para os PCPs com até 50 ha, supondo que fossem aplicar a irrigação do tipo LESA (*Low Elevation Spray Application*), atribuiu-se a pressão de serviço de 20 m.c.a. A **tabela 28** demonstra a forma de atribuições de pressão de serviço dependendo da área do PCP.

**Tabela 6.3.** Forma de atribuição de pressão de serviço para os 3.779 PCPs.

PCP – Área (ha)	Pressão de Serviço – Ps (m.c.a.)	Pressão de Serviço – Ps (kPa.)
25 a 50 ha	20	196
50 a 75 ha	40	392
75 a 100 ha	45	441
100 a 150 ha	50	490
150 a 175 ha	55	539
175 a 200 ha	60	588
200 a 300 ha	65	637
300 a 400 ha	70	686
400 a 600 ha	75	735
600 a 874 ha	80	784

### *PRESSÃO NO INÍCIO DA LINHA MÓVEL ( $P_{imov}$ )*

A pressão inicial da linha móvel ( $P_{imov}$ ) tem de ser suficiente para suprir a pressão no final da linha ( $P_{fMOV}$ ), acrescida das perdas de carga localizadas da linha móvel ( $h_{fLOC}$ ), conforme a **equação 6.11**.

$$P_{imov} = P_{fMOV} + h_{fLMOV} \dots \dots \dots (6.11)$$

Onde:

$P_{imov}$  = Pressão inicial da linha móvel (m.c.a);

$h_{fLMOV}$  = Perda de carga na linha móvel (m.c.a)

### *COMPRIMENTO DA ADUTORA ( $L_{ADUT}$ )*

O cálculo do **comprimento da adutora** foi feito em ambiente SIG. Foram criados pontos vetoriais nos centros dos PCPs (centróide), representando os locais das torres fixas de cada pivô, e pontos nos

locais de captação de água (vide metodologia no **Capítulo 5**). Cada par de pontos recebeu o código referente ao PCP ao qual estava relacionado. Depois foram criadas linhas vetoriais entre os pontos de mesmo código, e calculados os comprimentos dessas linhas de forma automática. O resultado foi utilizado como o comprimento da adutora ( $L_{ADUT}$ ), em metros.

#### ALTURA GEOMÉTRICA ( $H_{geo}$ )

Altura geométrica é a diferença entre as cotas do centro do pivô (ponto pivô) e do local de captação de água no corpo hídrico. Utilizando procedimentos no ambiente SIG e com base nos dados de altitude do SRTM, foram obtidas para cada PCP as cotas dos pontos de captação e do centro do PCP. Para o cálculo da altura geométrica foi utilizada a **equação 6.12**.

$$H_{geo} = Z_{ctr} - Z_{capt} \dots \dots \dots (6.12)$$

Onde:

$H_{geo}$  = Altura geométrica (m);

$Z_{ctr}$  = Cota de altitude do centro do PCP;

$Z_{capt}$  = Cota de altitude do ponto de captação de água;

#### VELOCIDADE DE ESCOAMENTO E DIÂMETRO DAS ADUTORAS ( $D_{ADUT}$ )

O primeiro parâmetro que foi definido para se calcular os diâmetros das adutoras foi a velocidade permitida média da água ( $V_{ADUT}$ ). Foram definidos valores aleatórios de velocidade média para as adutoras, com base nas áreas irrigadas de cada PCP, buscando-se a menor velocidade econômica possível que resultasse em diâmetros existentes e comerciais para tubulações adutoras ( $D_{ADUT}$ ). A **tabela 29** demonstra a forma de atribuições de velocidade média dependendo da área de cada PCP.

**Tabela 6.4.** Forma de atribuição de velocidade média permitida para os 3.779 PCPs.

PCP – Área (ha)	Velocidade média ( $V_{ADUT}$ )
25 a 50 ha	0,62 m.s <sup>-1</sup>
50 a 500 ha	1,5 m.s <sup>-1</sup>
506 ha	1,6 m.s <sup>-1</sup>
525 a 556 ha	1,7 m.s <sup>-1</sup>
567 ha	1,8 m.s <sup>-1</sup>
591 a 601 ha	1,9 m.s <sup>-1</sup>
615 a 874 ha	1,97 m.s <sup>-1</sup>

Uma vez definida a velocidade permitida média da água, pode-se calcular a área da tubulação adutora necessário para suportar a vazão do pivô na velocidade média determinada pela **equação 6.13**.



$$A_{ADUT} = \frac{Q}{V_{ADUT}} \dots \dots \dots (6.13)$$

Onde:

$A_{ADUT}$  = Área da adutora (m<sup>2</sup>);

$Q$  = Vazão do sistema (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>);

$V_{ADUT}$  = Velocidade média permitida (m.s<sup>-1</sup>)

A partir da área da adutora ( $A_{ADUT}$ ) se pode calcular o diâmetro aproximado da adutora com a **equação 6.14**.

$$D_{ADUT} = \left( \frac{A_{ADUT} \times 4}{\pi} \right)^{0,5} \dots \dots \dots (6.14)$$

Onde:

$D_{ADUT}$  = Diâmetro aproximado da adutora (m);

O diâmetro da adutora efetivamente utilizado foi o diâmetro existente de tubulações imediatamente superior ao valor encontrado para  $D_{ADUT}$ . A **tabela 6.5** demonstra os diâmetros calculados dependendo da área de cada PCP.

**Tabela 6.5** – Diâmetros de adutoras utilizados relacionados às áreas de PCPs.

PCP – Área (ha)	Diâmetros de adutoras ( $D_{ADUT}$ )
25 a 50 ha	50, 100, 150, 180, 200, 250 ou 300 mm
50 a 75 ha	300 ou 350 mm
75 a 100 ha	350 ou 400 mm
100 a 150 ha	400, 450 ou 500 mm
150 a 175 ha	500 ou 550 mm
175 a 200 ha	550 mm
200 a 300 ha	550 ou 600 mm
300 a 630 ha	600 mm
790 a 874 ha	650 mm

*PERDAS DE CARGA NA ADUTORAS ( $h_{fADUT}$ )*

Para cálculo da perda de carga nas adutoras dos PCPs, utilizou-se a fórmula de Hazen-Williams, conforme se segue na **equação 6.15**.

$$h_{fADUT} = \left( 10,643 \times (Q)^{1,85} \times \left( \frac{D_{ADUT}}{1000} \right)^{-4,87} \times (C)^{-1,85} \right) \times L_{ADUT} \quad (6.15)$$

Onde:

$h_{fADUT}$  = Perda de carga na adutora (m.c.a);

$Q$  = Vazão do sistema ( $m^3.s^{-1}$ );

$C$  = coeficiente de rugosidade do aço galvanizado (120);

$D_{ADUT}$  = Diâmetro da tubulação adutora (mm);

$L_{ADUT}$  = Comprimento da adutora (m)

**ALTURA MANOMÉTRICA ( $H_{man}$ )**

O cálculo da altura manométrica ( $H_{man}$ ) dos PCPs foi feito de forma simplificada, pois foi considerada uma altura de sucção ( $h_{suc}$ ) padrão de 5 metros para todos PCPs e não foram consideradas as perdas de carga das estações de bombeamento (motobombas). A **equação 6.16** demonstra a forma de cálculo das alturas manométricas dos PCPs na BARSAM.

$$H_{man} = H_{geo} + h_{fADUT} + h_{fLMOV} \quad (6.16)$$

Onde:

$H_{man}$  = Altura manométrica (m.c.a);

$H_{geo}$  = Altura geométrica (m);

$h_{fADUT}$  = Perda de carga na adutora (m.c.a)

$h_{fLMOV}$  = Perda de carga na linha móvel (m.c.a)

**POTÊNCIA DA MOTOBOMBA ( $Pot$ )**

O cálculo da potência das motobombas dos 3.779 PCPs foi feito de forma simplificada, pois cada conjunto de motor elétrico acoplado a uma bomba terá um rendimento diferente, dependendo de como variam todos os parâmetros cujos cálculos foram demonstrados nesta metodologia. Assim, utilizou-se o mesmo rendimento da bomba no cálculo das potências de todos os PCPs, o qual é demonstrado na **equação 6.17**.

$$Pot = \left( \frac{Q \times H_{man}}{75 \times \eta} \right) \times \Omega \quad (6.17)$$

Onde:

$Pot$  = Potência da motobomba (cv);

$Q$  = Vazão do sistema ( $L.s^{-1}$ );

$H_{man}$  = Altura manométrica (m.c.a)

$n$  = Rendimento da bomba (75%)

$\Omega$  = Acréscimo de 10% na potência (1,1)

## 6.2.2. TABELA RESUMO DOS CENÁRIOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

Nove simulações de irrigação por pivô central foram feitas na BARSAM. A **Tabela 6.6** resume os parâmetros envolvidos em cada simulação. O balanço hídrico foi feito com a ferramenta computacional criada pela Coordenação de Estudos Hidrológicos da Agência Nacional de Águas (COHID/SPR/ANA). As simulações **A** e **B** envolvem apenas os PCPs, onde a primeira utiliza  $Q_{95_{100 \text{ dias}}}$  como parâmetro de entrada de disponibilidade hídrica, enquanto a segunda utiliza reservatórios virtuais como reforço na disponibilidade hídrica (**tabela 6.1**). A simulação **C** **figura 6.5** retrata como seria a BARSAM se a máxima expansão de PCPs na bacia fosse atingida, caso oferta de água não fosse um problema. As simulações **D**, **E**, **F**, **G**, **H** e **I** sempre envolvem PCEs e PCPs, e os cenários se alternam quanto à disponibilidade hídrica, sendo ora a  $Q_{95_{100 \text{ dias}}}$ , ora os reservatórios virtuais (**tabela 6.1**). Mais ainda, os PCPs dos cenários das simulações **F** e **G** são restritos aos que têm motobombas de até **300 cv**, enquanto os dos cenários das simulações **H** e **I** são restritos aos que têm motobombas de até **150 cv**.

**Tabela 6.6.** Códigos e descrições dos tipos de simulações.

Código da Simulação	Categoria de Pivô Central	Demanda Hídrica	Disponibilidade Hídrica utilizada no Balanço	Tipo de Restrição
<b>A</b>	PCEs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	$Q_{95_{100 \text{ dias}}}$	Sem restrição
<b>B</b>	PCEs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	Referencial à Curva de Permanência ( <b>tabela 6.1</b> )	Sem restrição
<b>C</b>	PCEs + PCPs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	Sem Balanço Hídrico	Sem restrição
<b>D</b>	PCEs + PCPs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	$Q_{95_{100 \text{ dias}}}$	Sem restrição
<b>E</b>	PCEs + PCPs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	Referencial à Curva de Permanência ( <b>tabela 6.1</b> )	Sem restrição
<b>F</b>	PCEs + PCPs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	$Q_{95_{100 \text{ dias}}}$	Potência da motobomba até 300cv
<b>G</b>	PCEs + PCPs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	Referencial à Curva de Permanência ( <b>tabela 6.1</b> )	Potência da motobomba até 300cv
<b>H</b>	PCEs + PCPs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	$Q_{95_{100 \text{ dias}}}$	Potência da motobomba até 150cv
<b>I</b>	PCEs + PCPs	Necessidade Hídrica do Milho de safra de inverno	Referencial à Curva de Permanência ( <b>tabela 6.1</b> )	Potência da motobomba até 150cv

### 6.2.3. DEFINIÇÃO DO CENÁRIO DE AMPLIAÇÃO DE IRRIGAÇÃO MAIS PROVÁVEL E SEUS EFEITOS SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA PELA UHE BATALHA

Tendo em vista que a média de área irrigada dos PCEs é de 82,5 ha, e que é comum estações de bombeamento serem formadas por dois conjuntos motobombas em linha de 150 cv cada, totalizando 300 cv, pode-se considerar que o cenário com mais chances de acontecer no futuro, do ponto de vista de uma ampliação de irrigação por pivôs centrais na BARSAM técnica e economicamente viável, será aquele que propiciar a maior área irrigada por pivôs centrais com média de área em torno de 82,5 ha ou maior, e com necessidade de potência de bombeamento de até 300 cv.

De forma a estender a simulação de ampliação de irrigação para inferir seus efeitos sobre a geração de energia pela UHE Batalha, a quantidade de água demandada pelas necessidades hídricas do milho no cenário que reúne a maior extensão de terras irrigadas, foi sobreposta ao período crítico do sistema elétrico brasileiro (junho de 1949 a novembro de 1956).

## 6.3. RESULTADOS

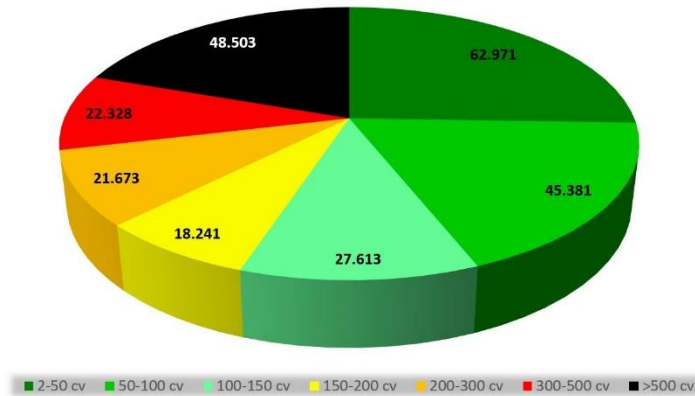
### 6.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS PCPS POR CLASSE DE POTÊNCIA DE MOTOBOMBA

A **Tabela 6.7** relaciona as classes de potência da motobomba com a área irrigada, distância de captação e potência. A **Figura 6.1** representa a soma das áreas de cada classe da **tabela 6.7**. A **figura 6.2** demonstra variabilidade de área de PCPs dentro de cada classe de potência necessária das motobombas. Na **figura 6.2** as caixas nas partes de baixo e de cima representam os primeiros e terceiros quartis de cada classe, enquanto as bandas entre essas duas caixas representam o segundo quartil (ou a mediana). As linhas verticais (*whiskers*) das partes superiores representam os maiores PCPs, enquanto as das partes inferiores representam os menores PCPs de cada classe. Os espaços entre as diferentes partes de cada caixa indicam o grau de dispersão e assimetria entre os PCPs quanto as suas áreas.

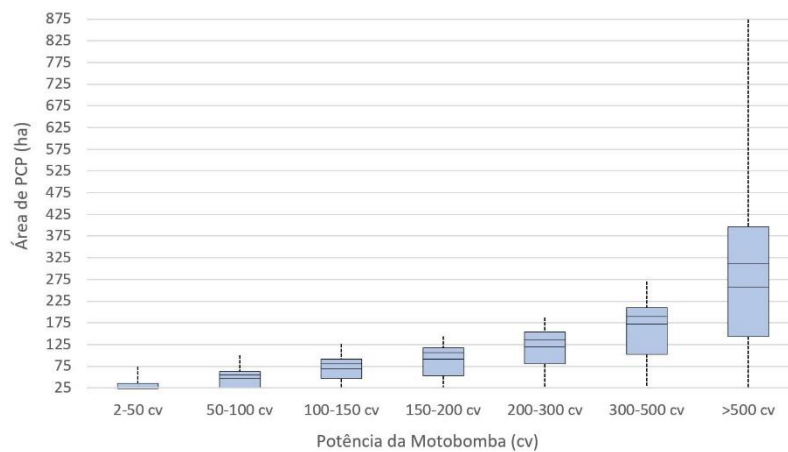
**Tabela 6.7.** Medidas dos PCPs por classes de potência necessária da motobomba.

Classe de PCP por Potência da Motobomba (cv)	Total de PCPs	Área do PCP (ha)			Distância de Captação (m)			Potência (cv)		
		Max.	Med.	Min.	Max.	Med.	Mín.	Max.	Med.	Min.
2 – 50	2033	86	32	25	11.195	1.417	24	50	29	2
50 – 100	820	109	59	25	11.283	1.814	428	100	71	50,1
100 – 150	<b>340</b>	132	<b>87</b>	46	10.184	2.121	707	150	<b>121</b>	100
150 – 200	<b>173</b>	149	<b>111</b>	53	7.008	2.168	757	199	<b>172</b>	150
200 – 300	<b>159</b>	206	<b>145</b>	96	8.868	2.122	808	299	<b>245</b>	200

300 – 500	118	271	194	102	9.017	2.518	867	497	376	302
>500	136	874	365	144	8.543	3.018	1.214	10000	1525	500



**Figura 6.1.** Áreas irrigadas para cada classe de necessidade de potência de motobomba (em hectares) da **tabela 6.7**.



**Figura 6.2.** Grau de dispersão e assimetria de áreas de PCPs para cada classe de potência necessária para motobombas.

### 6.3.2. SIMULAÇÕES DE AMPLIAÇÃO DE IRRIGAÇÃO

Cada simulação foi referenciada por seu código (**Tabela 6.6**). As **Figuras 6.3** até **6.11** apresentam os mapas das simulações, demonstrando a configuração espacial dos PCEs e PCPs sobre o relevo sombreado da imagem SRTM. A simulação **A** apresenta um cenário com déficit hídrico para o milho em 636 PCEs (56.460 ha), considerando o intervalo de 90%-100% de atendimento na demanda hídrica em 637 PCEs (47.713 ha) (**figura 6.3**). A **simulação B** demonstra um cenário que ocorre aumento na disponibilidade hídrica devido à presença virtual de reservatórios nas regiões com até 500 km<sup>2</sup> (**Figura 6.4** e **tabela 6.1**). A simulação **C**, na qual não foi feito balanço hídrico, demonstra a configuração espacial de pivôs na BARSAM com uma ampliação máxima de PCPs (considerando apenas as terras adequadas à irrigação por pivô central) (**figura 6.5**). A simulação **D** adotou a  $Q_{95,100 \text{ dias}}$  como disponibilidade hídrica para irrigação do milho da safra de inverno para 637 **PCEs** (47.713 ha) e 2.024

PCPs (107.056 ha), considerando um intervalo 90% - 100% de atendimento das necessidades hídricas (Figura 6.6).

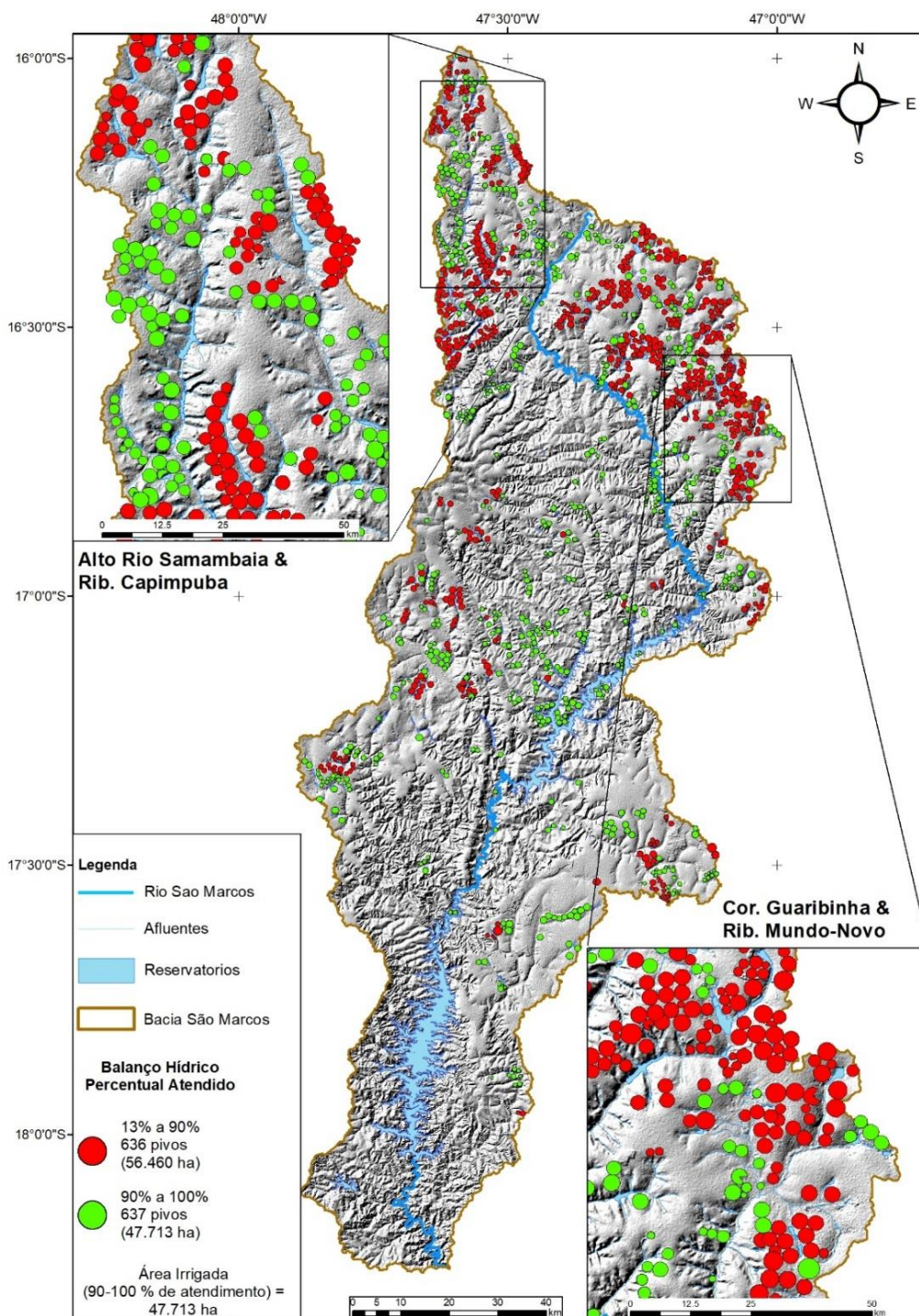
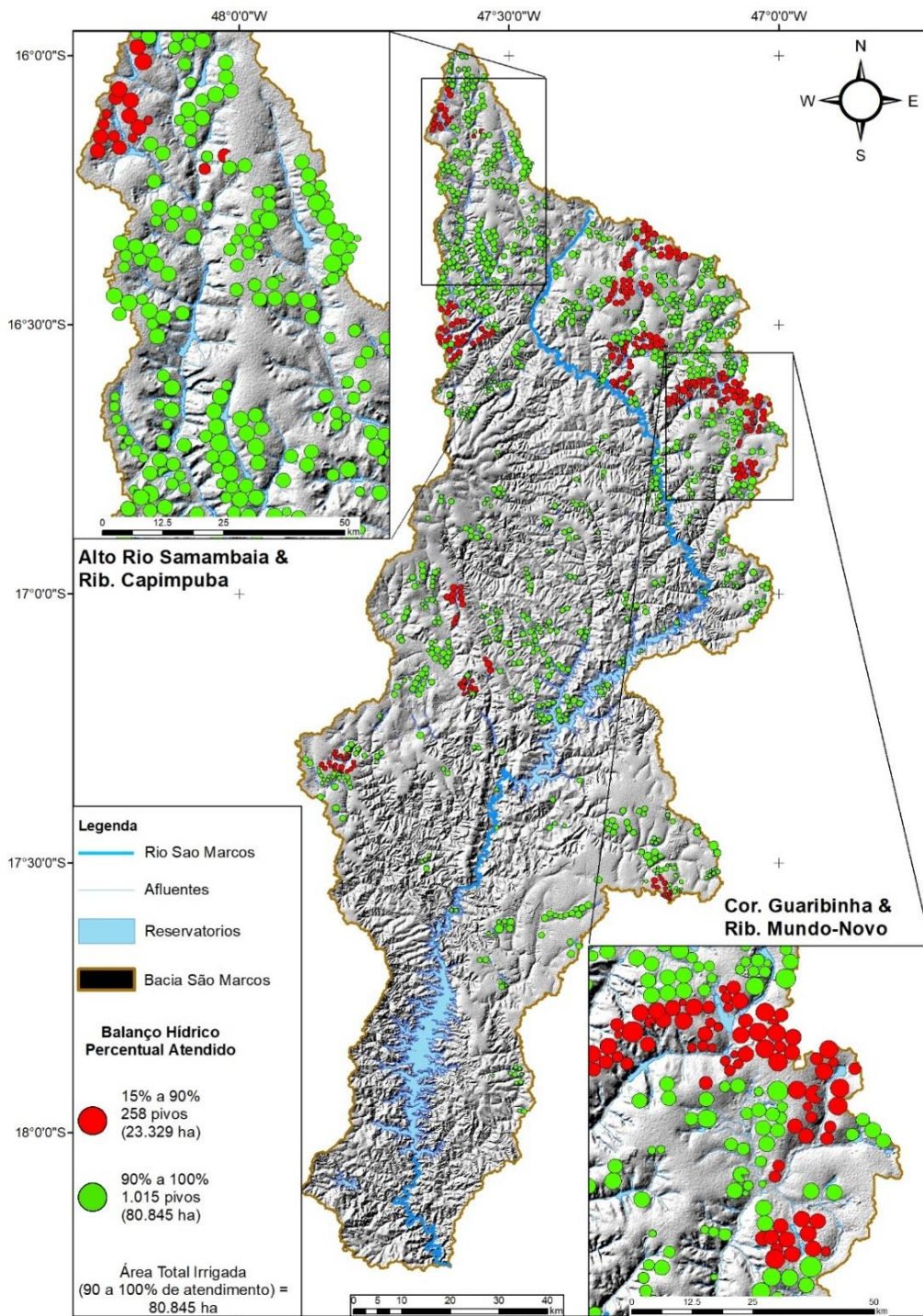
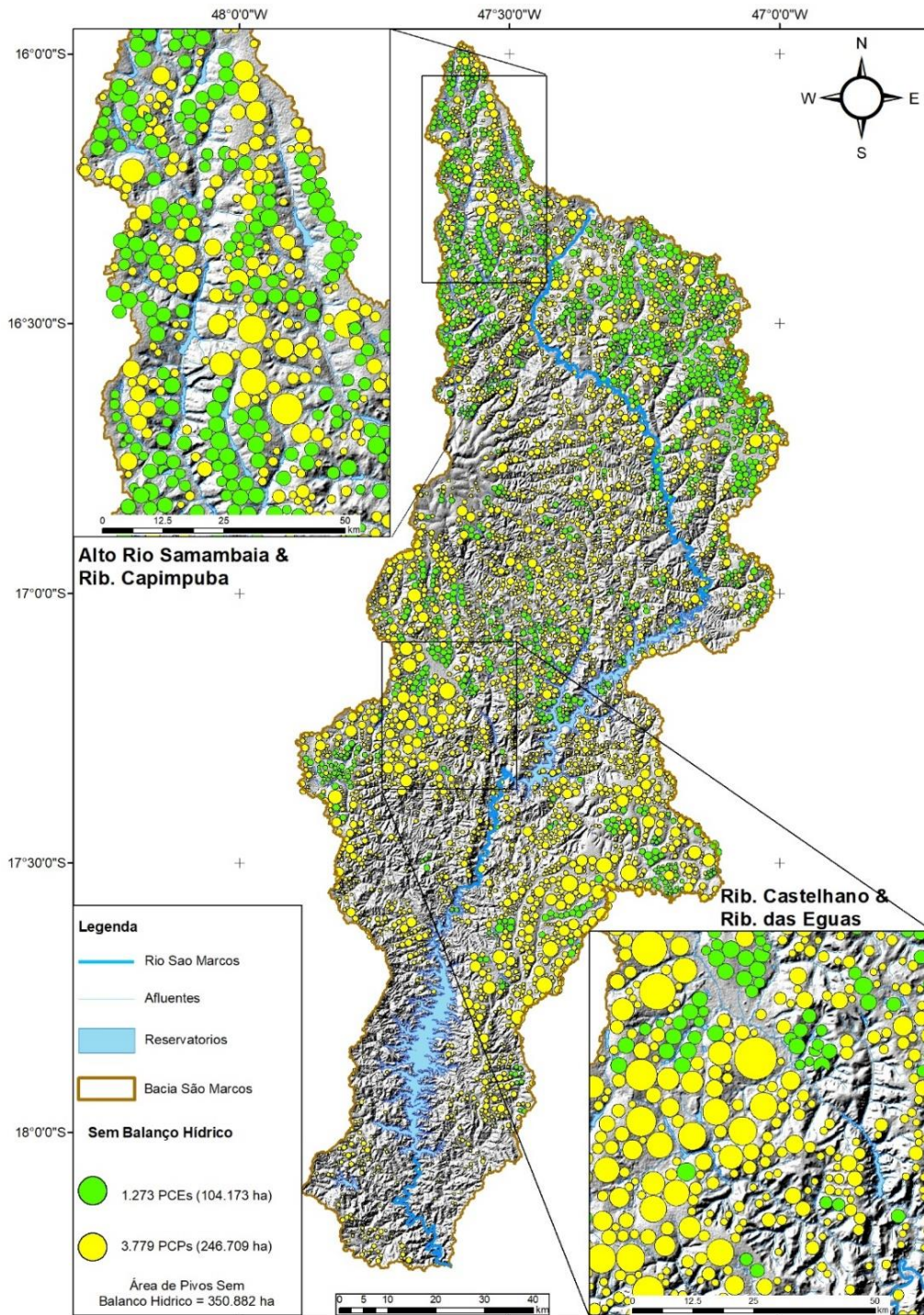


Figura 6.3. Resultado da simulação A. Na hipotética irrigação de milho na safra de inverno por todos os PCEs ao mesmo tempo, utilizando a  $Q_{95_{100 \text{ dias}}}$  como disponibilidade hídrica, haveria entre 87% e 11% de déficit hídrico no milho em 636 PCes (56.460 ha), e entre 90 e 100% de atendimento da demanda hídrica em 637 PCes (47.713 ha).

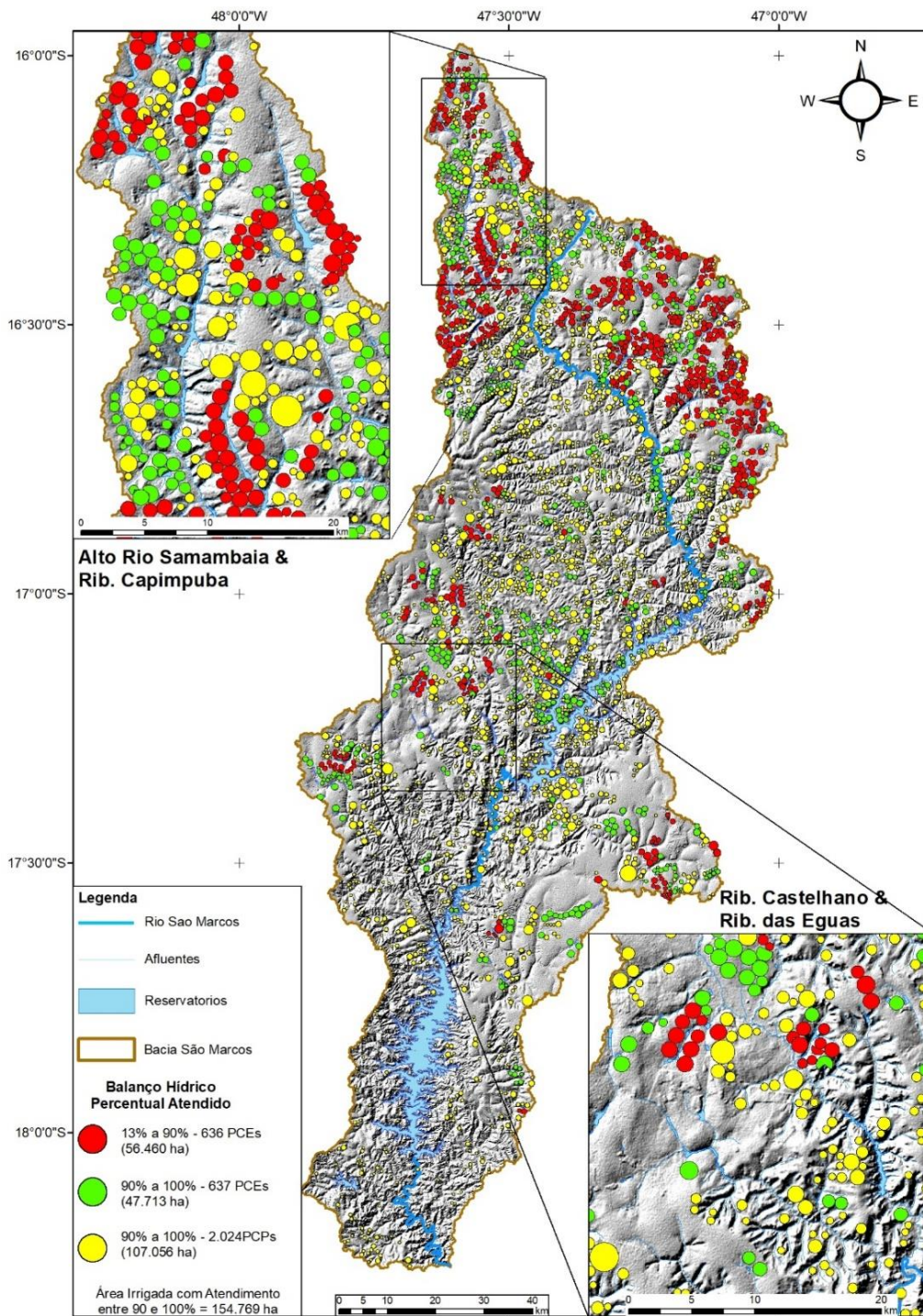


**Figura 6.4.** Resultado da **simulação B**. Cenário com simulação de reservatórios em ottobacias com até 500 km<sup>2</sup> de área de drenagem a montante (propostos na **tabela 31**). A irrigação simultânea de milho na safra de inverno poderia ocorrer em 1.015 PCEs (80.845 ha), com 90% a 100% de atendimento das necessidades hídricas da cultura.



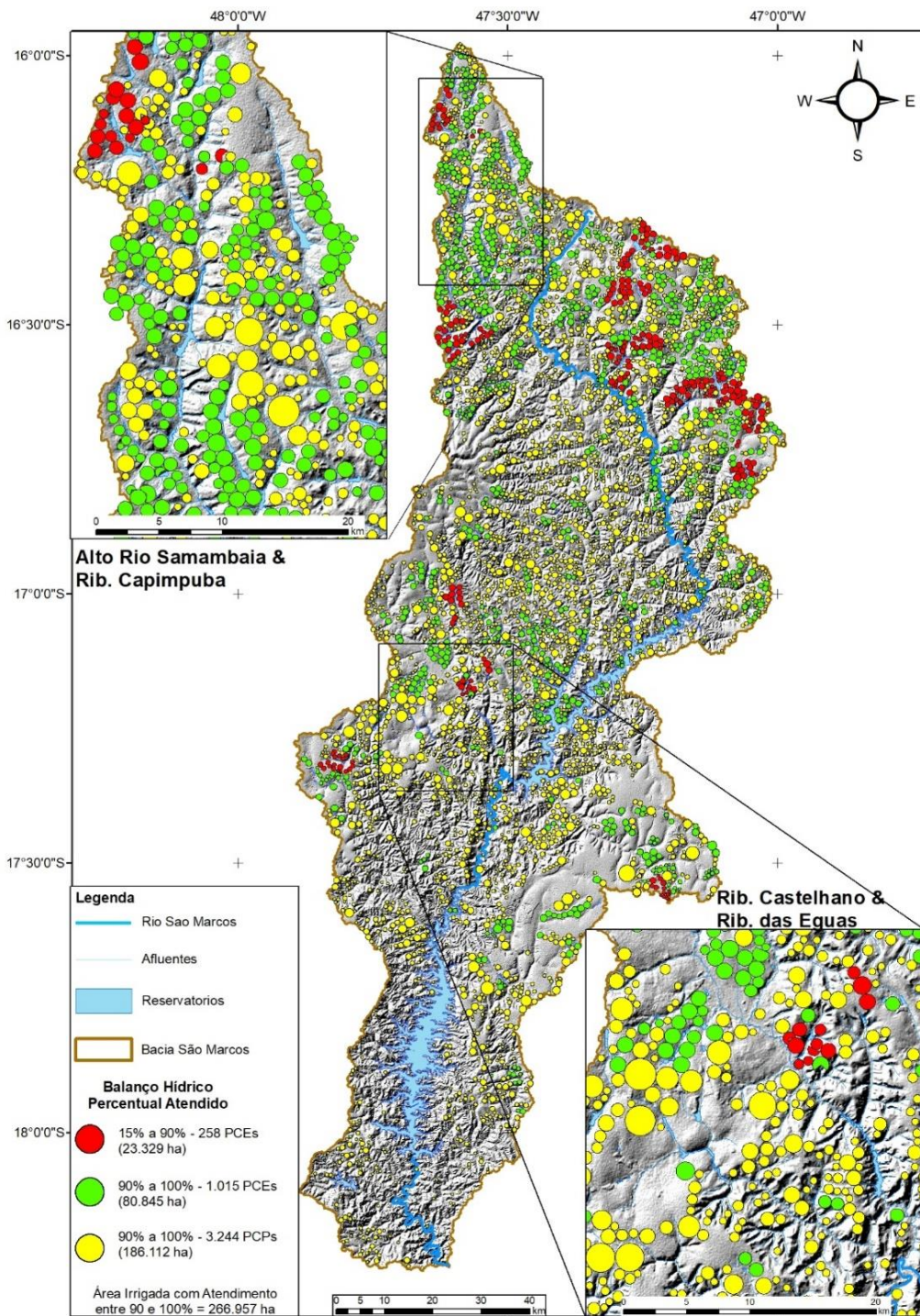
**Figura 6.5** –Resultado da **simulação C**. Se a água não fosse um fator limitante para ampliação da irrigação na BARSAM, existem áreas propícias à instalação de 3.779 PCPs (246.709 ha - vide **capítulo 5**), chegando a um total de 350.882 ha e 5.052 pivôs centrais (soma de PCEs e PCPs).





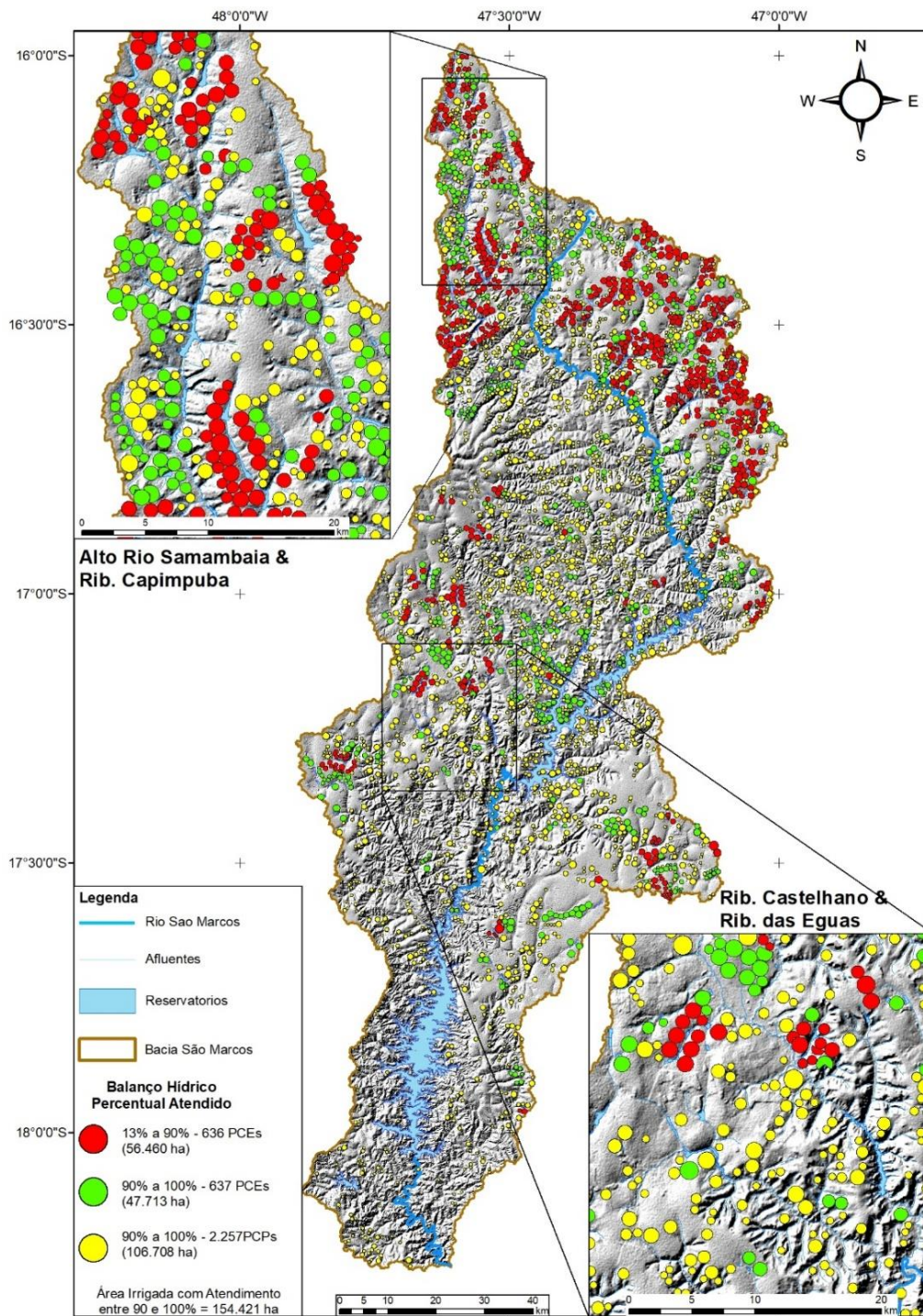
**Figura 6.6** – Mapa com os resultados da **simulação D**. Aplicando a  $Q95_{100}$  dias como disponibilidade hídrica para a safra de inverno, em irrigação simultânea de milho nos 5.052 pivôs centrais (PCEs + PCPs), essa cultura teria entre 90% e 100% de suas necessidades hídricas atendida em 2.661 pivôs centrais, ou 154.769 ha (PCEs + PCPs). Os círculos vermelhos representam os PCEs que sofreriam algum déficit hídrico maior do que 10% se todos os PCEs irrigassem milho ao mesmo tempo durante a safra de inverno, conforme figura 6.3.

A simulação **E** apresenta os reservatórios virtuais nas regiões com até 500 km<sup>2</sup> de área a montante (**Figura 6.7** e **Tabela 6.1**). A irrigação de milho no inverno em todos **PCEs** e **PCPs**, sofreria déficit hídrico em 258 PCEs (23.329 ha), enquanto haveria atendimento de 90 a 100% da demanda hídrica em 1.015 **PCEs** (80.845 ha) e em 3.244 **PCPs** (186.112 ha).



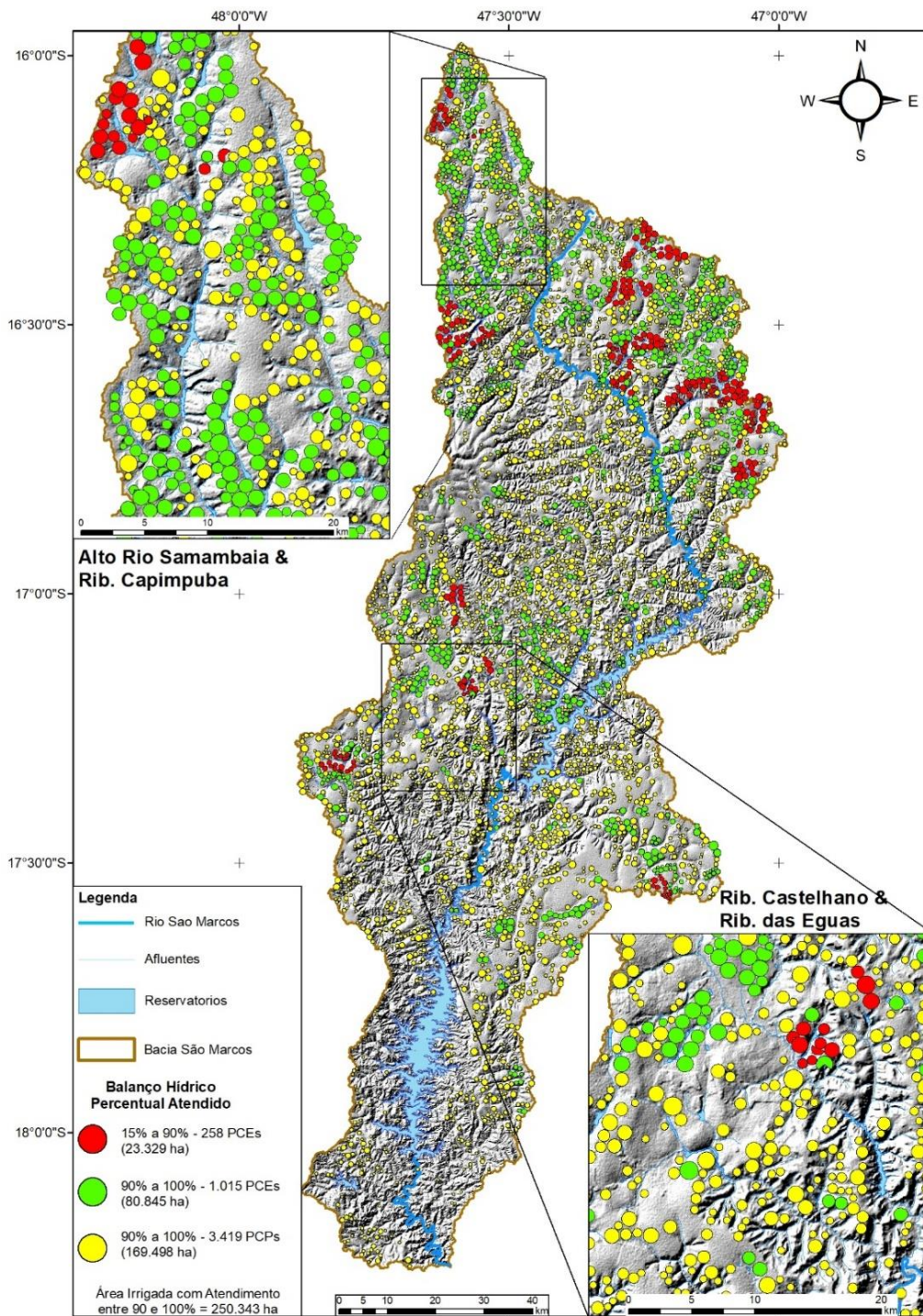
**Figura 6.7.** Mapa com os resultados da **simulação E**. Aplicando-se o balanço hídrico simulando a oferta de água proporcionada por reservatórios (vide **tabela 6.1**) e a demanda de irrigação simultânea de milho, o potencial total de irrigação nessas condições seria de 266.956 ha com atendimento da demanda hídrica do milho entre 90 e 100%. Os círculos vermelhos representam os PCEs que sofreriam algum déficit hídrico maior do que 10% se todos os PCEs irrigassem milho ao mesmo tempo durante a safra de inverno, conforme figura 6.4.

A **Figura 6.8** exibe os resultados da **simulação F**, com a  $Q_{95_{100 \text{ dias}}}$  como disponibilidade hídrica para irrigação de milho de inverno para **PCEs** e **PCPs** com motobombas com potência de até **300 cv**. Nesse cenário ocorreria entre déficit hídrico em 636 **PCEs** (56.460 ha), e entre 90 e 100% de atendimento da demanda hídrica de 637 **PCEs** (47.713 ha) e em 2.257 **PCPs** (106.708 ha).



**Figura 6.8.** Mapa com os resultados da **simulação F**. Aplicando a  $Q_{95,100 \text{ dias}}$  como disponibilidade hídrica na safra de inverno, em irrigação simultânea de milho somente nos 3.525 PCPs com potência na motobomba de até 300 cv, haveria 2.257 PCPs (106.708 ha) e 637 PCEs (47.713 ha). Os círculos vermelhos representam os PCEs que sofreriam algum déficit hídrico maior do que 10% se todos os PCPs irrigassem milho ao mesmo tempo durante a safra de inverno, conforme figura 6.3

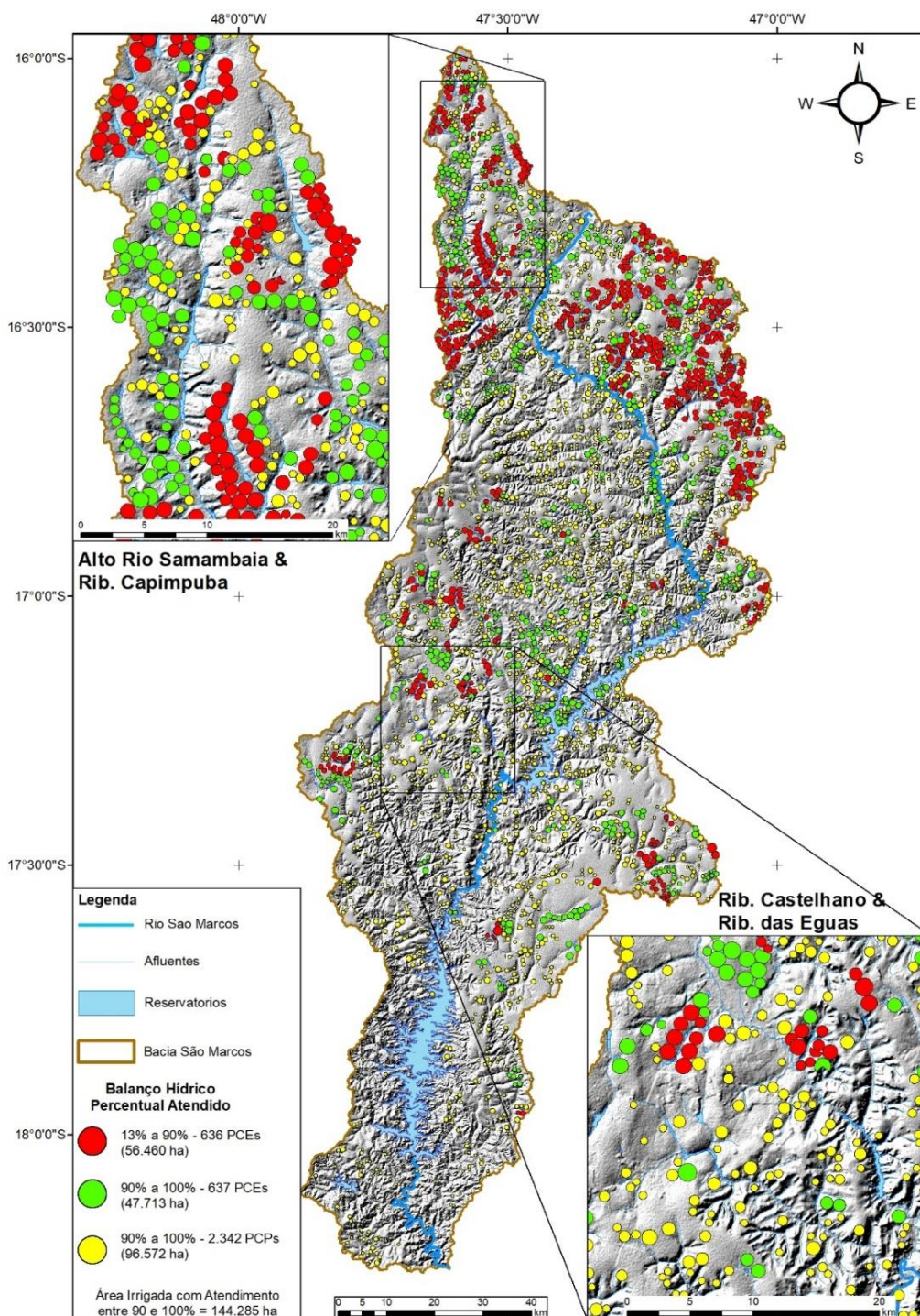
A **figura 6.9** exibe os resultados da **simulação G**, em um cenário com reservatórios virtuais (vide **tabela 6.1**). Aqui todos **PCEs** e apenas os **PCPs** com motobombas com potência de até **300 cv**, ocorreria déficit hídrico em 258 **PCEs** (23.329 ha), e atendimento de 90 a 100% da demanda hídrica do milho em 1.015 **PCEs** (80.845 ha) e em 3.419 **PCPs** (169.498 ha).



**Figura 6.9** - Mapa com os resultados da **simulação G**. Restringindo os PCPs aos que necessitam de potência de bombeamento de no máximo **300 cv**, e com oferta de água proporcionada por reservatórios virtuais (vide **tabela 6.1**), o potencial total de irrigação do milho nessas condições seria de 250.343 ha atendendo entre 90 e 100 % da demanda hídrica do milho. Os círculos vermelhos representam os PCEs que sofreriam algum déficit hídrico maior do que 10% se todos os PCEs irrigassem milho ao mesmo tempo durante a safra de inverno, conforme figura 6.4.

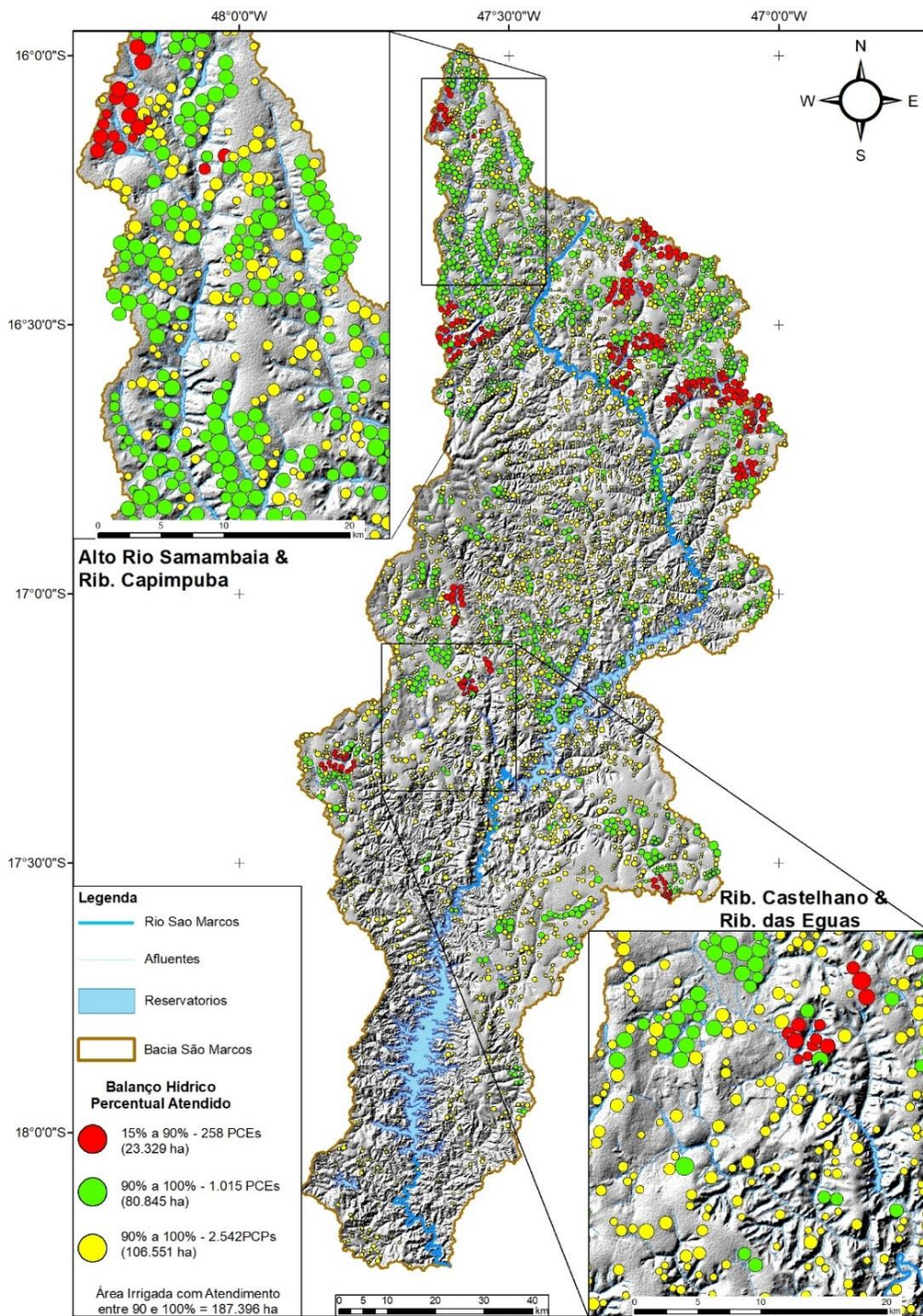
A **figura 6.10** exibe os resultados da **simulação H**, em cenário com a  $Q_{95_{100}}$  dias como disponibilidade hídrica, na qual foram utilizados apenas os **PCPs** com motobombas com potência de até **150 cv**. Nesse cenário ocorreria déficit hídrico no milho de 636 **PCEs** (56.460 ha), e entre 90 e

100% de atendimento da demanda hídrica do milho em 637 PCEs (47.713 ha) e em 2.342 PCPs (90.572 ha).



**Figura 6.10.** Mapa com os resultados da **simulação H**. Aplicando a  $Q_{95_{100}}$  dias com disponibilidade hídrica na safra de inverno, em irrigação simultânea de milho somente nos PCPs com potência na motobomba de até 150 cv, haveria 2.342 PCPs (96.572 ha) e 637 PCEs capazes de atender entre 90% a 100% das necessidades hídricas do milho. Quando somados esses PCPs e PCEs, a área total irrigada seria de 144.285 ha em 2.979 pivôs centrais. Os círculos vermelhos representam os PCEs que sofreriam algum déficit hídrico maior do que 10% se todos os PCEs irrigassem milho ao mesmo tempo durante a safra de inverno, conforme figura 6.3.

A **figura 6.11** exibe os resultados da **simulação I**, com reservatórios virtuais (vide **tabela 31**).

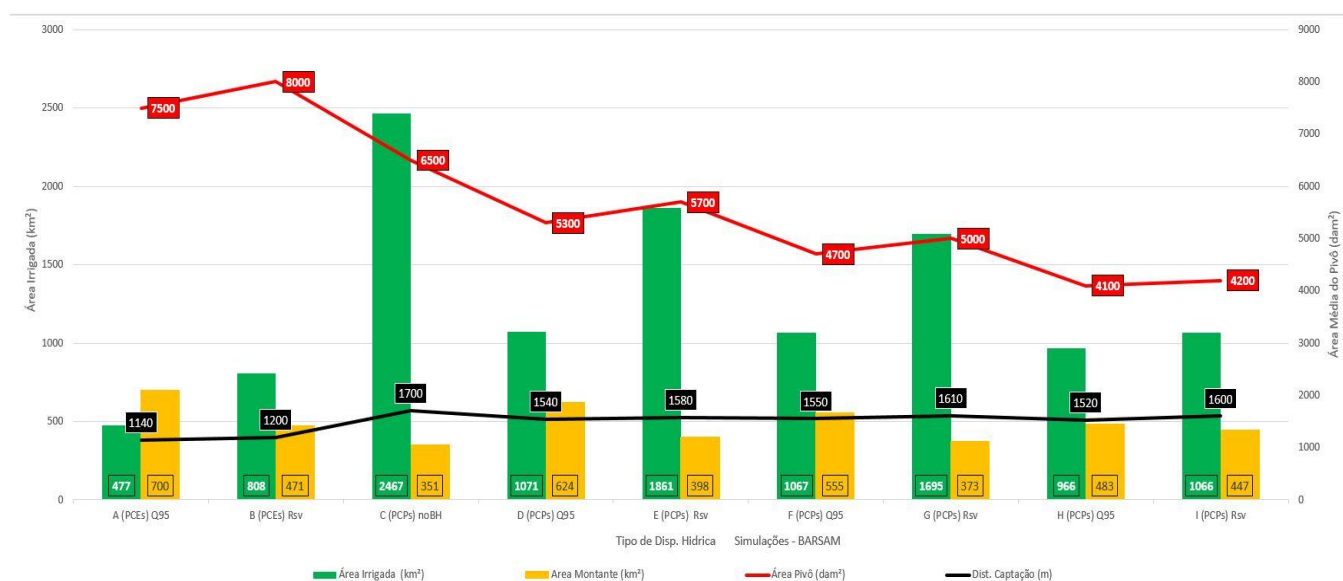


**Figura 6.11.** Mapa com os resultados da **simulação I**. Restringindo os PCPs aos que necessitam de potência de bombeamento de até **150 cv**, e aplicando-se o balanço hídrico simulando a oferta de água proporcionada por reservatórios (vide **tabela 31**) e a irrigação simultânea de milho na safra de inverno, o potencial total de irrigação nessas condições seria de 187.396 ha considerando o atendimento entre 90 e 100% da demanda hídrica do milho. Os círculos vermelhos representam os PCEs que sofreriam algum déficit hídrico maior do que 10% se todos os PCEs irrigassem milho ao mesmo tempo durante a safra de inverno, conforme figura 6.4.

### *SIMULAÇÕES DE AMPLIAÇÕES DE IRRIGAÇÃO EM GRÁFICOS*

A **Figura 6.12** demonstra o comparativo entre as características dos **PCEs** e **PCPs** resultantes dos cenários envolvidos em cada uma das simulações, considerando os atributos: área total irrigada (em

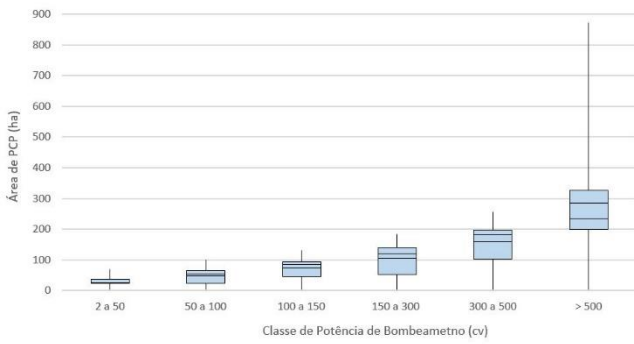
km<sup>2</sup>) x área média dos pivôs (em dam<sup>2</sup> - onde 1 dam<sup>2</sup> equivale a 100 m<sup>2</sup> ou 0,01 ha) x distância média da captação (em m) x área a montante (em km<sup>2</sup>). Na **Figura 6.12**, o eixo horizontal indica os códigos das simulações e os tipos de disponibilidades hídricas utilizadas nos balanços hídricos em cada simulação, onde **PCEs** são os valores referentes somente aos PCEs; **PCPs** são os valores referentes somente aos PCPs; **Q95** é vazão de referência à curva de permanência com 95% de garantia para os 100 dias; **Rsv** é a disponibilidade hídrica proporcionada por reservatórios virtuais com características de tamanho e localização na BARSAM (**tabela 6.1**); e **noBH** é a simulação sem balanço hídrico.



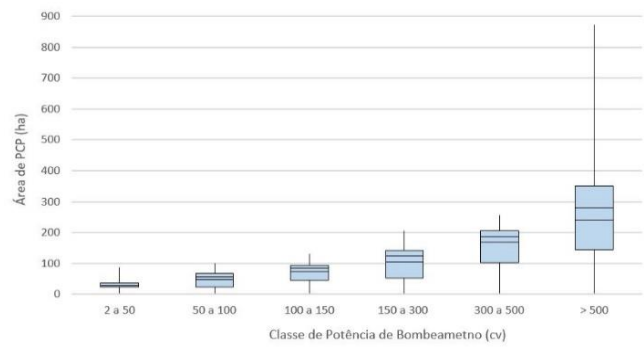
**Figura 6.12.** Comparações entre as 9 (nove) simulações em: área total irrigada x área média dos pivôs x distância média da captação x área a montante.

A **Figura 6.13** demonstra os graus de dispersão e de assimetria entre as áreas dos PCPs (ha) para cada classe de potência necessária para bombeamento da água (cv), em cada uma das simulações que envolveram cenários com cálculo de balanço hídrico e PCPs. Cada parte da **Figura 6.13** denota apenas os pivôs com atendimento de 100% da demanda do milho em no mínimo 90% da área do pivô.

6.13a – Simulação D

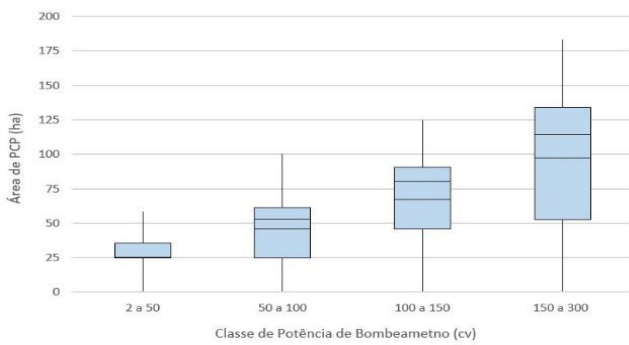


6.13b - Simulação E

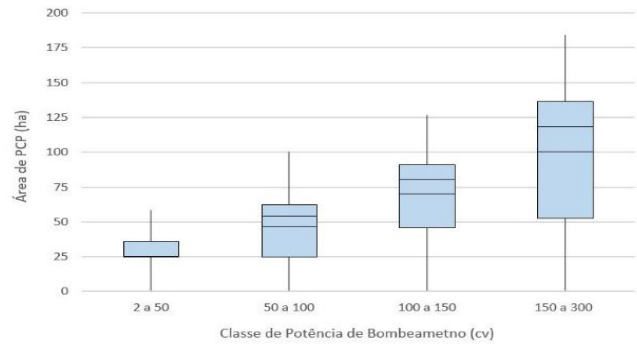


Pot. (cv)	2 a 100	100 a 150	150 a 300	> 300	Pot. (cv)	2 a 100	100 a 150	150 a 300	> 300
PCPs	1.694	145	118	67	PCPs	2.635	243	229	137
Área (ha)	63.658	12.284	14.458	16.268	Área (ha)	102.797	20.770	28.571	33.974
Média (ha)	38	84	121	243	Média (ha)	61	85	124	248

6.13c – Simulação F

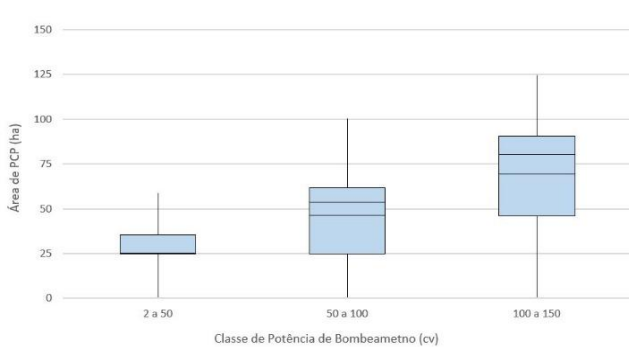


6.13d - Simulação G

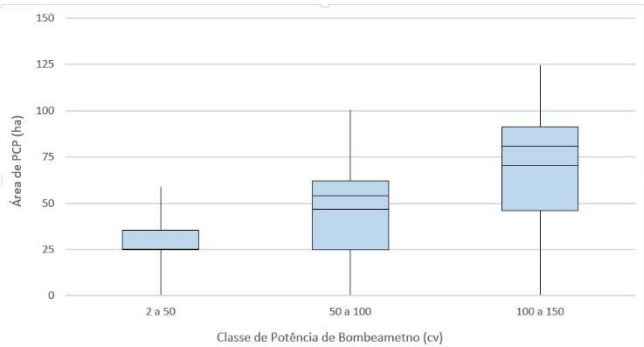


Pot. (cv)	2 a 100	100 a 150	150 a 300	> 300	Pot. (cv)	2 a 100	100 a 150	150 a 300	> 300
PCPs	1.875	191	191	0	PCPs	2.772	332	315	0
Área (ha)	69.186	15.251	22.271	0	Área (ha)	102.797	<b>26.955</b>	<b>37.653</b>	0
Média (ha)	37	80	114	0	Média (ha)	31	80	118	0

6.13e – Simulação H



6.13f - Simulação I

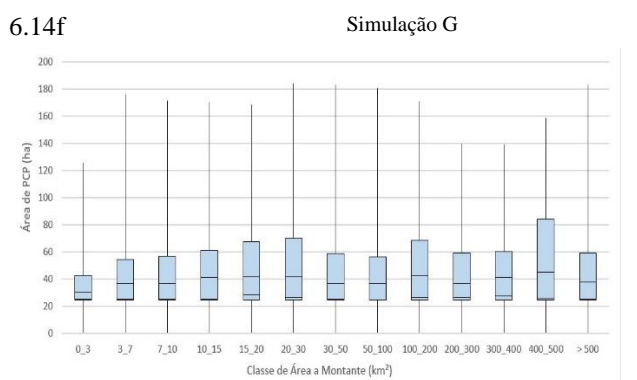
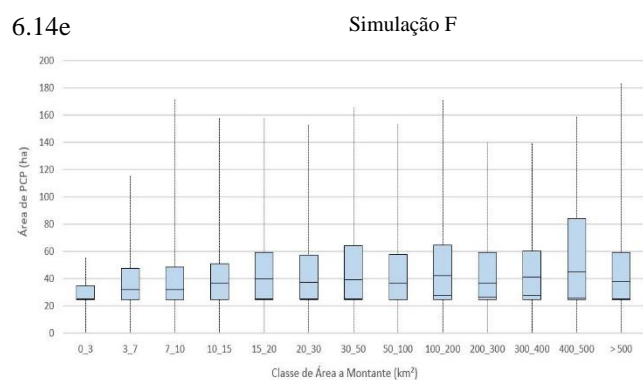
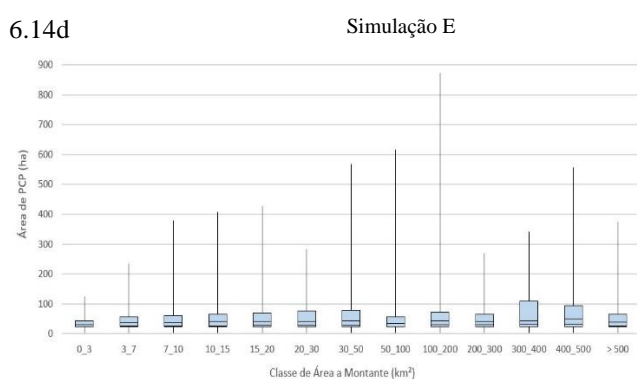
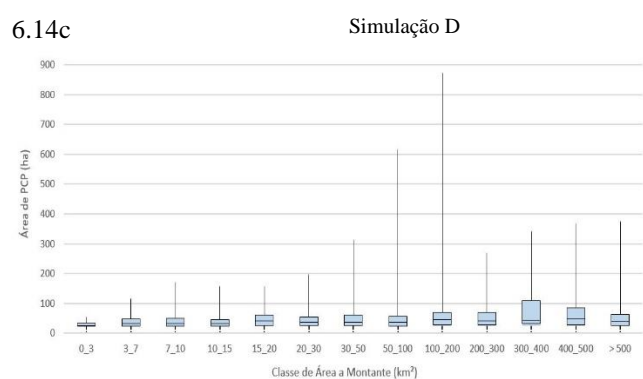
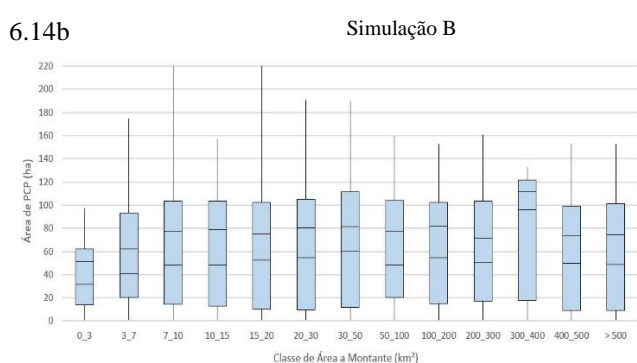
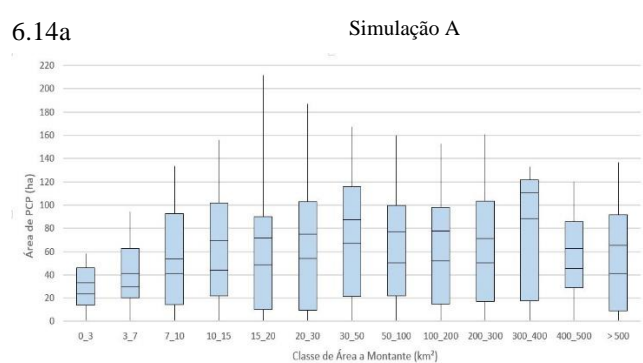


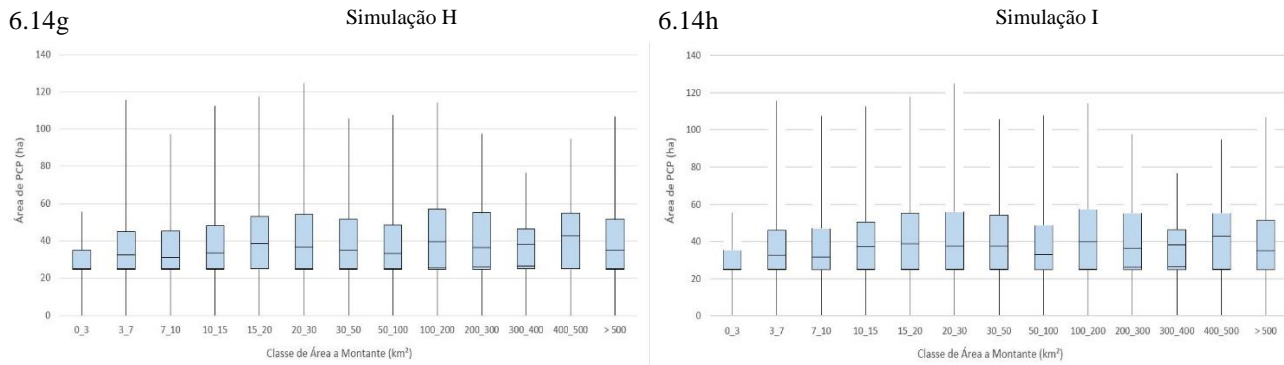
Pot. (cv)	2 a 100	100 a 150	150 a 300	> 300	Pot. (cv)	2 a 100	100 a 150	150 a 300	> 300
PCPs	2.121	221	0	0	PCPs	2.284	258	0	0
Área (ha)	69.186	17.756	0	0	Área (ha)	102.797	20.907	0	0
Média (ha)	37	80	0	0	Média (ha)	37	81	0	0

**Figura 6.13.** Gráficos de graus de dispersão e de assimetria entre as áreas dos PCPs (ha) para cada classe de potência necessária para bombeamento da água (cv), em cada uma das simulações que utilizaram balanço hídrico.



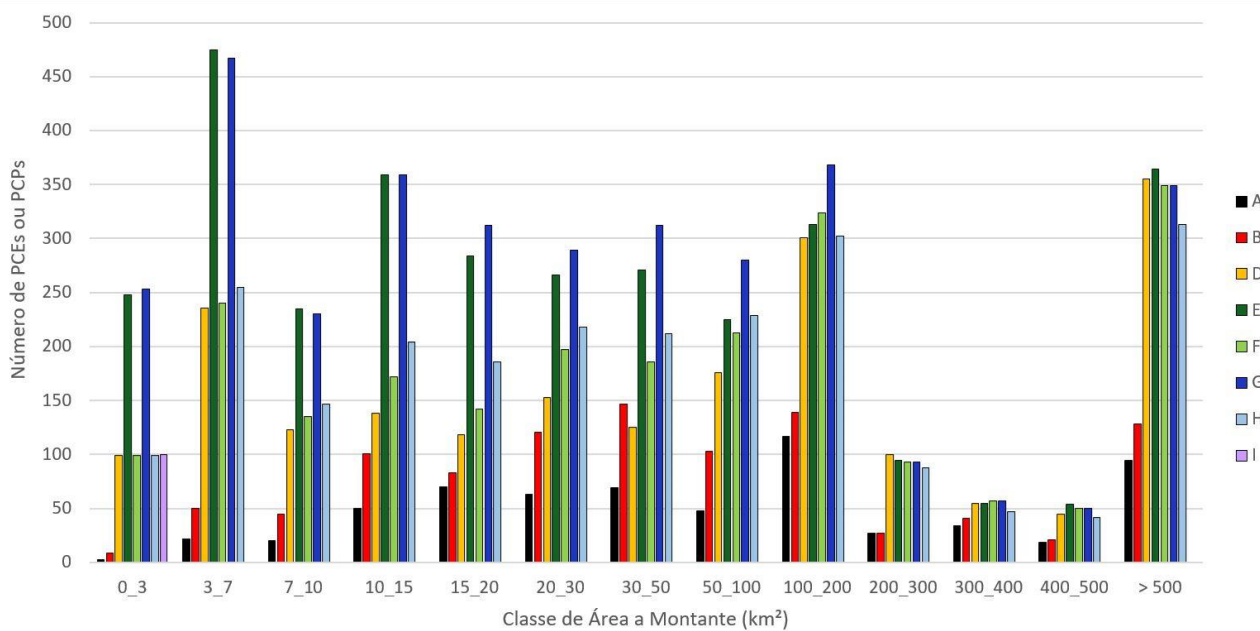
A **figura 6.14** demonstra os graus de dispersão e de assimetria entre as áreas dos PCPs (ha) para cada classe de área de drenagem a montante (km<sup>2</sup>), em cada uma das simulações que envolveram cenários com cálculo de balanço hídrico, ou seja, todas as simulações com exceção da simulação **C**. Cada parte da **figura 6.14** denota apenas os pivôs com atendimento de 100% da demanda do milho em no mínimo 90% da área do pivô. As partes do gráfico são apresentadas em pares na horizontal, onde cada par representa simulações em cujos cenários foram utilizados os mesmos universos de PCEs ou PCPs, mudando apenas a disponibilidade hídrica utilizada no balanço hídrico, sendo as partes localizadas à esquerda as simulações que utilizaram a Q95<sub>100</sub> dias, e as da direita, as que utilizaram os reservatórios virtuais.





**Figura 6.14.** Grau de dispersão e assimetria de áreas de PCEs por classes de área a montante para simulação **A** (figura 6.14a) e para simulação **B** (figura 6.14). E grau de dispersão e assimetria de áreas de PCPs por classes de área a montante para simulação **D** (figura 6.14c), para simulação **E** (figura 6.14d), para simulação **F** (figura 6.14e), para simulação **G** (figura 6.14f), para simulação **H** (figura 6.14g), para simulação **I** (figura 6.14h).

A **figura 6.15** demonstra o número de pivôs em cada simulação, cujo cenário envolveu o cálculo de balanço hídrico, para cada classe de área de drenagem a montante do ponto de captação.



**Figura 6.15.** Número de PCEs ou PCPs para cada simulação que utilizou balanço hídrico, divididos por classes de área de drenagem a montante do ponto de captação de água no corpo hídrico.

### 6.3.3. DEFINIÇÃO DOS MELHORES PCPs E EFEITOS SOBRE A UHE BATALHA

Analisando-se em conjunto as figuras 6.1 e 6.2 e a tabela 6.7, e considerando que a média de área dos PCEs é de 82,5 ha, conclui-se que 61.527 ha (**figura 6.1**) na forma de 672 PCPs, com área média variando entre 87 e 145 ha (**tabela 6.7**), e potências requeridas de bombeamento entre 100 e 300 cv (**figura 6.2**) ocupam o que há de melhor em termos de terras para irrigação na BARSAM. Com o foco apenas sobre os PCPs com médias de áreas irrigadas superiores a 70 ha e requerimentos de potências

de bombeamento de água de até 300 cv, o cenário que permitiria a maior área irrigada por PCPs mais atrativos economicamente, seria o que foi utilizado na simulação **G**, com expansão da irrigação na BARSAM de **64.608** ha na forma de 647 PCPs, mediante a ampliação de investimentos em reservatórios nas regiões com até 500 km<sup>2</sup> de área de drenagem. Esse cenário teria pivôs com áreas variando a pouco mais de 50 ha até pouco mais de 175 ha (**figura 6.13d**).

Dentre as simulações que não contabilizam o aumento da reservação de água, a que apresenta o cenário de maior expansão possível de PCPs economicamente atrativos é a simulação **F** (**figura 6.13c**), na qual o cenário utilizado permitiria o crescimento da área irrigada dos PCPs com mais de 70 ha e potência requerida para bombeamento de água máxima de 300 cv, em **37.522 ha**. Isso significa que o aumento de reservação na BARSAM permitiria um crescimento de 70% na área irrigada pelos PCPs mais economicamente viáveis dentre todos os cenários testados neste trabalho.

Na simulação que envolve o cenário **G**, supondo-se que apenas os 64.068 ha disponíveis para os 647 PCPs mais técnica e economicamente viáveis, e somando-se aos 80.845 ha irrigados na forma de 1.015 PCEs, pode-se afirmar que a área máxima de expansão da irrigação na BARSAM para o plantio de milho na safra de inverno, concomitantemente por todos os pivôs na bacia, e mediante o aumento da reservação de água, é de 1.662 pivôs centrais em 144.913 ha plenamente atendidos por água.

O efeito dessa expansão na irrigação sobre a geração de energia na UHE Batalha seria um decréscimo de 34 MW/h de produção de energia firme para 28 MW/h, valor resultante da sobreposição da demanda de água para irrigação concomitante de milho na safra de inverno em 144.913 ha sobre o período crítico do sistema elétrico brasileiro (junho de 1949 a novembro de 1956).

#### 6.4. CONCLUSÃO

A metodologia adotada para simular a expansão por pivôs centrais na BARSAM permitiu a análise de nove cenários diferentes. Alguns desses cenários são improváveis de ocorrer, como por exemplo os cenários adotados para as simulações **D** e **E**, enquanto que o cenário adotado para a simulação **C** é completamente impossível. No entanto, um dos principais resultados obtidos foram as simulações do aumento da reservação de água para fins de irrigação, em cujos cenários que ela fora utilizada se pode constatar a possibilidade de expansão dos PCPs nas áreas mais a montante na bacia, quando comparadas às simulações que utilizaram apenas a  $Q_{95_{100 \text{ dias}}}$  como disponibilidade hídrica. Outro resultado importante foi o dimensionamento simplificado de mais de 3.700 pivôs centrais potenciais utilizando o SRTM, que é um modelo digital de elevação gratuito e amplamente difundido entre a comunidade científica.

Os resultados das simulações que envolveram o cálculo de balanço hídrico (simulações D, E, F, G, H e I), demonstram que, do ponto de vista técnico e econômico, o cenário de ampliação da irrigação na BARSAM que propiciaria o maior número de pivôs com área irrigada média em torno de 82,5 ha, ou maior, e potência de bombeamento de até 300cv foi a simulação G (figura 6.16d), pois é a simulação que melhor atende esses dois quesitos. Contudo esse cenário envolve a ampliação de reservação de água na bacia. Assim, pôde-se concluir que embora existam quase **250.000 ha** de terras disponíveis para instalação de pivôs centrais na BARSAM (vide simulação C), apenas **64.608 ha** teriam viabilidade técnica e econômica para serem amplamente atendidos para as necessidades hídricas do milho na safra de inverno.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADUSUMILLI, N.; ALMAS, L. Energy Cost Comparisons of Centre Pivot Systems in the Northern Texas High Plains" (2007) Paper 41.
- ALCANTARA, E.; NOVO, E.; STECH, J.; ASSIREU, A.; NASCIMENTO, R.; LORENZZETTI, J.; SOUZA, A. Integrating historical topographic maps and SRTM data to derive the bathymetry of a tropical reservoir. **Journal of Hydrology**. V. 389, p. 311-316, 2010.
- BISCARO, G. **Sistemas de Irrigação por Aspersão**. EdUFGD, Dourados, 2009.
- BORGES, M.; SOARES, F.; CARVALHO JR. O.; MARTINS, E.; GUIMARAES, R.; GOMES, R. Relação dos compartimentos geomorfológicos com o uso agrícola na bacia do Rio Preto. **Espaco e Geografia**. v.10, n.2, p. 453-476. 2007.
- BRUNCKHORST, A.; BIAS, E. Aplicação de SIG na gestão de conflitos pelo uso da agua na porcao goiana da bacia hidrográfica do rio São Marcos, município de Cristalina – GO. **Geociências**, v.33, n. 2, p. 228-243, 2014.
- BUCENE, L. **Sistema de Informacoes Geográficas na classificação de terras para irrigação, em Pardinho-SP**. 2002. 192 f. Dissertação de conclusão de curso (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp, Botucatu, 2002.
- CHEN, Y.; KHAN, S.; PAYDAR, Z. To retire or expand? A fuzzy GIS-based spatial multi-criteria evaluation framework for irrigated agriculture. **Environmental Modelling & Software**. V.25, p.1582-1591, 2010. (1)
- CHEN, Y.; YU, J.; KHAN, S. Spatial sensitivity analyses of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. **Irrigation and Drainage**. V.59, p.174-188, 2010 (2).
- COLAIZZI P.; EVETT, S.; HOWELL, T.; **Corn production with spary, LEPA and SDI**. In: Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Annual Central Plains Irrigation Conference, Burlington, CO. Fevereiro, 2011.

- FEIZIZADEH, B.; BLASCHKE, T. Land suitability analyses for Tabriz Country, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS. **Journal of Environmental Planning and Management**. V.56, I.1, p 1-23, 2013
- FIPP, G.; NEW, L. **Center Pivot Workbook**. Texas A&M University System, 2005.
- HESSARI, B.; BRUGGEMAN, A.; AKHOOND-ALI, A.; OWEIS, T.; ABBASI, F. Supplemental irrigation potential and impact on downstream flow of Karkheh river basin in Iran. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.20, p.1903-1910, 2016.
- LALONDE, T.; SHORTRIDGE, A.; MESSINA, J. The influence of land cover on Shuttle Topography Mission (SRTM) Elevations in low-relief areas. **Transactions in GIS**. V.14, p. 461-479, 2010.
- MARINI, L.; MARCATO JR., J.; PARANHOS FILHO, A.; BARROS, W.; HIGA, L. Análise da acurácia altimétrica dos modelos digitais de superfície SRTM, Aster e Topodata e aplicação da representação 3d do Pantanal da Nhecolândia. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ - Vol. 40 - p. 48-54**, 2017.
- MARTIN, D.; DORN, T.; MELVIN, S; CORR, A.; KRANZ, A. **Evaluating energy use for pumping irrigation water**. In: Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Annual Central Plains Irrigation Conference, Burlington, CO. Fevereiro, 2011.
- MONTERO, J., MARTÍNEZ, A., VALIENTE, M.; MORENO, M.; TARJUELO, J. Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. **Irrigation Science**, v.31, I.507. 2013.
- MOREIRA, F. **Potencial das terras para irrigação da fazenda experimental Lageado, Botucatu-SP, por geoprocessamento**. 2018. 60 f. Dissertação de conclusão de curso (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, Botucatu, 2018.
- OLIVEIRA de, J. S.; ZOCOLER, J. L. Custos da irrigação e receita líquida do feijoeiro em um sistema pivô central sob variação do comprimento da tubulação de recalque e desnível topográfico. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.33, n.1, p.121-128, 2013.
- PERRONI, B. **Velocidade econômica de Escoamento e Composição de Custos de Sistemas de Irrigação por Aspersão**. 2008. 105 f. Dissertação de conclusão de curso (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UFLA, Lavras, 2008.
- ROGERS, D; KOELLIKER, J. **Evaluating center pivot, nozzle-package performance**. In: Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Annual Central Plains Irrigation Conference, Burlington, CO. Fevereiro, 2011.
- De SOUSA, R.; BARBOS, M.; de SOUSA Jr., S.; NETO, C.; de LIMA, A. Solos e classes de terras para irrigação no município de Itaporanga, PB. **Revista Caatinga**. V.20, n.4, p. 116-122, 2007.
- SHARMA, A.; TIWARI, K. A comparative appraisal of hydrological behavior of SRTM DEM at catchment level. **Journal of Hydrology**. V. 519, p. 1394-1404, 2014.
- da SILVA, E. M.; de AZEVEDO, J. A. **Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô central**. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1998

TIGHE, M.; CHAMBERLAIN, D. Accuracy comparison of the SRTM, ASTER, NED, NEXTMAP USA digital terrain model over several USA study sites. In: **American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) and Management Association for Private Photogrammetric Surveyors (MAPPS) Fall Conference**, San Antonio, Texas, November, 2009

YU, J.; CHEN, Y.; WU, J.; KHAN, S. Cellular automata-based spatial multi-criteria land suitability simulation for irrigated agriculture. **International Journal of Geographical Information Science**. V.25, I.1, p.131-148, 2011.

## CONCLUSÃO FINAL

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia inovadora de mapeamento de ampliação de áreas irrigadas, pois foi capaz de identificar os locais com maior probabilidade de ampliação das áreas irrigadas. No início do capítulo 6 são apresentados alguns exemplos de trabalhos que se propuseram a mapear futuras áreas irrigadas, mas nenhum atingiu tamanho nível de detalhe como os apresentados aqui. Os métodos propostos neste trabalho foram capazes de indicar a intensidade de irrigação utilizada, os locais e as fontes de retirada de água dos cursos d'água, a cultura irrigada e a localização precisa das áreas irrigadas e, principalmente foram definidas quais dentre as áreas irrigadas possuem as alturas manométricas técnica e economicamente viáveis para o bombeamento de água para pivôs centrais, resultando em uma análise técnica e econômica de viabilidade de cada pivô central com potencial de ser instalado na BARSAM. Dessa forma, esse método de mapeamento de ampliação de irrigação pode ser uma ferramenta valiosa para o planejamento e orientação do uso de recursos hídricos em bacias hidrográficas com vocação agrícola. Assim, para se avaliar futuros cenários de ampliação da irrigação na bacia do rio São Marcos (BARSAM) foi necessário envolver conhecimentos multidisciplinares, indo do geoprocessamento até a hidráulica, passando pela geografia, programação, agronomia e hidrologia.

Primeiramente o conhecimento geográfico da região é uma ferramenta fundamental para a o entendimento de todo o conjunto de vetores que atuam numa região tão dinâmica como a BARSAM. O conhecimento geográfico é muito útil para a consecução dos objetivos propostos neste trabalho, pois a geografia envolve a compreensão da paisagem, e é na paisagem que acontecem as interações humanas, que por sua vez modificam a paisagem de forma constante. O conhecimento geográfico da BARSAM envolve o conhecimento da geomorfologia da bacia, da topografia do terreno, da vegetação nativa, dos tipos de solo, de como a água se comporta no solo ao longo do ano, o tipo de drenagem dos corpos hídricos, as fases climáticas, as culturas cultivadas, o valor obtido com a comercialização dessas culturas e a produtividade agrícola. Todas essas características estão inseridas na paisagem da BARSAM e nas relações humanas que acontecem na bacia, e o entendimento de todas essas questões é um fator primordial para o sucesso de um estudo amplo, mas com objetivos específicos, como é o caso deste trabalho.

Em seguida vem o geoprocessamento. Foram feitas muitas análises espaciais por meio da ciência do geoprocessamento, sendo as mais importantes as identificações dos sistemas de irrigação por pivôs centrais apresentadas no capítulo 2, como também a análise multitemporal de instalação de pivôs e de barramentos. A partir dessas análise de sensoriamento remoto foram estabelecidas as bases de informação que propiciaram o desenvolvimento de todo estudo. Contudo, as visitas em campo foram

fundamentais para o refinamento das identificações dos alvos apresentados no capítulo 2, o que quer dizer que o conhecimento *in loco* da realidade da BARSAM foi muito importante para estabelecer as bases para o desenvolvimento de toda a pesquisa, principalmente para se entender as operações agronômicas utilizadas nas fazendas da bacia (como as datas de plantio e colheita, os períodos de irrigação, as culturas cultivadas e operações dos reservatórios). Outras técnicas de geoprocessamento também utilizadas foram as conversões de dados vetoriais para dados raster, que possibilitaram o cruzamento entre as camadas para se extrair outras camadas com novas informações. Os dados em formato raster também foram importantes para o cálculo das áreas de drenagem a montante dos reservatórios, informação fundamental para o entendimento da influência dos reservatórios na disponibilidade hídrica. Por fim, o geoprocessamento foi utilizado naquele que talvez seja a ferramenta principal desse trabalho, que foi o cálculo do balanço hídrico para os diferentes cenários propostos, por meio de uma ferramenta desenvolvida por programação em Java, que teve como insumo de entrada a base os dados vetoriais das ottobacias com informações tabulares de disponibilidade hídrica e de demanda de água para cada uma das 4.161 ottobacias da BARSAM.

A aplicação de estudos hidrológicos neste trabalho se configurou como uma fase impreterível tendo em vista a necessidade de se avaliar a disponibilidade hídrica na BARSAM e a capacidade que a bacia tem de suportar um aumento na reservação de água no futuro. Felizmente, dados de vazão nos postos fluviométricos da bacia têm um volume temporal satisfatório para estudos de regionalização, embora a estações fluviométricas mais antigas da bacia tenham parado de funcionar em 2008. No entanto o estudo de regionalização foi satisfatório, apesar de ser simples, por envolver apenas uma variável explicativa, que no caso foi a área de drenagem a montante de cada estação. Obviamente estudos mais avançados sobre a disponibilidade hídrica na BARSAM poderiam ser obtidos por modelagem hidrológica, simulando-se chuvas, tipos de solo, uso do solo e outras variáveis que influenciam na vazão dos corpos hídricos.

A regionalização de vazões, os cálculos de áreas de drenagens a montante dos reservatórios obtidos por meio do geoprocessamento, e a regressão linear para estimativa de volumes dos reservatórios, também realizada em parte com geoprocessamento nas fases de localização de reservatórios em torno da BARSAM e no mapeamento em grande escala dos seus perímetros, proporcionaram as bases para a proposição de equações para avaliar como os reservatórios influenciam na disponibilidade hídrica da BARSAM. Essa avaliação tem dois componentes altamente conservadores, que foi considerar a  $Q_{95}$  como vazão afluente que chega aos reservatórios, e considerar a infiltração de  $31 \text{ mm.dia}^{-1}$ , considerada alta demais. No entanto esses dois parâmetros conservadores, que subestimam a capacidade de influência no aumento da disponibilidade hídrica no local onde se encontra o reservatório, são um contraponto a não consideração dos efeitos dos reservatórios em cascata. A



simulação da proposição de efeitos dos reservatórios na disponibilidade hídrica na bacia, para suprir a demanda de todos os PCEs plantados com de forma concomitante com milho, foi satisfatória e indica que tal proposição é lógica e pode servir como base para desenvolvimentos posteriores.

A locação de 3.779 pivôs centrais virtuais, ou pivôs centrais potenciais (PCPs) e suas adutoras foi realizada em ambiente de geoprocessamento, mas teve um caráter primordialmente de análise visual e de desenho manual. Certamente foi uma das fases de maior demanda de tempo, mas essencial para atingir os objetivos do trabalho. Essa fase propiciou a o que tenha sido talvez um dos maiores desafios de toda a metodologia utilizada, que foi o dimensionamento desses 3.779 pivôs centrais virtuais, ainda que tenha sido de forma simplificada na forma de escolha de pressões de serviço, diâmetros das linhas laterais, velocidades máximas permitidas da água dentro das adutoras e nos diâmetros das adutoras. Esta fase teve um uso intenso de geoprocessamento aliado ao conhecimento de hidráulica e de engenharia agrônoma no dimensionamento de pivôs centrais. Feito o dimensionamento dos PCPs foi possível estabelecer com maior confiabilidade a real capacidade técnica e econômica de expansão de pivôs centrais na bacia do rio São Marcos.