

SILAS ALVES SOUZA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE AUMENTO DE PRODUTIVIDADE E
ECONOMIA DE ÁGUA E ENERGIA NA IRRIGAÇÃO DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

Coorientador: Fernando França da Cunha

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Souza, Silas Alves, 1994-
S729a Avaliação do potencial de aumento de produtividade e
2021 economia de água e energia na irrigação de precisão / Silas
Alves Souza. – Viçosa, MG, 2021.
109 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 102-109.

1. Soja - Irrigação. 2. Produtividade. 3. Agricultura -
Consumo de energia. 4. Água - Consumo. 5. Modelos
matemáticos. 6. Desenvolvimento de recursos hídricos.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

CDD 22. ed. 633.3487

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fatima Alves CRB6 2578

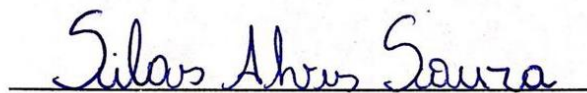
SILAS ALVES SOUZA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE AUMENTO DE PRODUTIVIDADE E
ECONOMIA DE ÁGUA E ENERGIA NA IRRIGAÇÃO DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

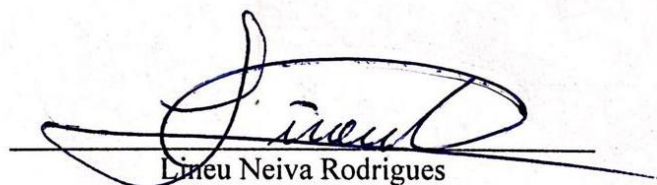
APROVADA: 11 de junho de 2021.

Assentimento:



Silas Alves Souza

Autor



Lineu Neiva Rodrigues

Orientador

Aos meus pais

Elias Souza Lima (*In memória*),
e Ionara Alves de Araújo Souza.

Meus irmãos

Elinário Gullit Alves Souza,
Elias Souza Lima Júnior,
e David Rodrigo Norte Lima.

Minha avó materna

Valdenice Alves de Araújo.

Meus avós paternos

Deusedino Souza Lima (*In memória*),
e Antônia dos Santos Lima (*In memória*).

A toda minha família.

DEDICO

A comunidade científica
Ao povo brasileiro

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me sustentado até aqui e feito com que tudo fosse conforme os planos d'Ele.

A minha família, pelo apoio, incentivo, confiança e amor.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao Lineu Neiva Rodrigues, pela orientação, paciência, confiança, amizade e apoio.

Ao Fernando França Cunha, pela coorientação e todo conhecimento transferido em sala de aula.

Ao Marcos Antônio Vanderlei Silva, pela amizade e pelos ensinamentos desde a graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo apoio (Código de Financiamento 001).

À EMBRAPA Cerrados pela concessão das informações fundamentais para realização da pesquisa.

À ASPIPP, pelo apoio financeiro para a realização de algumas das análises laboratoriais necessárias para o desenvolvimento da pesquisa.

À empresa GREEN RESULTADOS EM GESTÃO LTDA, por fornecer dados essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos proprietários (no nome de Maurício Swart), ao gerente (Alessandro) e aos funcionários da Fazenda Pinhalzinho, por permitirem a realização de parte da pesquisa na propriedade, pelo apoio, recepção e estadia nos dias de coletas de dados.

Ao Douglas, pela amizade construída durante esta trajetória e por todo auxílio, durante várias etapas da pesquisa, principalmente, nas coletas de dados.

Aos irmãos de orientação e amigos: Arnaldo Cambraia, Arthur Kolling, Caio Pagani, Charles Cardoso, Daniel Althoff, Diego Farias e Élvis Alves, pela amizade, apoio e troca de conhecimentos.

Aos meus amigos e colegas da pós-graduação pela amizade e companheirismo.

Enfim, a todos que me ajudaram de alguma forma na execução desse projeto, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

SILAS ALVES SOUZA nasceu no dia 23 de dezembro de 1994 em Candiba, Bahia, filho de Ionara Alves de Araújo Souza e Elias Souza Lima (*In memória*), irmão de Elinário Gullit Alves Souza, Elias Souza Lima Júnior e David Rodrigo Norte Lima.

Em outubro de 2013, concluiu o curso de Técnico em Agropecuária pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Campus Guanambi / BA.

Em fevereiro de 2014, iniciou o curso de Graduação em Engenharia Agrônômica pela Universidade do Estado da Bahia (UNEB), Campus Barreiras, obtendo o título em dezembro de 2018.

Em março de 2019, iniciou o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, com ênfase em Recursos Hídricos e Ambientais, pela Universidade Federal de Viçosa - MG, obtendo o título em junho de 2021.

“Suba o primeiro degrau com fé. Não é necessário que você veja toda a escada. Apenas dê o primeiro passo.”
(Martin Luther King)

RESUMO

SOUZA, Silas Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2021. **Avaliação do potencial de aumento de produtividade e economia de água e energia na irrigação de precisão.** Orientador: Lineu Neiva Rodrigues. Coorientador: Fernando França da Cunha.

A irrigação de precisão é uma tecnologia com grande potencial de contribuir com a segurança alimentar e com a redução de uso de água na agricultura. Apesar de serem reconhecidos seus benefícios para a agricultura irrigada, estes são, ainda, abstratos, por serem poucos quantificados, contribuindo para a baixa aceitação/implantação dessa tecnologia de irrigação pelos seus usuários. Com isso, torna-se imprescindível a quantificação dos benefícios do uso da irrigação de precisão na agricultura irrigada. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a economia de água e energia e o potencial de aumento de produtividade da cultura de soja em sistema de irrigação de precisão com pivô central. O estudo foi realizado em dois sistemas de irrigação por pivô central, situados na Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho, PivoBHBV, e na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, PivoBHALPA. A partir de dados físico-hídricos do solo levantados nas áreas de estudo, foi realizada uma análise geoestatística, para verificação da variabilidade espacial desses atributos, seguido da interpolação dos dados por meio da Krigagem simples. A interpolação foi feita considerando pixels de 5x5, 10x10 e 15x15 m. Para fins de avaliação da economia de água e energia e do potencial aumento de produtividade proveniente da utilização do manejo de irrigação de precisão, fez-se a comparação com o manejo de irrigação convencional, na qual considerou o manejo realizado com base no menor, na média e no maior valor de água disponível no solo. Para fins de avaliação, foi implementado também a utilização de zonas de manejo de irrigação, construídas com base na água disponível no solo. A simulação de todas as estratégias de manejo de irrigação foi realizada através do módulo de irrigação de precisão do software Manejo de Simulação de Estratégias de Irrigação. Na simulação considerou-se quatro datas de semeadura da cultura da soja em um ano chuvoso e um ano seco. Foi realizada ainda uma análise econômica, com o intuito de avaliar o potencial de aumento de lucratividade com o uso da irrigação de precisão. Os resultados obtidos para o PivoBHBV demonstraram que o uso da irrigação de precisão comparada ao manejo convencional, nas condições avaliadas, atingiu potenciais de economia de água e energia e de aumento de produtividade, respectivamente, de 7,9; 10,7 e 23,7%, no ano chuvoso, e de 7,6; 8,9 e 14,9%, no ano seco. Para o PivoBHALPA, a irrigação de precisão

comparado comparada ao manejo convencional atingiu potenciais de economia de água e energia e de aumento de produtividade, respectivamente, de 23,3; 25,3 e 25,1%, no ano chuvoso, e de 17,0; 17,9 e 16,2%, no ano seco. Nos dois pivôs estudados, os resultados obtidos com uso de zonas de manejo de irrigação foram semelhantes aos obtidos pela irrigação de precisão, cujos potenciais benefícios avaliados foram próximos de zero. O potencial de aumento de lucratividade da cultura da soja com o uso da irrigação de precisão nos anos chuvoso e seco foram de 106,2% e 67,1% para o PivoBHBV, e 96,8% e 62,5% para o PivoBHALPA, respectivamente.

Palavras-chave: Demanda energética. Eficiência de irrigação. Irrigação a taxa variada. Modelo de simulação. Produtividade potencial. Recursos hídricos.

ABSTRACT

SOUZA, Silas Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2021. **Assessment of the potential to increase crop yield and the water and energy saving in precision irrigation.** Adviser: Lineu Neiva Rodrigues. Co-adviser: Fernando França da Cunha.

Precision irrigation is a technology with great potential to contribute to food security and reduce water use in agriculture. Although their benefits for irrigated agriculture are recognized, they are still abstract, as they are few quantified, contributing to the low acceptance/implantation of this irrigation technology by its users. Thus, it is essential to quantify the benefits of using precision irrigation in irrigated agriculture. The objective of the present work was to evaluate the water and energy savings and the potential to increase crop yield of the soybean crop in a precision irrigation system with central pivot. The study was carried out in two central pivot irrigation systems, located in the Buriti Vermelho River Basin, PivoBHBV, and in the Alto Paranapanema River Basin, PivoBHALPA. Based on physical-hydric data from the soil surveyed in the study areas, a geostatistical analysis was performed to verify the spatial variability of these attributes, followed by the interpolation of the data using simple Kriging. The interpolation was performed considering pixels of 5x5, 10x10 and 15x15 m. For the purpose of assessing water and energy savings and the potential increase crop yield resulting from the use of precision irrigation management, a comparison was made with conventional irrigation management, in which the management carried out based on the smallest, in average and the highest amount of water available in the soil. For evaluation purposes, the use of irrigation management zones, built on the basis of water available in the soil, was also implemented. The simulation of all irrigation management strategies was carried out using the precision irrigation module of the Irrigation Strategy Simulation Management software. In the simulation, four soybean sowing dates were considered in a rainy year and a dry year. An economic analysis was also carried out in order to assess the potential for increased profitability with the use of precision irrigation. The results obtained for PivoBHBV demonstrated that the use of precision irrigation compared to conventional management, under the conditions evaluated, reached potential water and energy savings and potential increase crop yield, respectively, of 7.9, 10.7 and 23.7%, in the rainy year, and 7.6, 8.9 and 14.9%, in the dry year. For PivoBHALPA, precision irrigation compared to conventional management reached potential water and energy savings and increased productivity, respectively, of 23.3, 25.3 and

25.1%, in the rainy year, and of 17.0, 17.9 and 16.2%, in the dry year. In the two studied pivots, the results obtained with the use of irrigation management zones were similar to those obtained by precision irrigation, whose evaluated potentials were close to zero. The potential for increasing profitability of the soybean crop with the use of precision irrigation in the rainy and dry years were 106.2% and 67.1% for PivoBHBV, and 96.8% and 62.5% for PivoBHALPA, respectively.

Keywords: Energy demand. Irrigation efficiency. Variable rate irrigation. Simulation model. Potential productivity. Water resources.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho, com destaque para o pivô utilizado nas simulações (PivoBHBV). 31
- Figura 2 – Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, com destaque para o pivô utilizado nas simulações (PivoBHALPA). 32
- Figura 3 – Representação dos locais de amostragem. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA. 34
- Figura 4 – (A) Mapa de interpolação das características físicas do solo com resolução espacial de 5 m x 5 m, (B) geração de um valor para cada pixel, e (C) pixel discretizado para manejo individualizado. 36
- Figura 5 – Dados climáticos diários observados no PivoBHBV durante as quatro datas de semeadura (DS) da cultura de soja (DS1 = 10 de setembro; DS2 = 10 de outubro; DS3 = 10 de novembro; e DS4 = 10 dezembro), em dois anos contrastantes em termos de total precipitado. A) Ano chuvoso (2014/2015); e B) Ano seco (2015/2016). 48
- Figura 6 – Dados climáticos diários observados no PivoBHALPA durante as quatro datas de semeadura (DS) da cultura da soja (DS1 = 10 de setembro; DS2 = 10 de outubro; DS3 = 10 de novembro; e DS4 = 10 dezembro), em dois anos contrastantes em termos de total precipitado. A) Ano chuvoso (2015/2016); e B) Ano seco (2016/2017). 49
- Figura 7 – Análise de frequência das variáveis físico-hídricas do solo referentes aos dois pivôs centrais estudados. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA. 53
- Figura 8 – Variabilidade espacial da textura do solo, do modelo digital de elevação (MDE), da declividade e das variáveis físico-hídricas do solo. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA. 55
- Figura 9 – Análise de frequência da água disponível no solo após a interpolação. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA. 56
- Figura 10 – Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Classificação Normalizada (NCE) obtidos com base na água disponível no solo. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA. 57
- Figura 11 – Zonas de manejo de irrigação geradas com base na água disponível no solo. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA. 57
- Figura 12 – Diferença entre a evapotranspiração atual (ETa) acumulada no pixel no manejo de irrigação de precisão (IP) e a ETa acumulada no pixel no manejo convencional (MC1, MC2 e MC3) e de zonas de manejo de irrigação (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4) em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA. 60

Figura 13 – Diferença entre o déficit de umidade do solo acumulada no pixel (DDH), valor calculado considerando a diferença em cada pixel do déficit de umidade do solo acumulada no manejo de irrigação de precisão (IP) e os déficits de umidades do solo acumuladas no pixel no manejo convencional (MC1, MC2 e MC3) e de zonas de manejo de irrigação (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA. 64

Figura 14 – Coeficiente de redução da evaporação do solo (K_e), avaliado durante o ciclo da cultura da soja, para um pixel do pivô, considerando os manejos de irrigação de precisão (IP), zonas de manejo de irrigação (ZMI) e manejo convencional (MC1, MC2 e MC3), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS). A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA..... 67

Figura 15 – Potencial de redução de percolação profunda (PRPP) da água de irrigação, obtido da diferença entre as percolações profundas calculadas no manejo com irrigação de precisão (IP) e aquelas obtidas no manejo convencional (MC1, MC2 e MC3) e no manejo com base nas zonas de manejo de irrigação (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), considerando um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA..... 69

Figura 16 – Chuva efetiva estimada na irrigação de precisão (IP), zonas de manejo de irrigação (ZMI) e manejo convencional (MC1, MC2 e MC3), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4) em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA..... 71

Figura 17 – Lâminas de irrigação diária, avaliada durante o ciclo da cultura da soja, para um pixel do pivô, considerando o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP) com os manejos convencional (MC1, MC2 e MC3) e em zonas de manejo (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA. 74

Figura 18 – Potencial de economia de água (PEA) calculado comparando o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP) com os manejos convencional (MC1, MC2 e MC3) e em zonas de manejo de irrigação (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA..... 76

Figura 19 – Irrigação total aplicada (m^3), simulada com base no manejo de irrigação de precisão (IP), considerando diferentes tamanhos de pixel (5x5, 10x10 e 15x15 metros), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4) em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA. 79

Figura 20 – Potencial de economia de água (PEA) calculado comparando o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP), em diferentes tamanhos de pixel (5x5, 10x10 e

15x15 metros), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4) em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA. 80

Figura 21 – Potencial de economia de energia (PEE) calculado comparando o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP) com os manejos convencional (MC1, MC2 e MC3) e em zonas de manejo (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA. .83

Figura 22 – Potencial de aumento de produtividade (PAP) calculado comparando-se o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP) com os manejos convencional (MC1, MC2 e MC3) e em zonas de manejo (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA. 87

Figura 23 – Valores dos índices de adequabilidade da irrigação calculados para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), considerando um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV; B) PivoBHALPA. 90

Figura 24 – Produtividade de uso da água de irrigação (kg m^{-3}) calculado para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), considerando um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV; B) PivoBHALPA. 93

Figura 25 – Potencial de aumento de lucratividade (PAL) calculado para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), considerando um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV; B) PivoBHALPA. 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros/Variáveis de entrada do Modelo de Simulação de Estratégia de Irrigação (MSEI).....	39
Tabela 2 – Cotação de venda da soja e tarifa de energia elétrica	46
Tabela 3 – Dados climáticos médios observados no PivoBHBV durante as quatro datas de semeadura (DS) da cultura de soja (DS1 = 10 de setembro; DS2 = 10 de outubro; DS3 = 10 de novembro; e DS4 = 10 dezembro), em um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS).....	49
Tabela 4 – Dados climáticos médios observados no PivoBHALPA durante as quatro datas de semeadura (DS) da cultura de soja (DS1 = 10 de setembro; DS2 = 10 de outubro; DS3 = 10 de novembro; e DS4 = 10 dezembro), em um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS).....	51
Tabela 5 – Análise estatística descritiva das variáveis físico-hídricas do solo observadas nos dois pivôs estudados.	52
Tabela 6 – Valores médios da evapotranspiração atual (ETa) acumulada durante o ciclo da cultura da soja, considerando as cinco estratégias de manejo (MC1, MC2, MC3, IP e ZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.....	58
Tabela 7 – Valores de lâmina de irrigação total, considerando as cinco estratégias de manejo (MC1, MC2, MC3, IP e ZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.	72
Tabela 8 – Porcentagens de pixels nos pivôs PivoBHBV e PivoBHALPA que receberam lâminas de irrigação maiores (LMa), iguais (LI) e menores (LMe) que o déficit de manejo.	75
Tabela 9 – Valores de energia requerida média (kW ha ⁻¹), considerando as cinco estratégias de manejo (MC1, MC2, MC3, IP e ZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.	81
Tabela 10 – Valores médios de produtividade (kg ha ⁻¹), considerando as cinco estratégias de manejo (MC1, MC2, MC3, IP e ZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.	86
Tabela 11 – Custo médio de produção da cultura de soja para a região de Brasília-DF (PivoBHBV) e de São Paulo (PivoBHALPA).	95

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	21
2.1. Objetivo Geral.....	21
2.2. Objetivos específicos	21
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
3.1. Histórico e desenvolvimento da irrigação de precisão	22
3.2. Variabilidade espacial das propriedades dos solos	24
3.3. Utilização de funções de pedotransferência na obtenção de variáveis físico-hídricas do solo.....	25
3.4. Benefícios potenciais da irrigação de precisão	26
3.5. Zonas de manejo de irrigação	28
3.6. Modelos de simulação	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1. Área de Estudo.....	31
4.2. Base de dados.....	33
4.2.1. Dados climáticos.....	33
4.2.2. Dados de solo.....	33
4.2.3. Modelo digital de elevação do terreno e declividade	35
4.3. Manejo de irrigação	35
4.3.1. Manejo convencional.....	36
4.3.2. Manejo de irrigação de precisão	36
4.3.3. Manejo de irrigação por zonas de manejo	37
4.3.3.1. Análise de agrupamento dos dados e definição das zonas de manejo de irrigação	37
4.4. Modelo de simulação das estratégias de manejo de irrigação	38
4.5. Avaliação do potencial de economia de água e energia	41
4.6. Avaliação do potencial de aumento de produtividade	44
4.7. Produtividade de uso da água	45
4.8. Análise econômica	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1. Dados climáticos observados.....	48
5.2. Análise estatística descritiva dos dados de solo.....	51
5.3. Análise geoestatística dos dados de solo	54
5.3.1. Interpolação das variáveis físico-hídricas do solo	54

5.3.2. Agrupamento e geração das zonas de manejo de irrigação	56
5.4. Simulação da demanda hídrica e energética e da produtividade	58
5.4.1. Evapotranspiração atual	58
5.4.2. Déficit de umidade no solo	63
5.4.3. Percolação profunda	67
5.4.4. Chuva efetiva	70
5.4.5. Lâmina de irrigação total	72
5.4.6. Avaliação do impacto do tamanho do pixel no volume de água de irrigação	79
5.4.7. Energia requerida.....	81
5.4.8. Produtividade	85
5.5. Índice de adequabilidade da irrigação	89
5.6. Produtividade de uso da água de irrigação	92
5.7. Análise econômica	95
6. CONCLUSÕES.....	100
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
REFERÊNCIAS	102

1. INTRODUÇÃO

Embora se tenha verificado na última década um aumento progressivo na produção de alimentos, esse crescimento ainda não é suficiente para suprir o aumento de demanda previsto para uma população que, em 2050, será de aproximadamente 10 bilhões de habitantes (FAO, 2017; RAMANKUTTY *et al.*, 2018; UNITED NATIONS, 2017).

O Cerrado, ocupando aproximadamente 24% do território brasileiro, é responsável por cerca de 70% da produção nacional de grãos e carne bovina (KLINK, 2014; SILVA; MONTEIRO; SILVA, 2015), podendo contribuir efetivamente para suprir parte do aumento da demanda de alimentos projetada. Por outro lado, tem-se observado na região um crescimento contínuo da agricultura irrigada, que já representa cerca de 64% da irrigação praticada no Brasil (BRASIL, 2014). Estudos realizados por Althoff e Rodrigues (2019) indicam que 80% dos pivôs centrais do país estão localizados no Cerrado e que, com a projeção de crescimento média de 56.000 hectares/ano, em 2050 a área irrigada pode atingir até 3 Mha, podendo impactar a dinâmica de uso de água na região.

A agricultura irrigada agrega benefícios importantes a agricultura da região propiciando a verticalização da agricultura, ganhos em produtividade, estabilidade na produção e a viabilização da agricultura durante todo o ano. A agricultura irrigada, no entanto, é altamente intensiva no uso de recursos hídricos, principalmente no período seco (abril a setembro). Assim, caso não seja adequadamente planejada e gerenciada, o seu crescimento pode vir a agravar as disputas pelo uso de água na região.

Melhorar a eficiência de irrigação é uma estratégia que pode contribuir para aumentar a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental da agricultura irrigada (BASTIAANSEN; STEDUTO, 2017; LEVIDOW *et al.*, 2014; MO *et al.*, 2005; ZHANG *et al.*, 2004). Considerando o atual cenário de uso da água no Cerrado e a tendência de aumento de conflitos por esse recurso, torna-se cada vez mais importante produzir mais utilizando uma menor quantidade de água, sendo, para isso, fundamental avaliar e aperfeiçoar ferramentas que possam contribuir para o uso eficiente de água.

Para melhorar o desempenho da irrigação na região, é importante desenvolver estratégias de manejo que possam reduzir o uso de recursos hídricos sem comprometer a produção agrícola. Nesse contexto, várias estratégias de irrigação podem ser utilizadas, como, por exemplo, a irrigação com déficit que, se conduzida adequadamente, pode contribuir efetivamente para a redução da demanda hídrica com pouco impacto na qualidade e quantidade da produção, favorecendo o aumento na produtividade de uso de água e da rentabilidade das

lavouras (FERERES; SORIANO, 2007; GEERTS; RAES, 2009; RAGAB, 1996; RUIZ-SANCHEZ; DOMINGO; CASTEL, 2010).

A variabilidade espacial dos atributos físicos do solo é um dos principais fatores responsáveis pela baixa eficiência de irrigação. Mesmo reconhecendo essa variabilidade dentro da área irrigada, historicamente o manejo de irrigação tem sido praticado considerando a área irrigada como uma unidade homogênea. Isto é, usualmente a água é aplicada de maneira uniforme, sendo a quantidade a ser aplicada calculada com base na média ou na condição mais limitante para a cultura. Conseqüentemente, dentro da área irrigada, alguns locais vão receber a quantidade de água ideal enquanto outros locais receberão quantidades menores ou maiores que a ideal. Esta percepção de manejo de irrigação tem contribuído para a baixa uniformidade encontrada nos sistemas irrigados.

A necessidade de aplicar diferentes estratégias de manejo dentro da mesma área cultivada resultou em uma nova forma de otimização da produção agrícola, chamada agricultura de precisão. Dentro da agricultura de precisão a mecanização é a área que mais avançou ao longo dos anos. Em se tratando de irrigação de precisão pouco se tem feito, principalmente em condições de irrigação por pivô central (KASSING; SCHUTTER; ABRAHAM, 2020; LINDBLOM *et al.*, 2017; NEUPANE; GUO, 2019).

Os avanços tecnológicos obtidos nos últimos anos nos sistemas de posicionamento global e de informação geográfica, juntamente com o desenvolvimento de equipamentos capazes de variar a taxa de aplicação de água dentro da área irrigada (BARKER *et al.*, 2018; GIOTTO *et al.*, 2016; KING; KINCAID, 2004; MENDES *et al.*, 2019; MILLER *et al.*, 2018; NEUPANE; GUO, 2019; RESENDE *et al.*, 2010) tem viabilizado a prática da irrigação de precisão em pivôs centrais. Utilizando-se controles, sensores e ferramentas de tomada de decisão apropriados, os sistemas de irrigação podem ser gerenciados de forma a aplicar, dentro da área irrigada, os diferentes requerimentos de água. A irrigação de precisão, apesar de ser recente e ainda pouco estudada, tem grande potencial de contribuir para melhorar a eficiência de irrigação.

Nota-se que há, nesta área do conhecimento, uma grande oportunidade para utilização de modelos computacionais, os quais são usualmente utilizados no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação. Além dessas aplicações, surge a oportunidade de serem utilizados na geração de mapas de umidade do solo, os quais poderão auxiliar o projetista no momento de interpretar os mapas de rendimento. Nos últimos anos, vários modelos foram propostos com o objetivo de manejar a irrigação considerando a variabilidade espacial do solo (BHATTI *et al.*, 2020; CAMBRA BASECA *et al.*, 2019; GONZÁLEZ PEREA *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2019;

NASCIMENTO *et al.*, 2014; O'SHAUGHNESSY *et al.*, 2020; OLDONI; BASSOI, 2016; RODRIGUES *et al.*, 2001, 2018; YARI *et al.*, 2020).

Poucos estudos foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar os benefícios da irrigação de precisão na economia de água e energia (AZEVEDO, 2003; GONZÁLEZ PEREA *et al.*, 2018; KANG *et al.*, 2011; PEREIRA *et al.*, 2013; QIUMING; YANDONG; CHENXIANG, 2007; YARI *et al.*, 2017). Os autores desconhecem estudos específicos para a região do Cerrado, principalmente em equipamentos do tipo pivô central, que são sistemas de irrigação particularmente adequados para a condição de irrigação de precisão devido, principalmente, aos seus atuais níveis de automação e grande área irrigada com uma única linha lateral.

Embora se reconheça os potenciais benefícios, ainda existem barreiras e desafios que podem dificultar o desenvolvimento da irrigação à taxa variada, principalmente pelo elevado custo de implantação e pela complexidade do manejo. Ainda existem várias dúvidas em relação ao manejo, como, por exemplo, a definição do tamanho da área (definição do grid) mais adequado para o manejo. Quanto menor a área a ser manejada, menor será a variabilidade do solo e mais eficiente será a irrigação. Assim, em áreas com solos mais uniformes, pode-se adotar a mesma estratégia de manejo em áreas maiores, o que facilita a operacionalização em campo.

Em termos de tamanho ideal de área de manejo, o grande desafio é encontrar o equilíbrio entre o tamanho ótimo e o possível de ser feito. Por exemplo, embora teoricamente seja factível, na prática é inviável manejar um pivô com base em quadrículas (células) de 25 m² (5 m x 5 m). Uma alternativa prática e viável é considerar zonas de manejo de irrigação. As zonas de manejo agregam grupos de pixels com características semelhantes, formando uma região mais homogênea, que, por sua vez, é manejada de forma semelhante, permitindo o melhor operacionalização e, conseqüentemente, melhor gerenciamento da irrigação.

Alguns trabalhos indicaram o potencial de economia de água com a utilização de sistemas de aplicação à taxa variada (HEDLEY; YULE, 2009; SADLER *et al.*, 2005). Por exemplo, Hedley e Yule (2009) compararam o manejo de irrigação de precisão com o manejo de irrigação convencional e constataram que houve uma economia de água entre 9 e 19%. Estudos como este precisam ser ampliados e mais bem avaliados para as condições de pivô central, que irrigam grandes áreas, com o intuito de avaliar o real potencial de economia.

Simulações que visam identificar qual a melhor estratégia de irrigação a ser utilizada, a fim de se obter os melhores rendimentos das culturas e maiores economias de água e energia, são extremamente importantes, pois possibilitam a tomada de decisão com maior segurança nos resultados finais. Dadas as características da irrigação de precisão e seu alto custo de

implantação em sistemas de pivô central, é necessário avaliar os seus benefícios na produção agrícola e o seu potencial de economia de água e de energia comparado com o manejo convencional de irrigação, considerando diferentes estratégias de manejo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aumento de produtividade e de economia de água e energia advindos do uso da irrigação de precisão.

2.2. Objetivos específicos

- i. Avaliar o potencial de economia de água e energia na cultura de soja em sistema de irrigação de precisão com pivô central;
- ii. Avaliar o potencial de aumento de produtividade da cultura de soja em sistema de irrigação de precisão com pivô central;
- iii. Avaliar o impacto de diferentes estratégias de zona de manejo de irrigação no potencial de produtividade da cultura de soja e de economia de água e energia na irrigação de precisão;
- iv. Avaliar o potencial de aumento de lucratividade da cultura de soja em sistema de irrigação de precisão e sob estratégia de zona de manejo de irrigação com pivô central.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Histórico e desenvolvimento da irrigação de precisão

Na década de noventa começaram a se intensificar os estudos e aplicações de insumos agrícolas de forma a atender as necessidades locais das plantas dentro de uma determinada área. A percepção de que a uniformidade da produtividade das culturas dependia de vários fatores de produção (OMARY; CAMP; SADLER, 1997) e que esses fatores variavam espacialmente e temporalmente dentro da área, ressaltou a necessidade de se manejar a lavoura considerando as condições individuais dentro da área. Essa estratégia mostrou-se promissora para a manutenção dos níveis de produtividade atuais com redução na utilização de insumos (KING; KINCAID, 2004).

Após esta percepção, vários estudos foram realizados a fim de investigar a influência da variabilidade na produção com mais precisão. Dentre os insumos, a água é um recurso essencial para a produção agrícola, pois possui alta relação com a variabilidade da produtividade. Além disso, somam-se também às preocupações com a degradação ambiental. Dessa forma, alternativas para gerenciamento desse recurso de modo mais eficiente passaram a ser alvo de estudo (DUKE; HEERMANN; FRAISSE, 1992; OMARY; CAMP; SADLER, 1997).

Os sistemas de irrigação atuais foram desenvolvidos sem levar em consideração a variabilidade espacial das características do solo. Estes foram projetados com o objetivo de aplicar uma lâmina uniforme ao longo de toda a área considerando as características médias ou condições limitantes do solo e cultura. No entanto, reconhecendo que a variabilidade espacial dos atributos do solo pode influenciar na uniformidade da produção agrícola, surgiu a possibilidade de se projetar sistemas de irrigação capazes de variar a lâmina de irrigação (DUKE; HEERMANN; FRAISSE, 1992), surgindo o que hoje chamamos de irrigação de precisão.

A irrigação de precisão, também conhecida como irrigação à taxa variada, é definida como a aplicação de água em quantidade precisa e no momento certo, de acordo com a variabilidade espacial e temporal do solo e em resposta à demanda da cultura durante os diferentes estágios de desenvolvimento (AL-KUFAISHI; BLACKMORE; SOURELL, 2006).

Partindo deste princípio, os sistemas de irrigação lineares e por pivô central se caracterizavam como sistemas ideais para o desenvolvimento de tecnologia associadas à

irrigação a taxa variada (KING; KINCAID, 2004), principalmente, por serem capazes de cobrir uma grande área irrigada por uma única linha lateral e pela possibilidade de automação.

Em um trabalho desenvolvido por Roth e Gardner (1989) foi registrada uma das primeiras tentativas de desenvolvimento de um sistema para irrigação de precisão. O sistema era equipado por mais de uma linha de aspersão, sendo cada linha projetada para aplicação de uma determinada lâmina de irrigação. Com o intuito de avaliar a aplicação de água e de nitrogênio a taxa variada, o sistema foi adaptado em um sistema de irrigação linear instalando três linhas de aspersores, onde as duas primeiras havia a possibilidade de serem ajustadas para aplicar até cinco lâminas de irrigação diferentes, enquanto a terceira aplicava uma lâmina uniforme.

Posteriormente, outras tentativas foram registradas por Duke, Heermann e Fraisse (1992), Fraisse (1993), Fraisse, Heermann e Duke (1995) ao explorarem a aplicação de lâminas de irrigação, doses de nutrientes e produtos químicos por meio de pulsos de funcionamento dos aspersores controlados por válvulas solenoides, modificando os sistemas de irrigação linear. Baseado nos sistemas citados, Stark *et al.* (1993) relataram o desenvolvimento de um sistema eletrônico de controle para aplicação de água e nutrientes a taxa variada através de um microprocessador, passível de utilização em sistemas de irrigação lineares e por pivô central. Outros relatos de modificações e avaliações desses sistemas apresentados foram registrados na literatura por Farahani *et al.* (2006), King e Kincaid (2004), Omary, Camp e Sadler (1997). No entanto, o princípio de funcionamento não foi alterado por esses autores.

Somente no início do século 21, pesquisas adicionais foram realizadas para avaliação de desempenho e demonstração da tecnologia a campo. Perry e Pocknee (2003) relataram o desenvolvimento de um sistema com a integração de um receptor de sinais de sistemas de satélites de navegação global (GNSS), para coordenar a posição geográfica do sistema de irrigação. Neste estudo, um sistema de irrigação a taxa variada foi comparado com um sistema de aplicação de lâmina uniforme, a fim de investigar a uniformidade de aplicação, que, por sua vez, não apresentou redução.

A viabilidade da irrigação de precisão em um sistema de pivô central foi avaliada por Al-Kufaishi, Blackmore e Sourell (2006). A avaliação foi baseada na capacidade de retenção de umidade do solo, variação da profundidade do solo e desenvolvimento das raízes. Os resultados mostraram que a perda de água foi maior para os cenários de aplicação uniforme do que para aplicações a taxa variável.

Um instrumento sem fio foi desenvolvido por Casanova *et al.* (2014) para detectar momentos de estresses hídricos nas culturas por meio do CWSI. Mais recentemente, Andrade;

O'Shaughnessy e Evett (2015) desenvolveram um software como ferramenta de apoio à decisão para facilitar a comunicação entre usuários, redes de sensores e sistema de irrigação para o gerenciamento da propriedade. Este software foi capaz de integrar os dados coletados para gerar um mapa de prescrição de irrigação. O'Shaughnessy *et al.* (2016) incluíram ao pivô central um sistema de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA) para integração de variáveis espaciais e temporais da lavoura visando aumentar a eficiência do uso de água.

As tecnologias de irrigação de precisão requerem um alto nível de gerenciamento, hardware e software avançados e mapas de prescrição para aplicar água em um campo com base na variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo, características da paisagem e condições de cultivo (EVANS *et al.*, 2013; STONE *et al.*, 2015).

Se tratando de um recurso natural essencial às necessidades vitais de todo ser humano, práticas que proporcionem o uso mais eficiente da água é de fundamental importância. Vários argumentos baseados na conservação dos recursos hídricos e ambientais são fortes justificativas para o desenvolvimento e implementação de sistemas de irrigação capazes de atender demandas específicas dentro da área irrigada através da aplicação de lâmina a taxa variada. No entanto, os benefícios agrônômicos e econômicos advindos dessas estratégias carecem de mais estudos. Mais de duas décadas de pesquisa sobre a irrigação de precisão resultou na adoção limitada da tecnologia devido à falta de benefícios documentados (EVANS *et al.*, 2013).

3.2. Variabilidade espacial das propriedades dos solos

Uma característica intrínseca aos solos é a sua heterogeneidade, tanto no horizonte quanto em profundidade. Assim, o conhecimento da variabilidade espacial das características do solo em determinada área é extremamente importante para o refinamento das práticas de manejo a serem adotadas (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

A variabilidade espacial das características dos solos sempre esteve presente, mas por muito tempo não era considerada no manejo do solo, da água e das culturas. Esta variabilidade são fontes de desuniformidade na produtividade das culturas em áreas irrigadas (CORWIN, 2013). Com esta percepção, a irrigação de precisão passa a agregar a adequação à variabilidade espacial do sistema produtivo (SADLER *et al.*, 2005).

Heermann *et al.* (2002) investigaram as principais características causadoras de desuniformidade na produção agrícola em áreas irrigadas, na qual evidenciaram que a

desuniformidade observada na produtividade das culturas pode ser explicada principalmente pela condição de variação de umidade do solo na área.

A variabilidade espacial das características físicas do solo influencia na variabilidade do teor de umidade do solo, resultando em uma distribuição desigual da água no solo (LONGCHAMPS *et al.*, 2015). Com isso, a mesma quantidade de água aplicada em pontos distintos da lavoura pode proporcionar efeitos totalmente diferentes (STONE *et al.*, 2006). Tais condições revelam a necessidade de se aplicar lâminas variadas em locais diferentes da área.

É dentro desse contexto que, desde a década de noventa, a irrigação de precisão vem sendo desenvolvida. A irrigação de precisão tem o intuito de oferecer água ao solo de acordo a necessidade, considerando a variabilidade espacial e temporal da área, visando tanto a otimização da produção como a conservação dos recursos hídricos e do ambiente (CAMP; SADLER, 2002; STONE *et al.*, 2006).

Vários estudos demonstram que a variabilidade da densidade do solo e o teor de água no solo, não ocorrem ao acaso, mas apresentam correlação ou dependência espacial (ROQUE *et al.*, 2008; SCHAFFRATH *et al.*, 2008; SOUZA *et al.*, 2004).

Variações temporais no conteúdo de água no solo, capacidade de retenção de água, déficit de irrigação, estresse hídrico da cultura também podem causar uma redução significativa no rendimento da cultura (EVANS; SADLER, 2013). Todos esses fatores podem ser usados para a geração de zonas de manejo e mapas de aplicação à taxa variável (CASANOVA *et al.*, 2014; CORWIN, 2013; PAN *et al.*, 2013).

Com isso, a implementação de estratégias de irrigação de precisão para superar a variabilidade do campo pode aumentar substancialmente os rendimentos das culturas em áreas de baixa produção e prevenir a irrigação insuficiente ou excessiva.

Neste contexto, a geoestatística é uma ferramenta eficaz para o estudo da variabilidade espacial dos solos. Ela permite a descrição quantitativa da variabilidade espacial dos atributos do solo e a estimativa não tendenciosa e com variância mínima de valores desses atributos em locais não amostrados (VIEIRA, 2000). Ter acesso a esta variabilidade faz da geoestatística uma ferramenta eficiente de suporte à decisão no manejo do solo, da água e das culturas (CAVALCANTE *et al.*, 2011).

3.3. Utilização de funções de pedotransferência na obtenção de variáveis físico-hídricas do solo

Para realizar o manejo eficiente da irrigação, seja de precisão ou convencional, é essencial o conhecimento do conteúdo de água disponível no solo. Seu conhecimento, por sua vez, se dá em função da densidade do solo e das umidades equivalentes à capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Entretanto, devido à grande variabilidade espacial, aliada ao custo e ao elevado tempo de obtenção, a amostragem desses parâmetros muitas vezes são deficientes. A amostragem deficiente acarreta em baixa representatividade da área de interesse, resultando em tomada de decisões inadequadas (RODRIGUES; MAIA, 2011).

Na tentativa de minimizar os problemas apresentados anteriormente, pesquisadores têm desenvolvido modelos, com embasamento estatístico, empírico ou fisicamente fundamentados, visando a estimativa das propriedades e funções hídricas do solo de forma indireta. Esses modelos, denominados de função de pedotransferência, visam obter variáveis de difícil determinação a partir de outras mais facilmente obtidas.

As funções de pedotransferência descrevem as relações existentes entre variáveis do solo como textura (areia, silte e argila), densidade do solo e matéria orgânica com as propriedades e funções hidráulicas do solo, como a curva de retenção de água no solo e a condutividade hidráulica do solo saturado (HAGHVERDI; OZTURK; CORNELIS, 2014; MCBRATNEY *et al.*, 2002).

Diante do exposto, percebe-se que é necessária uma grande quantidade de dados pontuais para praticar o manejo da irrigação de precisão. Na impossibilidade de obtenção desses dados, as funções de pedotransferência podem ser uma grande aliada da irrigação de precisão. Assim, é possível utilizar informações acessíveis e de fácil obtenção para prever informações de custo elevado e de difícil obtenção em maior densidade.

3.4. Benefícios potenciais da irrigação de precisão

Alguns estudos tentaram investigar os benefícios potenciais da irrigação de precisão. A tecnologia possui grande potencial de melhorar o uso de água e energia e aumentar a eficiência econômica combinando de forma otimizada os insumos agrícolas com a produção (SMITH *et al.*, 2010).

Há um interesse crescente nos benefícios potenciais que as novas tecnologias podem fornecer na melhoria da eficiência hídrica e energética e da produtividade das culturas (DACCACHE *et al.*, 2015). Os autores relataram, ainda, que os benefícios da irrigação de precisão são muito específicos do local e dependem fortemente da variabilidade espacial e

temporal da área. A aquisição de informações adequadas é necessária para atingir todo o potencial da tecnologia.

Evidências sugerem que a economia de água de até 50% pode ser alcançada com o uso da irrigação de precisão (HEDLEY; YULE, 2009, 2012; HILLYER; HIGINS, 2014; SADLER *et al.*, 2005; SMITH *et al.*, 2010). Hedley e Yule (2009) avaliaram os benefícios de economia de água e energia advindas da irrigação de precisão na Nova Zelândia. Esses autores constataram uma economia de água de 20% a 25% e os custos operacionais de irrigação foram reduzidos em até 113 dólares por hectare. LaRue (2011) relatou os benefícios de um sistema de pivô central comercial equipado com a tecnologia de controle de zona com aplicação a taxa variável, onde verificou-se uma redução de 12% na aplicação de água.

Em um estudo realizado por Hillyer e Higin (2014), em três diferentes locais nos EUA, foi feita a implementação de irrigação com déficit e otimização espacial da lâmina de irrigação a fim de melhorar a eficiência de uso da água. Esses autores relataram uma economia de água que variou de 4% a 8,8%.

Mais recentemente, Yari *et al.* (2017) realizaram uma série de estudos no Canadá com os seguintes objetivos: (i) avaliar o desempenho de um sistema de irrigação de precisão, (ii) investigar a variabilidade espacial e temporal de uma área para delineamento de zonas de manejo de irrigação, (iii) quantificar o potencial de economia de água e energia, e (iv) verificar os benefícios da produtividade de trigo e batata provenientes do uso da referida tecnologia. Os resultados obtidos demonstraram que até 34% de economia de água e 18% de economia no custo de energia pode ser alcançada com o uso da irrigação de precisão. Em relação a produtividade, não foram observados aumentos significativos, no entanto, foi verificada produção mais uniforme em qualidade e tamanho dos tubérculos.

Para o emprego da irrigação de precisão é necessário a aplicação de mapas de prescrição de irrigação adequados, sistemas de apoio à decisão e informações espaciais e temporais das propriedades físicas do solo. Com esses dados integrados é possível praticar irrigação de precisão, que proporcionará maximização da produtividade das culturas agrícolas, redução dos impactos ambientais negativos e aumento das eficiências energética e hídrica. Obviamente, existem ainda muitas outras oportunidades a serem exploradas no âmbito da irrigação de precisão, mas também existem algumas barreiras que limitam o emprego desta tecnologia (EVANS *et al.*, 2013). O investimento inicial e a falta de benefícios documentados são as principais barreiras para a expansão da irrigação de precisão.

3.5. Zonas de manejo de irrigação

A tendência atual é implementar a abordagem de zonas de manejo de irrigação para o gerenciamento da água na irrigação de precisão, ao invés da abordagem de gerenciar a variabilidade dentro da área pixel a pixel (HAGHVERDI *et al.*, 2015, 2016; LI *et al.*, 2019, 2008; MENDES *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2010; ZHAO *et al.*, 2018). As zonas de manejo reúnem um conjunto de pixels com características semelhantes em uma única região homogênea, que por sua vez, é manejada igualmente.

Em sistemas que realizam o controle da irrigação por zonas de manejo, seja este de movimento lateral ou pivô central, a aplicação da lâmina de irrigação se dá com a utilização de grupos de aspersores ou aspersores individuais. Esses emissores são capazes de alterar a taxa de aplicação em qualquer zona conforme a demanda (O'SHAUGHNESSY *et al.*, 2016).

Um aspecto importante nesse tipo de manejo é a definição das zonas de manejo de irrigação. O delineamento das zonas de manejo é um processo difícil, devido à combinação complexa da variação espacial e temporal. Além disso, as zonas resultantes devem ser simples, estáveis, precisas com menor custo de identificação possível e permitir o gerenciamento da variação espacial dentro da área (KHOSLA *et al.*, 2010).

O modelo Management Zone Analyst (MZA) desenvolvido por Fridgen *et al.* (2004) tem sido amplamente utilizado para o delineamento das zonas de manejo com base em variáveis espaciais e temporais (LI *et al.*, 2007; MOLIN; CASTRO, 2008; ZHANG *et al.*, 2010). Este modelo adota o algoritmo de agrupamento não supervisionado Fuzzy C-Means (FCM) para agrupar os dados em diferentes regiões homogêneas (FRIDGEN *et al.*, 2004; ODEH; MCBRATNEY; CHITTLEBOROUGH, 1992). Como critério de verificação utilizado para determinar o número adequado de zonas de manejo, está o índice de desempenho de nebulosidade (FPI) e a entropia de classificação normalizada (NCE). O FPI representa o agrupamento de dados com menor compartilhamento de associações. O NCE representa a maior organização espacial dos dados. Neste contexto, após o agrupamento, o número adequado de zonas de manejo é aquele que apresentar menores valores de FPI e NCE (FRIDGEN *et al.*, 2004).

Além do MZA, outros modelos de agrupamento e delineamento de zonas de manejo tem sido empregados para este fim, como o algoritmo Fuzzy C-means (BOLUWADE; MADRAMOOTOO; YARI, 2016; PELCAT *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2010) e a técnica de regionalização com agrupamento restrito e particionamento – REDCAP (BOLUWADE; MADRAMOOTOO; YARI, 2016). O estudo realizado por Boluwade, Madramootoo e Yari

(2016) revelou que o algoritmo Fuzzy C-means usando o software MZA gerou uma boa solução no delineamento de zonas de manejo de irrigação.

3.6. Modelos de simulação

Nas últimas décadas, tem aumentado o uso de novas tecnologias e modelos de simulação baseados em equações matemáticas que descrevem os diversos processos relacionados ao sistema água-solo-planta-atmosfera. Essas ferramentas ajudam no entendimento do processo de produção agrícola e fornecem subsídios para que o usuário tome decisões e realize as intervenções necessárias. Isso possibilita melhorias significativas na produção agrícola e na elaboração de estratégias que visam melhorar a eficiência de uso da água.

Na literatura pode-se encontrar uma variedade de modelos matemáticos que podem ser utilizados na simulação de estratégias de irrigação e do desenvolvimento e rendimento de algumas culturas, tais como Crop-Syst (STOCKLE; DONATELLI; NELSON, 2003), DSSAT (JONES *et al.*, 2003), AquaCrop (RAES *et al.*, 2009; STEDUTO *et al.*, 2009), CROPWAT (AUGUSTIN *et al.*, 2015) e SWAT (MAIER; DIETRICH, 2016). Esses modelos, entretanto, tem aplicação limitada para simulação de estratégias baseadas em irrigação de precisão, pois não levam em consideração a modelagem geoespacial em escala de campo compatível com a abordagem biofísica da cultura.

Do ponto de vista da agricultura de precisão, surgem uma série de questões sobre como a irrigação de precisão pode ser modelada e integrada à simulação do desenvolvimento e rendimento das culturas. As respostas dessas questões certamente contribuirão para o desenvolvimento de modelos capazes de avaliar opções para economizar água e energia, melhorar o rendimento e apoiar a intensificação da agricultura irrigada de forma sustentável. Modelos com finalidade de realizar esse tipo de simulação tornam-se necessários.

Na maioria dos estudos, os efeitos espaciais e temporais relacionados à heterogeneidade de irrigação na produção agrícola são quase sempre agrupados com variáveis de manejo. Isso se deve, principalmente, a complexidade espacial e temporal do manejo de irrigação, em decorrência da variabilidade espacial dos solos e a falta de modelos capazes de simular a distribuição espacial da irrigação. Com isso, é difícil determinar os efeitos em campo das estratégias de manejo da irrigação, incluindo a adoção de tecnologias de irrigação de precisão.

Poucos modelos foram propostos para manejo de irrigação de precisão considerando a variabilidade espacial da área (LIAKOS *et al.*, 2019; NASCIMENTO *et al.*, 2014; OLDONI; BASSOI, 2016; RODRIGUES *et al.*, 2001, 2018). O que é mais comum, para este fim, é a utilização de abordagens de modelagem envolvendo a integração entre dois modelos (BARNES *et al.*, 2000; CID-GARCIA; BRAVO-LOZANO; RIOS-SOLIS, 2014; GONZÁLEZ PEREA *et al.*, 2018; KASSING; SCHUTTER; ABRAHAM, 2020; LOZOYA *et al.*, 2016). Por exemplo, González Perea *et al.* (2018) integraram um modelo determinístico de aplicação de água/irrigação (WAM) (AMES, 2007) com modelo biofísico (Aquacrop) (STEDUTO *et al.*, 2009). Os autores constataram que a abordagem integrada de modelagem permitiu avaliar os impactos espaciais e temporais da heterogeneidade de irrigação sobre o rendimento das culturas e o manejo da água do solo em escala de campo.

Uma nova abordagem de modelo de simulação que está sendo alvo de estudos é o Modelo de Simulação de Estratégias de Irrigação (MSEI), desenvolvido por Rodrigues e Moreira (2015). Em trabalho realizado por Alves *et al.* (2019), o MSEI foi utilizado com o intuito de se conhecer a influência de algumas variáveis relacionadas ao clima e a planta na lâmina total de irrigação. Os autores constataram que o MSEI permitiu a simulação da lâmina de irrigação em diferentes cenários de forma ágil e confiável. Recentemente, foi implementada ao MSEI uma extensão capaz de realizar simulações de estratégias baseadas na irrigação de precisão, a partir de mapas indicativos das características físico-hídricas do solo interpoladas e dados inerentes ao clima e a cultura de interesse. Embora não tenha sido aplicado ainda em nenhum trabalho, há perspectivas de que o modelo seja capaz de realizar simulações precisas e coesas, gerando bons resultados.

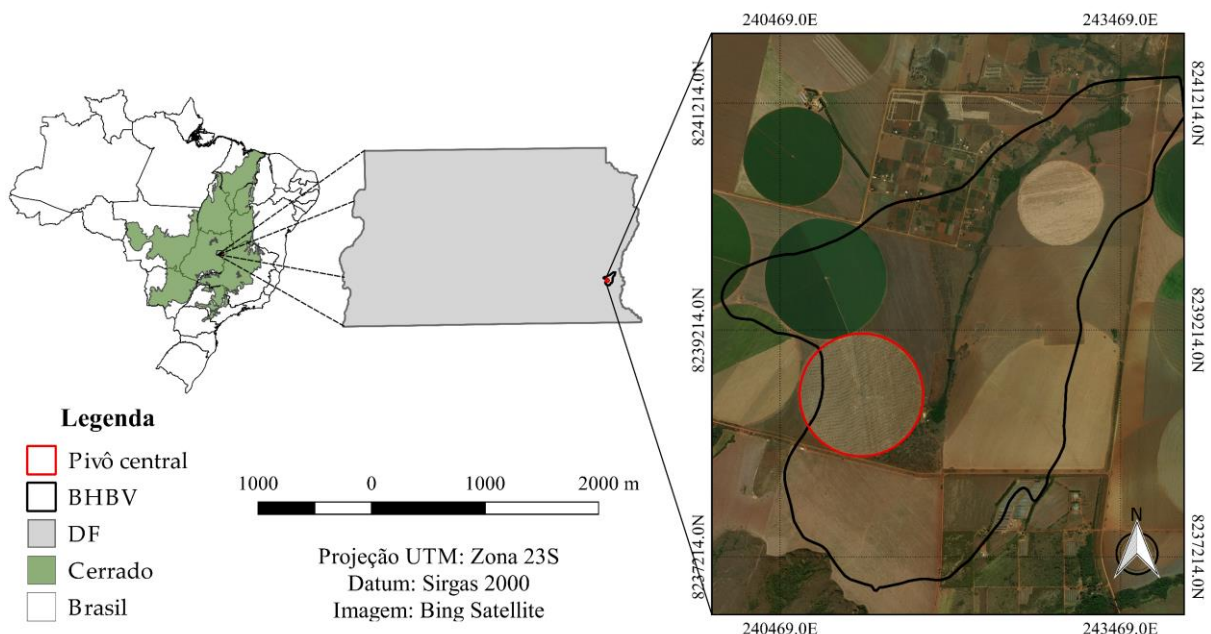
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de Estudo

A fim de avaliar a efetividade da irrigação de precisão em diferentes ambientes, realizou-se o estudo em dois sistemas de irrigação por pivô central com solos apresentando características físico-hídricas distintas. O primeiro estudo, denominado de PivoBHBV, foi realizado em um pivô central localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho (BHBV). O segundo estudo, denominado de PivoBHALPA, foi realizado em um pivô central localizado na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (BHALPA). O PivoBHBV apresenta solo com pouca variabilidade espacial na sua textura, com predominância de argila (57,2%). O PivoBHALPA possui solo com elevada variabilidade textural.

O PivoBHBV possui uma área de 92,8 hectares e está situado, em sua maior parte, na Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho (BHBV), localizada na parte leste do Distrito Federal, inteiramente inserida na região do Cerrado brasileiro (Figura 1).

Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho, com destaque para o pivô utilizado nas simulações (PivoBHBV).

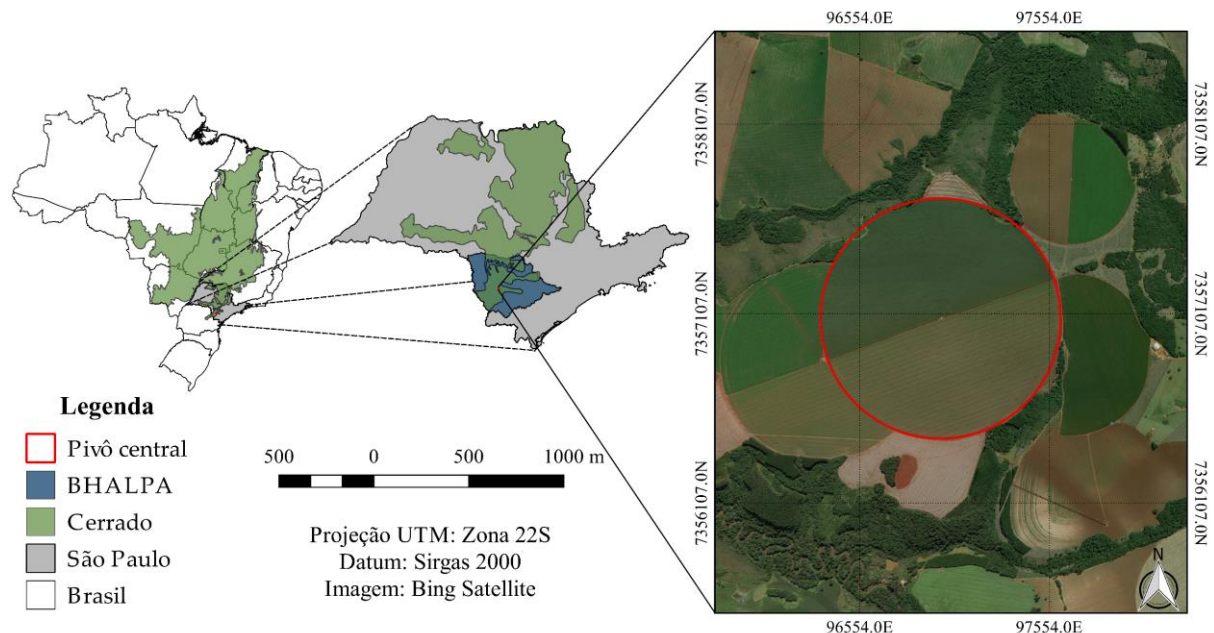


A região da BHBV é caracterizada por uma estação seca, que se inicia em abril e termina em setembro, e por uma estação chuvosa, que se estende de outubro a março (WENDT *et al.*, 2015). A precipitação anual média que incide sobre a bacia é da ordem de 1.100 mm, dos

quais 85% correspondem ao período chuvoso (RODRIGUES *et al.*, 2012). Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificada como Aw, isto é, clima quente com chuva de verão (ALVARES *et al.*, 2014). A temperatura do ar média é de aproximadamente 22 °C, umidade relativa do ar média de 69% e evapotranspiração de referência máxima média em torno de 5,7 mm d⁻¹. No levantamento de solos realizado na bacia, verificou-se que em aproximadamente 94,9% de sua área de drenagem a classe predominante é o Latossolo Vermelho, seguido de 3,0% de Cambissolos e de 2,1% de Gleissolos (PASSO *et al.*, 2014). O uso e ocupação do solo na bacia é predominantemente agrícola, com área irrigada composta por três pivôs centrais, que ocupam cerca de 229,0 hectares, e por uma área de 96,9 hectares ocupada por pequenos agricultores (MOREIRA *et al.*, 2010). A soja é a principal cultura de sequeiro e irrigada, juntamente com o milho, trigo e feijão.

O PivoBHALPA possui uma área de 126,6 hectares e está situado na Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (BHALPA), em Itapeva, região sudoeste do estado de São Paulo, localizada na região do Cerrado brasileiro (Figura 2).

Figura 2 – Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema, com destaque para o pivô utilizado nas simulações (PivoBHALPA).



O clima da BHALPA é classificado como tropical úmido com ligeira variação entre as regiões mais ao interior. O período mais chuvoso vai de setembro a março, sendo janeiro o mês de maior pluviosidade, e o período mais seco do ano se estende de abril a agosto. Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificada como Cfa, isto é, clima

temperado, sem estação seca e verão quente (ALVARES *et al.*, 2014). A precipitação anual média que incide sobre a bacia é da ordem de 1.300 mm. A temperatura do ar média é de aproximadamente 21°C, umidade relativa do ar média de 74% e evapotranspiração de referência máxima média em torno de 5,0 mm d⁻¹. No levantamento de solos realizado na bacia (EMBRAPA, 2011), verificou-se que em aproximadamente 60,3% de sua área de drenagem a classe predominante é o Latossolo Vermelho, seguido de 22,8% de Argissolo Vermelho, de 11,9% de Cambissolos e de 0,45% de Neossolos. O uso e ocupação do solo é predominantemente de atividades agropecuárias, seguido de vegetação nativa que representa aproximadamente 15% de toda a área da bacia. Na porção central da BHALPA, ocupada pelo bioma Cerrado, há elevada demanda de uso da água para a irrigação de culturas como soja, trigo, milho, feijão, cana-de-açúcar, silvicultura e algodão, que constituem as principais culturas cultivadas na região. A irrigação por pivô central é bem expressiva na BHALPA (CBH-ALPA, 2016).

4.2. Base de dados

4.2.1. Dados climáticos

Os dados climáticos necessários para as simulações do manejo de irrigação no PivoBHBV foram obtidos de uma estação meteorológica monitorada pela Embrapa Cerrados, localizada a ~40 Km da área de estudo. Os dados climáticos necessários para a simulação do manejo de irrigação no PivoBHALPA foram obtidos de uma estação meteorológica monitorada pela própria propriedade, localizada a 2 Km da área de estudo. Essas estações fazem registros horários de variáveis como temperatura (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s⁻¹), radiação solar (W m⁻²) e precipitação (mm).

4.2.2. Dados de solo

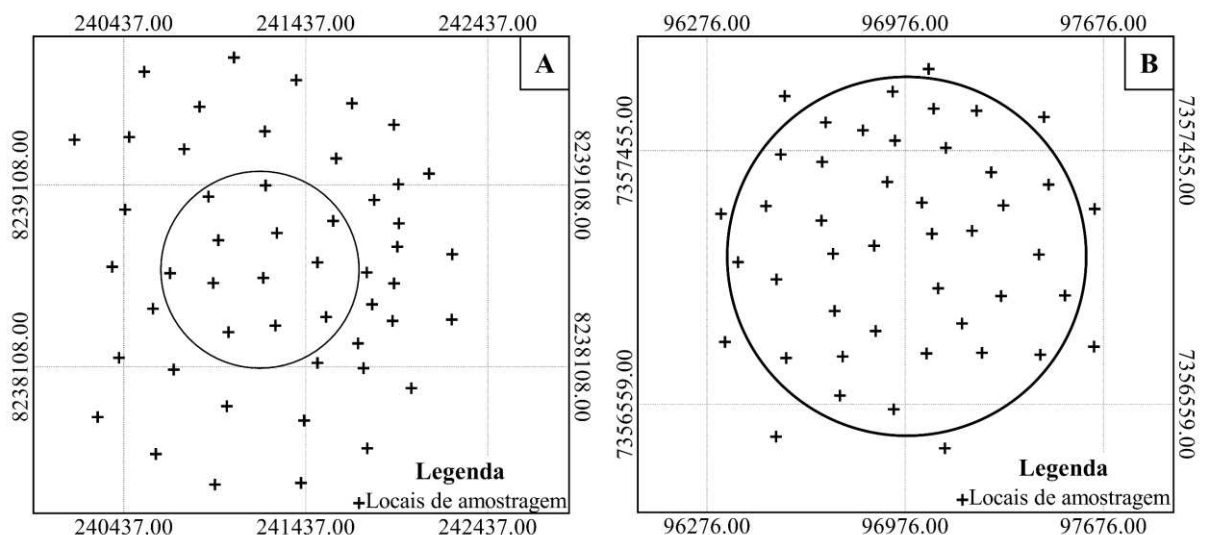
No PivoBHBV, os dados de solos necessários, em sua maior parte, foram provenientes de trabalho realizado por Rodrigues e Maia (2011). Esses autores coletaram amostras de solos em 99 locais dentro da BHBV e apresentaram dados referentes a umidade do solo na capacidade de campo (CC), umidade do solo no ponto de murcha permanente (PMP), densidade do solo (DS) e textura do solo. Dos 99 locais, foram utilizadas informações daqueles localizados dentro

da área de abrangência do pivô e aqueles localizados em uma distância de até 500 m do seu limite, totalizando 42 pontos.

Após a seleção dos pontos, foi feita uma análise visual da espacialização dos dados dentro da área do pivô. Essa avaliação possibilitou identificar locais com baixa densidade amostral. Com base nessa análise, foram coletadas amostras de solo em mais 8 locais dentro da área do pivô, totalizando 50 pontos (Figura 3A). As amostras foram retiradas com estrutura deformada e indeformada, com cinco repetições. As curvas de retenção foram determinadas pelo método padronizado da centrífuga (SILVA; AZEVEDO, 2002), considerando os pontos de tensão de 1; 6; 33; 100; 300 e 1500 kPa.

No PivoBHALPA, foram obtidas amostras de solo, com estrutura deformada e indeformada, em 45 locais dentro da área de abrangência do pivô e em seu entorno (Figura 3B). As amostras foram coletadas com duas repetições. As amostras de solo deformadas foram destinadas à análise de textura do solo, realizada conforme os procedimentos descritos em (EMBRAPA, 2017). As amostras de solo indeformadas foram destinadas para levantamento da curva de retenção e para a determinação da densidade do solo, realizadas conforme os procedimentos do Instituto Agrônomo de Campinas (CAMARGO *et al.*, 2009). No levantamento das curvas de retenção foram considerados os pontos de tensão de 1; 10; 33 e 1500 kPa.

Figura 3 – Representação dos locais de amostragem. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA.



Nos dois pivôs, as amostras de solo foram retiradas de forma a representar a camada de solo de 0 a 30 cm, representando, em termos médios, a camada de solo agricultável.

No PivoBHALPA foram obtidos dados de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) da base de dados fornecida pela GREEN RESULTADOS EM GESTÃO LTDA. Esses dados foram obtidos por meio do Elletro II, um medidor de arraste acoplado em um veículo motor, fabricado pela própria GREEN RESULTADOS EM GESTÃO LTDA. Este equipamento faz a medição de dados de CEa georreferenciados de forma contínua, os quais são salvos em software próprio operado por um computador portátil. A CEa foi coletada considerando a camada de 0 a 75 cm, com medição de dados a cada 5 metros na linha de passagem e passadas laterais de 25 a 30 metros.

4.2.3. Modelo digital de elevação do terreno e declividade

O modelo digital de elevação (MDE) e a declividade do terreno para os dois pivôs foram gerados com base nas imagens de satélite do sensor Alos Palsar, obtidas gratuitamente através da plataforma Alaska Satellite Facility (www.vertex.daac.asf.alaska.edu/). O produto do sensor Alos Palsar possui resolução espacial de 12,5 m.

4.3. Manejo de irrigação

Para fins de avaliação do potencial de economia de água e energia e de aumento de produtividade advindos do uso da irrigação de precisão, utilizou-se o valor da água disponível no solo (AD) como referência para o manejo de irrigação. No manejo denominado de convencional (MC), não foi considerado a variação espacial da AD na área irrigada. No manejo, denominado aqui por diante de irrigação de precisão (IP), foi considerado a variabilidade espacial da AD.

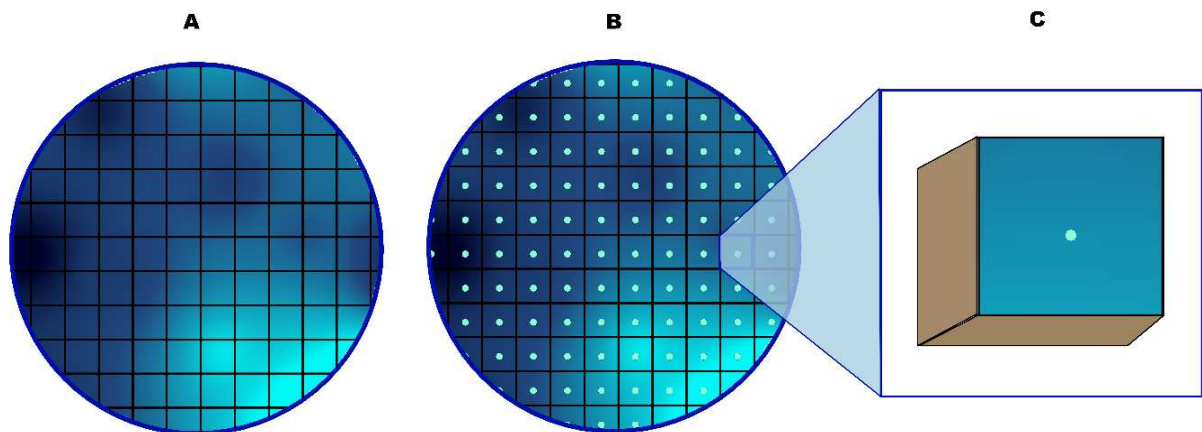
Para avaliação da variabilidade espacial da AD na área irrigada, foi realizada uma análise de geoestatística nos dados de CC, PMP e DS. Em seguida, foi realizada a interpolação dos dados, considerando locais de amostragem dentro e fora da área irrigada pelo pivô central.

A interpolação dos dados foi realizada por meio de Krigagem Simples, com a resolução espacial de 5 x 5 m, 10 x 10 m e 15 x 15 m, utilizando o software R v. 1.2.1335 (R CORE TEAM, 2019). Nos casos em que a dependência espacial foi classificada como fraca, conforme o Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por (CAMBARDELLA et al., 1994), os mapas foram interpolados pelo método do inverso da distância, potência 2, utilizando as mesmas resoluções espaciais.

Com a interpolação (Figura 4A) foi gerado um valor de CC, PMP e DS para cada pixel (Figura 4B). Esses valores foram utilizados no manejo da irrigação e estimativa da irrigação necessária pixel a pixel, sendo cada pixel considerado homogêneo para fins de manejo (Figura 4C). De posse dos dados interpolados de CC, PMP e DS, os valores de AD foram calculados.

Ou seja, o manejo de irrigação foi realizado de forma individualizada em cada um dos pixels que constituem a área total do pivô central, sendo o PivoBHBV constituído por 37.191; 9.346 e 4.154 pixels, e o PivoBHALPA por 50.649; 12.860 e 5.655 pixels, nos tamanhos de 5 x 5, 10 x 10 e 15 x 15 m, respectivamente.

Figura 4 – (A) Mapa de interpolação das características físicas do solo com resolução espacial de 5 m x 5 m, (B) geração de um valor para cada pixel, e (C) pixel discretizado para manejo individualizado.



4.3.1. Manejo convencional

No manejo convencional, o solo foi considerado homogêneo com base no valor da AD. Neste caso, foram elaborados três cenários: (i) menor valor de AD (MC1); (ii) valor médio de AD (MC2); e maior valor de AD (MC3).

No caso do cenário 1, por exemplo, o manejo foi realizado utilizando como referência o menor valor de AD para toda a área irrigada. Ou seja, no caso, por exemplo, do PivoBHBV e de pixels com área de 25 m², utilizou-se no manejo o menor valor absoluto de AD referente aos 37.191 pixels que constituem a área do pivô.

4.3.2. Manejo de irrigação de precisão

No caso da irrigação de precisão (IP), o manejo foi feito considerando-se a variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas do solo. Ou seja, o manejo de irrigação foi realizado de forma individualizada em cada um dos 37.191 (PivoBHBV) e 50.649 (PivoBHALPA) pixels que constituem a área total do pivô central, quando considerado o tamanho de pixel de 5 x 5 m.

4.3.3. Manejo de irrigação por zonas de manejo

A fim de avaliar a viabilidade e a redução da variabilidade espacial com o manejo de irrigação por meio de zonas de manejo de irrigação (ZMI), este foi comparado ao manejo de irrigação de precisão, na qual considera cada pixel como uma unidade de manejo. Para isto, pixels com características de solos semelhantes, definido com base em intervalo de valores, foram agrupados. Esses grupos de pixels com características semelhantes definiram as regiões homogêneas. O manejo dentro de cada região homogênea foi realizado considerando um único valor de AD.

4.3.3.1. Análise de agrupamento dos dados e definição das zonas de manejo de irrigação

Neste trabalho, tanto no PivoBHBV, quanto no PivoBHALPA, as zonas de manejo de irrigação foram construídas com base no conteúdo de água disponível no solo.

Após a interpolação destes dados foi realizada a análise de agrupamento dos dados em classes, utilizando o programa computacional Management Zone Analyst - MZA 1.0.1® (FRIDGEN *et al.*, 2004). Este modelo adota o algoritmo de agrupamento não supervisionado, denominado Fuzzy C-Means (FCM), para agrupar os dados em diferentes regiões homogêneas.

Para definir o número mais apropriado de zonas de manejo foi utilizado o Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Classificação Normalizada (NCE) (FRIDGEN *et al.*, 2004; ODEH; MCBRATNEY; CHITTLEBOROUGH, 1992; SUN *et al.*, 2011). Realizou-se a classificação com o número de zonas de manejo variando de 2 a 6, sendo que para cada classificação foram determinados os índices FPI e NCE. Segundo (ODEH; MCBRATNEY; CHITTLEBOROUGH, 1992), o número mais apropriado de zonas foi definido com base no menor FPI e uma maior organização nos grupos, na qual é expressa por uma menor NCE, obtida no processo de agrupamento.

4.4. Modelo de simulação das estratégias de manejo de irrigação

O manejo da irrigação convencional foi realizado por meio do Modelo de Simulação de Estratégia de Irrigação (MSEI) (RODRIGUES; MOREIRA, 2015). Para realizar o manejo no caso da irrigação de precisão, foi desenvolvido, em linguagem Python, um módulo específico de irrigação de precisão. Esse módulo foi acoplado ao modelo MSEI.

A versão do MSEI utilizada não possui interface gráfica individualizada, sendo executado em ambiente Python. Para iniciar o processo de simulação, é necessário configurar o modelo MSEI, definindo as características gerais do modelo, do solo, do clima e da planta. A primeira configuração é feita no arquivo denominado “*Crop Parameters*”. Esse arquivo é utilizado para definir a cultura e suas características, tais como tempo para germinação, profundidade mínima e máxima do sistema radicular, duração do ciclo, produtividade potencial, coeficiente da cultura (K_c), fator de resposta de produção ao déficit hídrico (K_y), etc..

O “*Model Parameters*” é o segundo arquivo de configuração. Neste arquivo, são definidas informações necessárias para a execução do modelo de estimativa da evapotranspiração atual da cultura (ET_a), do modelo de evaporação do solo e o modelo de transpiração da planta, tais como o coeficiente de redução da evaporação do solo (K_s), albedo, índice de área foliar máximo, densidade de plantio, temperatura basal da cultura, e coeficientes necessários à execução do modelo de Ritchie. No “*Model Parameters*”, define-se também as informações sobre o sistema de irrigação, quanto a eficiência de irrigação, eficiência de bombeamento, número de dias para aplicar a lâmina bruta de irrigação, porcentagem de tempo de funcionamento do sistema e a carga dinâmica total.

No terceiro arquivo, denominado “*Model Configuration*”, define-se o local onde os arquivos de entrada estão armazenados, tais como arquivos de clima (evapotranspiração de referência (ET_o) e precipitação) e arquivos geoespaciais com os valores de CC, PMP e DS. Neste arquivo, define-se também o módulo do modelo a ser utilizado, neste caso, o módulo de irrigação de precisão, e a versão do módulo de irrigação de precisão, ou seja, considerar o valor de AD real do pixel ou um único valor representativo para a área. Os parâmetros/variáveis de entrada do MSEI utilizados, neste trabalho, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros/Variáveis de entrada do Modelo de Simulação de Estratégia de Irrigação (MSEI).

Parâmetro/Variável	Dado de entrada	Unidade
Cultura		
Data de semeadura	254 - 284 - 315 -345	DJ
Tempo para germinação	5	dias
Duração do ciclo	110	dias
Profundidade máxima do sistema radicular (Z_{max})*	60	cm
Profundidade mínima do sistema radicular (Z_{min})*	5	cm
Coeficiente da cultura - Germinação (K_{CI})*	0,30	adimensional
Coeficiente da cultura - Inicial (K_{CII})*	0,50	adimensional
Coeficiente da cultura - Fase Média (K_{CIII})*	1,15	adimensional
Coeficiente da cultura - Fase Final (K_{CIV})*	0,5	adimensional
Fator de resposta de produção ao déficit hídrico (K_y)	0,85	adimensional
Produtividade máxima (Y_m)	4200	Kg ha ⁻¹
Clima		
Evapotranspiração de referência (ET _o)	-	mm d ⁻¹
Precipitação (Prec)	-	mm
Solo		
Capacidade de campo (CC)	-	%
Ponto de murcha permanente (PMP)	-	%
Densidade global do solo (DS)	-	g/cm ³
Coeficiente de redução da evaporação do solo 1° (K_{SI})*	0,90	adimensional
Coeficiente de redução da evaporação do solo 2° (K_{SII})*	0,80	adimensional
Coeficiente de redução da evaporação do solo 3° (K_{SIII})*	0,50	adimensional
Coeficiente de redução da evaporação do solo 4° (K_{SIV})*	0,40	dimensional
Coeficiente de redução da evaporação do solo 5° (K_{SV})*	0,30	adimensional
Coeficiente de redução da evaporação do solo 6° (K_{SVI})*	0,10	adimensional
Sistema		
Porcentagem de tempo de funcionamento do sistema (t)	0,90	adimensional
Eficiência de irrigação (Ei)	0,80	adimensional
Eficiência de bombeamento (Eb)	0,80	adimensional
Carga dinâmica total (TDH)	60	m

*É necessário associar esses dados ao tempo ou percentual de tempo necessário para alcançar o valor. Os dados de clima são correspondentes ao ciclo cultura. Os dados de solo (CC, PMP e DS) são inseridos em arquivo raster, contendo dados pixel a pixel.

As simulações foram realizadas considerando dois anos com condições climatológicas contrastantes, em termos de total precipitado, ou seja, um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS), quatro datas de semeadura da cultura de soja (DS), três cenários de manejo considerando o solo uniforme (MC1, MC2 e MC3) e manejos considerando irrigação em pixels e em zonas de manejo, totalizando, em cada pivô central, 40 cenários.

Os anos chuvosos e secos foram selecionados através de uma análise da série histórica de dados diários de precipitação, considerando os dois pivôs centrais, na qual foi obtido o total precipitado para cada ano. Para o PivoBHBV, o ano chuvoso foi 2014/2015 e o ano seco foi 2015/2016, e para o PivoBHALPA, o ano chuvoso foi 2015/2016 e o ano seco foi 2016/2017. As quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS) utilizadas em cada ano foram: DS1 = 10 de setembro (DJ = 254); DS2 = 10 de outubro (DJ = 284); DS3 = 10 de novembro (DJ = 315); e DS4 = 10 de dezembro (DJ = 345).

No total foram realizadas 240 simulações. Em cada simulação foram obtidos os seguintes resultados: evapotranspiração atual da cultura, lâmina de irrigação percolada, lâmina de irrigação total, energia requerida e produtividade da cultura de soja para os 40 cenários de manejo de irrigação descritos anteriormente.

Para a estimativa da umidade do solo e a lâmina de irrigação necessária, o MSEI utiliza a equação de conservação de massa. Desprezando-se a ascensão capilar, o déficit de umidade no solo no dia i (SWD_i) é calculado pela Equação 1.

$$SWD_i = SWD_{i-1} + ETa_i - R_i - I_{ri} \quad (1)$$

em que:

R_i = precipitação efetiva, mm;

I_{ri} = lâmina de irrigação aplicada, mm;

SWD_{i-1} = déficit de umidade do solo no dia $i-1$, mm; e

ETa_i = evapotranspiração atual diária da cultura, mm d^{-1} .

A evapotranspiração atual diária da cultura é calculada pela Equação 2 (JENSEN; HEERMANN, 1970):

$$ETa_{i,j} = ET_{o_{i,j}} [Kc_{i,j} Ks_{i,j} + Ke (0,9 - Kc_{i,j})] \quad (2)$$

em que:

Kc = coeficiente de cultura médio;

Ks = coeficiente de redução da evaporação do solo;

Ke = coeficiente de correção da evapotranspiração da cultura; e

$ET_{o_{i,j}}$ = evapotranspiração de referência, mm d^{-1} .

A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman-Monteith-FAO (ALLEN *et al.*, 1998), pela Equação 3.

$$ET_{O_i} = \frac{0,4082\Delta(R_n - G) + \gamma^* \frac{900}{T+273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma^*(1+0,34 u_2)} \quad (3)$$

em que:

Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação, kPa °C⁻¹;

γ^* = constante psicrométrica = 0,063 kPa °C⁻¹;

R_n = saldo de radiação a superfície, MJ m⁻² d⁻¹;

G = fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;

T = temperatura média do ar, °C;

u_2 = velocidade do vento medida a 2 metros de altura, m s⁻¹;

e_s = pressão de saturação de vapor, kPa;

e_a = pressão parcial de vapor, kPa; e

($e_s - e_a$) = déficit de saturação de vapor, kPa.

Ao final das simulações, o módulo de irrigação de precisão do MSEI gera informações pixel a pixel, referentes a demanda hídrica e energética da cultura, bem como a produtividade final da cultura, o índice de adequabilidade atual da irrigação e a produtividade de uso da água de irrigação.

4.5. Avaliação do potencial de economia de água e energia

A avaliação do potencial de economia de água e de energia foi realizada por meio da comparação da irrigação da cultura da soja manejada em condições de irrigação de precisão com a irrigação da soja no manejo convencional, considerando os três cenários de manejo convencional descritos. Além disso, os cenários do manejo convencional foram comparados a irrigação realizada considerando as zonas de manejo de irrigação. Para isso foram avaliados: (i) potencial de economia de água (PEA), Equação 4; (ii) potencial de redução da percolação profunda (PRPP), Equação 5; (iii) potencial de redução de déficit hídrico (PRDH), Equação 6; (iv) índice de adequabilidade atual da irrigação (IA), Equação 8; e (iv) potencial de redução de energia (PEE), Equação 12.

$$PE(A) = L_{MC} - L_{IP} \quad (4)$$

$$PR(PP) = PP_{MC} - PP_{IP} \quad (5)$$

$$PR(DH) = DH_{MC} - DH_{IP} \quad (6)$$

em que:

PE e PR= Potencial de economia e potencial de redução, respectivamente;

L = lâmina total de irrigação aplicada, mm;

A = água de irrigação, mm;

PP = percolação profunda total, mm;

DH = déficit hídrico total, mm; e

MC e IP = indicam manejo convencional e irrigação de precisão, respectivamente.

Na irrigação de precisão, a L_{IP} , o PP_{IP} e o DH_{IP} totais foram calculados pela Equação 7.

$$L_{IP}, PP_{IP}, DH_{IP}, = \sum_{i=1}^j Y_i \quad (7)$$

em que:

$Y = L, PP$ ou DH .

j = é número de pixel. Por exemplo, $j = 37.191$ para o pivô PivoBHBV dividido em pixels de 25 m^2 .

O índice de adequabilidade atual da irrigação (IA), conforme Rodrigues *et al.* (2003), se fundamenta na indicação de quão bem uma meta pré-estabelecida foi atingida. Para avaliar o manejo de irrigação para as estratégias de manejo propostas, a lâmina de irrigação total simulada para as condições de manejo convencional foi comparada a lâmina de irrigação real necessária (irrigação de precisão).

Dada esta condição, a meta estabelecida, de acordo com cada estratégia de manejo de irrigação, foi de aplicar a quantidade de água necessária de acordo com as características reais de cada pixel.

Sendo assim, o índice de adequabilidade atual da irrigação foi calculado por meio da Equação 8.

$$IA = \frac{L_{MC}}{L_{IP}} \quad (8)$$

Baseado na própria definição deste índice, tem-se que um valor < 1,0 indica irrigação deficitária, um valor = 1,0 irrigação adequada e um valor > 1,0 irrigação excessiva.

Para a avaliação do potencial de economia de energia (PEE), o modelo calcula a potência necessária para bombear uma determinada quantidade de água, por meio da Equação 9.

$$BP = \frac{(Q \text{ TDH } \gamma)}{E_f} \quad (9)$$

em que:

BP = Potência necessária para bombeamento, em kW;

Q = vazão total do sistema, em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$;

TDH = carga dinâmica total, em m;

γ = peso específico da água (9806,65), em N m^{-3} ;

E_f = eficiência total do sistema, em decimal.

Foi considerada uma carga dinâmica total igual a 60 m e a eficiência total do sistema igual a 80%. A vazão do sistema foi calculada pela Equação 10.

$$Q = \frac{(A_i \text{ LB})}{86400 \text{ j t}} \quad (10)$$

em que:

A_i = área irrigada, em ha;

LB = lâmina bruta de irrigação, em mm;

j = número de dias para aplicar a LB (110 dias);

t = porcentagem de tempo de funcionamento do sistema, decimal.

A LB utilizada corresponde ao total de água aplicado durante o ciclo da cultura, isto é, 110 dias. A área do pivô é calculada em função do número de pixels e da área de cada pixel. Com isso, a energia requerida (ER) para aplicar determinada quantidade de água é obtida pela Equação 11.

$$ER = BP H \quad (11)$$

em que H é o tempo em horas.

O potencial de economia de energia (PEE), em kW, foi calculado pela Equação 12.

$$PEE = ER_{MC} - ER_{IP} \quad (12)$$

em que:

ER_{MC} = Energia requerida no manejo convencional, kW;

ER_{IP} = Energia requerida no manejo de irrigação de precisão, kW.

As avaliações dos indicadores (PEA, PRPP, PRDH, IA, PEE) foram feitas para cada uma das estratégias de manejo de irrigação convencional e para a estratégia de zonas de manejo de irrigação, considerando o manejo de irrigação de precisão como o manejo de referência.

4.6. Avaliação do potencial de aumento de produtividade

Para avaliar do potencial de aumento de produtividade (PAP), o rendimento da cultura foi calculado para a condição de manejo convencional, zonas de manejo de irrigação e de irrigação de precisão. Neste último caso, o rendimento foi calculado para cada pixel do pivô. O rendimento da cultura foi calculado pela Equação 13, conforme descrito por Stewart *et al.* (1977) e apresentado por Doorenbos e Kassam (1979).

$$Y_a = Y_m \left[1 - K_y \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{110} ET_{ai}}{\sum_{i=1}^{110} ET_{mi}} \right) \right] \quad (13)$$

em que:

Y_a = rendimento atual da cultura, Kg ha⁻¹;

Y_m = rendimento máximo da cultura, Kg ha⁻¹;

ET_{ai} = evapotranspiração atual total, mm;

ET_{mi} = evapotranspiração máxima total, mm; e

K_y = Fator de resposta da cultura, adimensional.

Foi considerado o fator de resposta da cultura (K_y) com valor igual a 0,85 para o ciclo da cultura da soja, conforme proposto por Doorenbos e Kassam (1979).

A avaliação do potencial de aumento de produtividade (PAP) foi realizada por meio da comparação da irrigação da cultura manejada em condições de irrigação de precisão com a irrigação em manejo convencional, conforme a Equação 14.

$$PAP = Y_{m_{IP}} - Y_{m_{MC}} \quad (14)$$

Todas as avaliações de estimativa do rendimento da cultura foram realizadas considerando cada um dos cenários de manejo convencional e para os manejos de irrigação de precisão e zonas de manejo de irrigação.

4.7. Produtividade de uso da água

A produtividade de uso de água de irrigação (PUA), em kg m^{-3} , foi calculada por meio da relação entre o rendimento da cultura com a lâmina de irrigação total aplicada (Equação 15), conforme Payero *et al.* (2009).

$$PUA = \frac{Y_a}{I_{ri}} \quad (15)$$

em que:

Y_a = rendimento atual da cultura, Kg ha^{-1} ;

I_{ri} = lâmina de irrigação aplicada, mm.

4.8. Análise econômica

Por fim, foi realizada uma análise econômica considerando todas as estratégias de manejo de irrigação utilizadas neste trabalho. Esta análise foi realizada considerando-se a diferença entre a receita bruta e o custo de produção total, gerados com base em cada uma das estratégias de manejo de irrigação avaliada.

A receita bruta ($\text{R\$ ha}^{-1}$) foi calculada em função da produtividade simulada para cada estratégia e o valor cotado para a venda da soja para a região na qual cada pivô está inserido, por meio da Equação 16.

$$RB = \left(\frac{Ya}{60} \right) Cot \quad (16)$$

em que:

RB = receita bruta, R\$ ha⁻¹;

Ya = rendimento atual da cultura; Kg ha⁻¹; e

Cot = cotação da saca de soja, R\$ saca⁻¹.

O custo de produção médio (CP) da soja na região foi obtido da base de dados de produção da Companhia Nacional de Desenvolvimento (<https://www.conab.gov.br/info-agro/custos-de-producao>), na qual são disponibilizadas informações detalhadas do custo de produção da cultura naquela região durante todas as etapas do ciclo produtivo, levando em conta as despesas de custeio da lavoura, despesas financeiras, depreciações e taxas e encargos. As informações utilizadas são referentes ao custo de produção do ano de 2019. Todas as informações, relacionadas ao custo de produção médio, foram consideradas iguais para todas as estratégias de manejo de irrigação, alterando-se apenas o custo da energia elétrica.

O cálculo do custo da energia elétrica (CEE), por sua vez, foi realizado com base na energia requerida (kW) simulada para cada estratégia multiplicada pela tarifa de consumo (R\$ kWh⁻¹) referente a região em que o pivô se encontra, sendo a tarifa de consumo aplicada para utilização noturna do sistema de irrigação. Considerou-se a tarifa de energia elétrica vigente pelas concessionárias responsáveis pela distribuição da energia nas regiões em que os pivôs se encontram.

As informações referentes a cotação de venda da soja e de tarifas de energia elétrica, para as duas áreas de estudo, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Cotação de venda da soja e tarifa de energia elétrica.

Pivô Central	Cotação venda soja			Tarifa energia elétrica			
	R\$ saca ⁻¹ *	R\$ kg ⁻¹	Fonte	Bandeira	R\$ kWh ⁻¹	ICMS (%)	Fonte
PivoBHBV	72,82	1,21	Conab (2019)	B2 -Rural Irrigante	0,384	18	CEB
PivoBHALPA	72,13	1,20	Conab (2019)	B2 -Rural Irrigante	0,384	18	ELEKTRO

*saca = 60 kg.

O somatório de todos os custos citados constitui o custo de produção total (CPT), conforme Equação 17.

$$\text{CPT} = \text{CP} + \text{CEE} \quad (17)$$

em que:

CPT = custo de produção total, R\$ ha⁻¹;

CP = custo de produção de soja, R\$ ha⁻¹;

CEE = custo de energia elétrica, R\$ kWh⁻¹.

A lucratividade foi obtida pela diferença entre a receita bruta e o custo de produção total (Equação 18).

$$\text{L} = \text{RB} - \text{CPT} \quad (18)$$

em que:

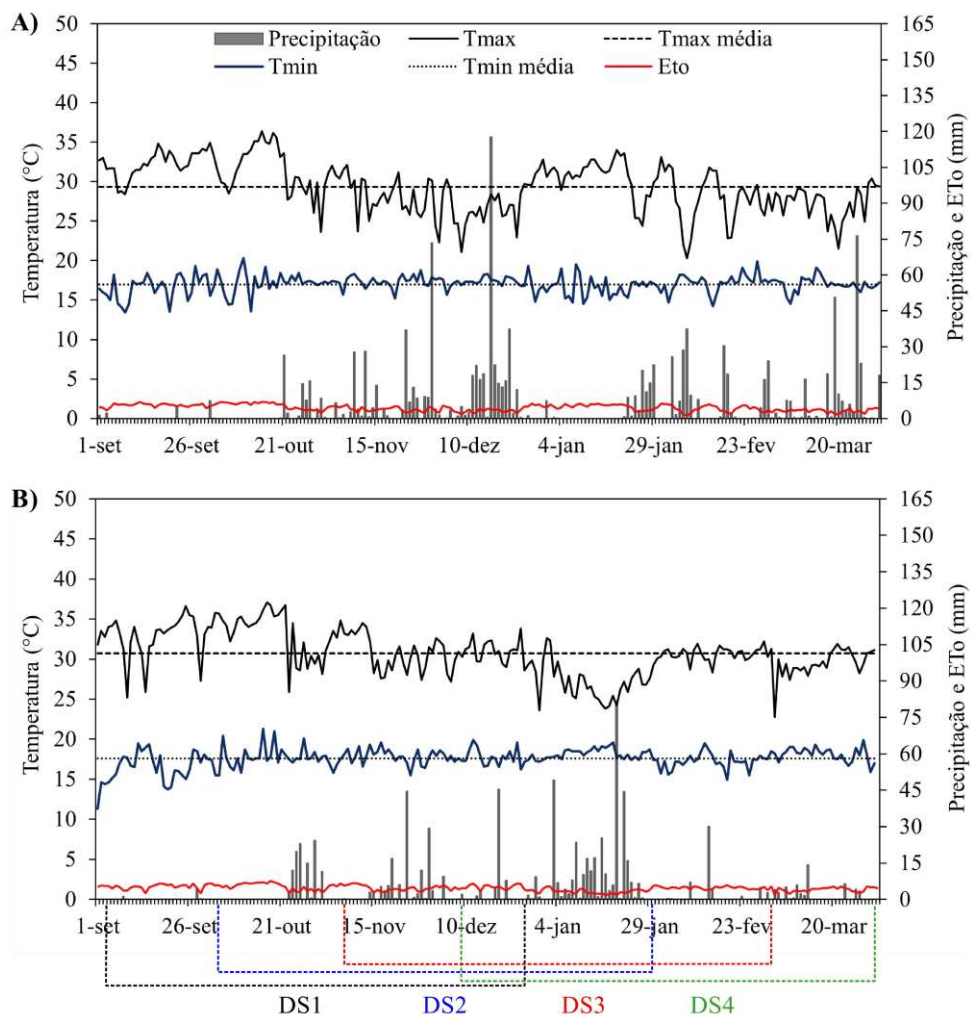
L = lucratividade, R\$ ha⁻¹.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Dados climáticos observados

O estudo foi realizado considerando dois anos agrícolas, com base nos padrões climáticos da região, um ano considerado chuvoso (AC) e outro seco (AS). Em cada ano, foram estudadas quatro datas de semeadura da cultura da soja. Na Figura 5 apresenta-se os dados climáticos diários observados no PivoBHBV para o AC (Figura 5A) e AS (Figura 5B). No AC observaram-se 106 eventos de precipitação acumulando um total de 1.230 mm. No AS observaram-se 86 eventos de precipitação com total de 792 mm.

Figura 5 – Dados climáticos diários observados no PivoBHBV durante as quatro datas de semeadura (DS) da cultura de soja (DS1 = 10 de setembro; DS2 = 10 de outubro; DS3 = 10 de novembro; e DS4 = 10 de dezembro), em dois anos contrastantes em termos de total precipitado. A) Ano chuvoso (2014/2015); e B) Ano seco (2015/2016).



Nas datas de semeadura (DS) avaliadas, observou-se, para o ano chuvoso, totais precipitados durante o ciclo da cultura iguais a 679, 729, 822 e 865 mm, e para o ano seco iguais a 326, 686, 621 e 530 mm, para DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente. No AC, observou-se a ocorrência de veranicos de 18 dias na DS2, DS3 e DS4, sendo observado, respectivamente, quando a cultura de soja se encontrava no 87, 54 e 24 dias após semeadura (DAS), o qual se estendeu até os 105, 72 e 42 DAS. No AS, considerando a DS3, entre 79 e 110 DAS, e a DS4, entre 49 e 110 DAS, foi verificado intervalos longos de dias sem eventos de precipitação.

No AC, a evapotranspiração de referência (ET_o) apresentou variação de 1,4 a 6,9 mm d⁻¹, sendo a ET_o média igual a 4,4 mm d⁻¹. A temperatura máxima (T_{max}) média foi igual a 29,3°C, variando de 20,3 a 36,4°C. Já a temperatura mínima (T_{min}) média foi igual a 17,1°C, com variação de 13,5 a 20,3°C. No AS, ET_o apresentou variação de 1,7 a 7,6 mm d⁻¹, sendo a ET_o média igual a 4,6 mm d⁻¹. A T_{max} média foi igual a 30,6°C, variando de 22,8 a 37,1°C. Já a T_{min} média foi igual a 17,7°C, com variação de 13,7 a 21,3°C.

Na Tabela 3 estão apresentados os dados climáticos médios observados no PivoBHBV durante as quatro datas de semeadura em um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS).

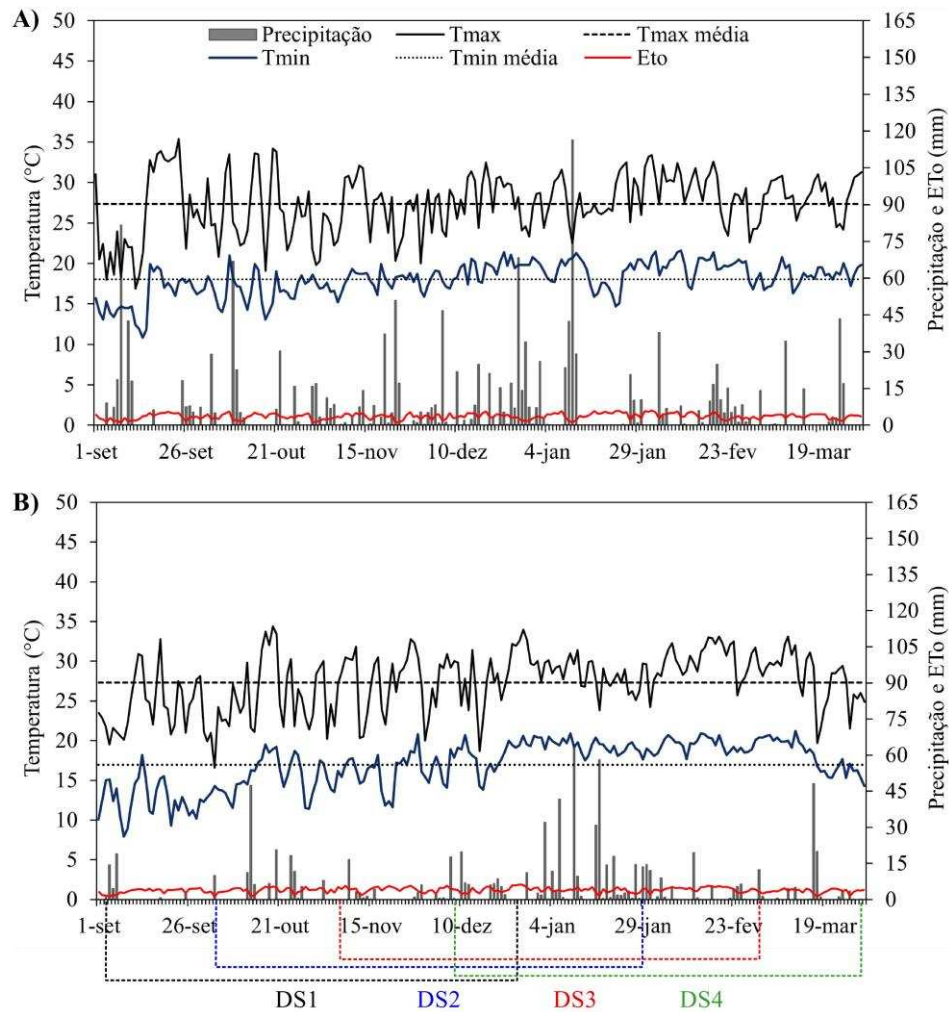
Tabela 3 – Dados climáticos médios observados no PivoBHBV durante as quatro datas de semeadura (DS) da cultura de soja (DS1 = 10 de setembro; DS2 = 10 de outubro; DS3 = 10 de novembro; e DS4 = 10 dezembro), em um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS).

Ano	DS	PivoBHBV				
		T _{max} (°C)	T _{min} (°C)	R _s (MJ m ⁻²)	Prec (mm) [eventos]	ET _o (mm d ⁻¹)
Ano chuvoso (AC)	DS1	29,8	17,2	20,2	679,3 [58]	4,6
	DS2	29,4	17,1	20,2	729,1 [65]	4,4
	DS3	28,4	17,1	19,9	822,3 [66]	4,2
	DS4	28,4	17,0	19,4	864,7 [68]	4,0
Ano seco (AS)	DS1	32,0	17,6	21,5	326,4 [39]	5,1
	DS2	30,3	17,9	20,1	686,4 [64]	4,5
	DS3	29,5	17,8	20,2	620,5 [59]	4,3
	DS4	29,3	17,9	19,6	530,1 [55]	4,2

Na Figura 6 apresenta-se os dados climáticos diários observados nos no PivoBHALPA para o AC (Figura 6A) e AS (Figura 6B). No AC, observou-se um total precipitado igual a 1.440 mm e 117 eventos de precipitação. No AS, observou-se um total precipitado igual a 798,6 mm e 94 eventos de precipitação.

Figura 6 – Dados climáticos diários observados no PivoBHALPA durante as quatro datas de semeadura (DS) da cultura da soja (DS1 = 10 de setembro; DS2 = 10 de outubro; DS3 = 10 de

novembro; e DS4 = 10 dezembro), em dois anos contrastantes em termos de total precipitado. A) Ano chuvoso (2015/2016); e B) Ano seco (2016/2017).



Nas datas de semeaduras avaliadas, observou-se, para o AC, totais precipitados durante o ciclo da cultura iguais a 803, 900, 940 e 849 mm, e, para o AS, iguais a 281, 585, 531 e 589 mm, para DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente. No AC, observou-se a ocorrência de veranicos de 14 dias nas DS3 e DS4, sendo observado, respectivamente, quando a cultura de soja encontrava-se nos 64 e 34 DAS, na qual se estendeu até os 77 e 47 DAS. No AS, considerando a DS3, entre os 7 e 26 DAS e entre os 83 e 103 DAS, foi verificado intervalos de dias longos sem eventos de precipitação.

No AC, a evapotranspiração de referência (ETo) apresentou variação de 1,0 a 6,0 mm d⁻¹, sendo a ETo média igual a 3,7 mm d⁻¹. A temperatura máxima (Tmax) média foi igual a 27,6°C, variando de 16,9 a 35,4°C. Já a temperatura mínima (Tmin) média foi igual a 18,2°C, com variação de 10,8 a 21,6°C. No AS, ETo apresentou variação de 1,2 a 6,2 mm d⁻¹, sendo a

ETo média igual a 4,0 mm d⁻¹. A Tmax média foi igual a 27,6°C, variando de 16,6 a 34,4°C. Já a Tmin média foi igual a 17,2°C, com variação de 9,3 a 21,2°C.

Na Tabela 4 estão apresentados os dados climáticos médios observados no PivoBHALPA durante as quatro datas de semeadura em um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS).

Tabela 4 – Dados climáticos médios observados no PivoBHALPA durante as quatro datas de semeadura (DS) da cultura de soja (DS1 = 10 de setembro; DS2 = 10 de outubro; DS3 = 10 de novembro; e DS4 = 10 dezembro), em um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS).

Ano	DS	PivoBHALPA				
		Tmax (°C)	Tmin (°C)	Rs (MJ m ⁻²)	Prec (mm) [eventos]	ETo (mm d ⁻¹)
Ano chuvoso (AC)	DS1	27,0	17,5	19,8	803,0 [70]	3,6
	DS2	27,0	18,1	20,2	900,0 [74]	3,7
	DS3	28,1	19,0	21,0	940,0 [75]	3,9
	DS4	28,3	19,1	21,0	849,2 [64]	3,9
Ano seco (AS)	DS1	26,6	15,6	23,2	281,8 [39]	4,0
	DS2	27,6	17,4	22,7	585,0 [61]	4,0
	DS3	28,5	18,3	23,0	531,4 [68]	4,1
	DS4	28,7	18,9	21,8	589,6 [79]	4,0

Comparando-se os dois locais, observa-se que o total precipitado foi maior no PivoBHALPA, além disso, nesse pivô ocorreu uma melhor distribuição das chuvas durante os dois anos avaliados. No PivoBHBV, observou-se a ocorrência de veranicos com maiores frequências e intervalos de dias sem chuva mais longos, em função da má distribuição das chuvas. No PivoBHBV, cerca de 40% (491 mm) do total precipitado durante o AC se concentrou entre 22/11 e 26/12, e 45% (355 mm) do total precipitado durante o AS se concentrou entre 03/01 e 27/01.

5.2. Análise estatística descritiva dos dados de solo

A análise estatística descritiva das variáveis físico-hídricas do solo, observadas nos dois pivôs estudados, está apresentada na Tabela 5.

A textura do solo é um dos principais indicadores da retenção de água no solo (REICHARDT, 1987). O solo do PivoBHBV foi classificado como argiloso, apresentando teor médio de argila da ordem de 57,2%. A argila, fração de maior representatividade neste pivô, apresentou baixo valor de desvio padrão (11,5%) e coeficiente de variação (20,2%), indicando

baixa variabilidade deste atributo no PivoBHBV. Solos com altos teores de argila, via de regra, possuem maior capacidade de retenção de água no solo (KLEIN *et al.*, 2010).

Tabela 5 – Análise estatística descritiva das variáveis físico-hídricas do solo observadas nos dois pivôs estudados.

Variável	PivoBHBV			PivoBHALPA		
	Média	SD	CV (%)	Média	SD	CV (%)
Areia (%)	23,0	14,7	63,8	45,4	13,6	29,9
Argila (%)	57,2	11,5	20,2	45,6	11,0	24,1
Silte (%)	20,2	7,8	38,7	9,0	3,8	42,0
DS (g cm ⁻³)	1,01	0,10	10,1	1,35	0,19	13,7
CC (%)*	41,4	5,1	12,2	23,4	5,2	22,4
PMP (%)*	25,5	2,9	11,3	18,8	5,0	26,3
AD (mm cm ⁻¹)	1,58	0,27	17,1	0,63	0,11	16,9
CEa (mS m ⁻¹)	-	-	-	31,7	11,9	37,5

CC = umidade na capacidade de campo; PMP = umidade no ponto de murcha permanente; DS = densidade do solo; AD = água disponível no solo; SD = desvio padrão; e CV = coeficiente de variação. *umidade em massa (base seca).

Os valores médios correspondentes a umidade na capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente foram iguais a 41,4 e 25,5%, respectivamente. A densidade do solo (DS) apresentou valor médio igual a 1,01 g cm⁻³, indicando baixa compactação na camada agricultável. A AD apresentou valor médio igual a 1,58 mm cm⁻¹, indicando uma boa capacidade de armazenamento, típico de solos argilosos.

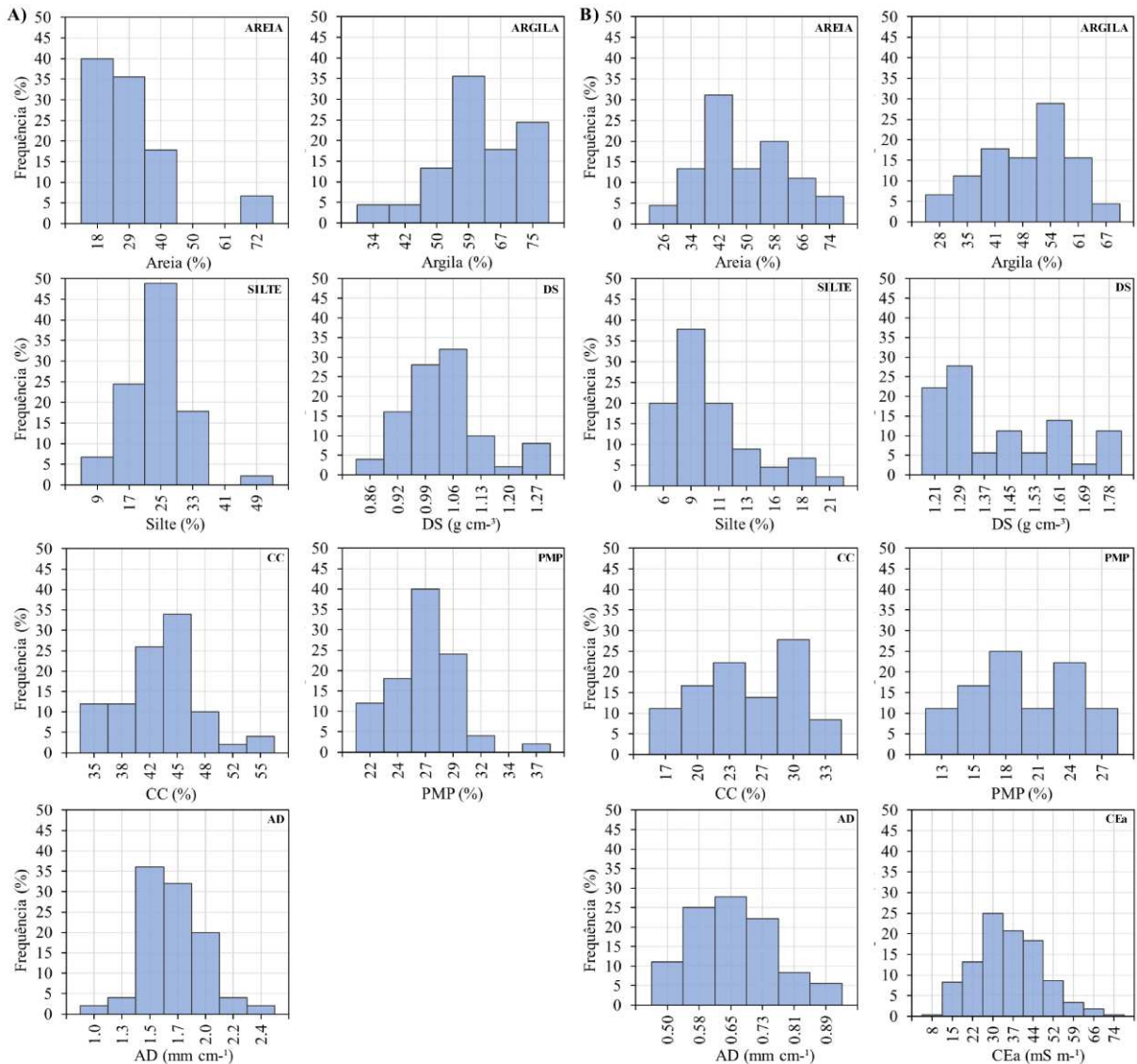
O solo do PivoBHALPA foi classificado como argilo-arenoso, apresentando teores médios de argila e areia da ordem de 45,4 e 45,5%, respectivamente. As frações areia e argila apresentam valores de desvio padrão da ordem de 13,6 e 11,0% e de coeficiente de variação de 29,9 e 24,1%, respectivamente, indicando maior variabilidade dessas propriedades do solo na área do pivô.

Os valores médios de CC e PMP foram iguais a 23,4 e 18,8%, respectivamente. A DS apresentou valor médio igual a 1,38 g cm⁻³, indicando maior compactação e, como consequência, menor porosidade total, com maiores restrições para o crescimento do sistema radicular e desenvolvimento das plantas. O menor crescimento do sistema radicular reduz o volume total de água disponível no solo para planta, impactando diretamente na frequência de irrigação. A AD apresentou valor médio de 0,63 mm cm⁻¹, valor característico de solos de textura mais arenosa. A CEa apresentou valor médio de 31,7 mS m⁻¹, com SD de 11,9 mS m⁻¹ e CV de 37,5%.

No PivoBHALPA foram observados maiores valores de SD e CV, demonstrando uma alta variabilidade das características do solo, isto é, as variáveis apresentam maior dispersão em torno de sua respectiva média.

Apresenta-se na Figura 7 a distribuição de frequência das variáveis físico-hídricas do solo observadas no PivoBHBV (Figura 7A) e no PivoBHALPA (Figura 7B).

Figura 7 – Análise de frequência das variáveis físico-hídricas do solo referentes aos dois pivôs centrais estudados. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA.



No PivoBHBV, observa-se que cerca de 76, 53 e 73% dos valores de areia, argila e silte estão, respectivamente, nas classes de 15,0 a 34,0, 54,0 a 70,0, e 15,0 a 28,0%. Cerca de 60% dos valores de DS encontra-se entre 0,95 e 1,10 g cm⁻³. Cerca de 60% dos valores de CC

concentram-se entre 40,0 e 46,0%, e 65% dos valores de PMP estão entre 25,0 e 28,0%. Aproximadamente 68% da AD estão na classe de 1,4 a 1,8 mm cm⁻¹.

No PivoBHALPA, observa-se que cerca de 31% da fração areia dos solos estão na faixa de 40,0 a 43,0%, e 20% entre 53,0 e 60,0%. Os valores de argila estão concentrados nas classes de 50,0 a 58,0% (29%) e de 40,0 a 45,0 (18%). Enquanto 78% dos valores de silte estão entre 3,0 e 12,0%. Em relação a DS, 50% de seus valores encontram-se entre 1,13 e 1,35 g cm⁻³. Cerca de 39% dos valores de CC estão entre 19,0 e 24%, e 28% dos valores entre 29,0 e 31,0%. Cerca de 42% dos valores de PMP estão entre 14,0 e 20,0%, e 22% dos valores entre 23,0 e 25,0%. Cerca de 53% da AD estão entre 0,55 e 0,70 mm cm⁻¹, enquanto 22% concentram-se entre 0,71 e 0,78. A CEa está distribuída em maior frequência (64%) entre 25 e 45 mS m⁻¹. Embora seja verificado elevados percentuais de ocorrência das variáveis em determinadas classes, observa-se que no PivoBHALPA, os respectivos valores das variáveis analisadas, mesmo em baixas frequências, se distribuem em maiores números de classes, comparado ao PivoBHBV. Este comportamento também indica maior variabilidade espacial no PivoBHALPA.

5.3. Análise geostatística dos dados de solo

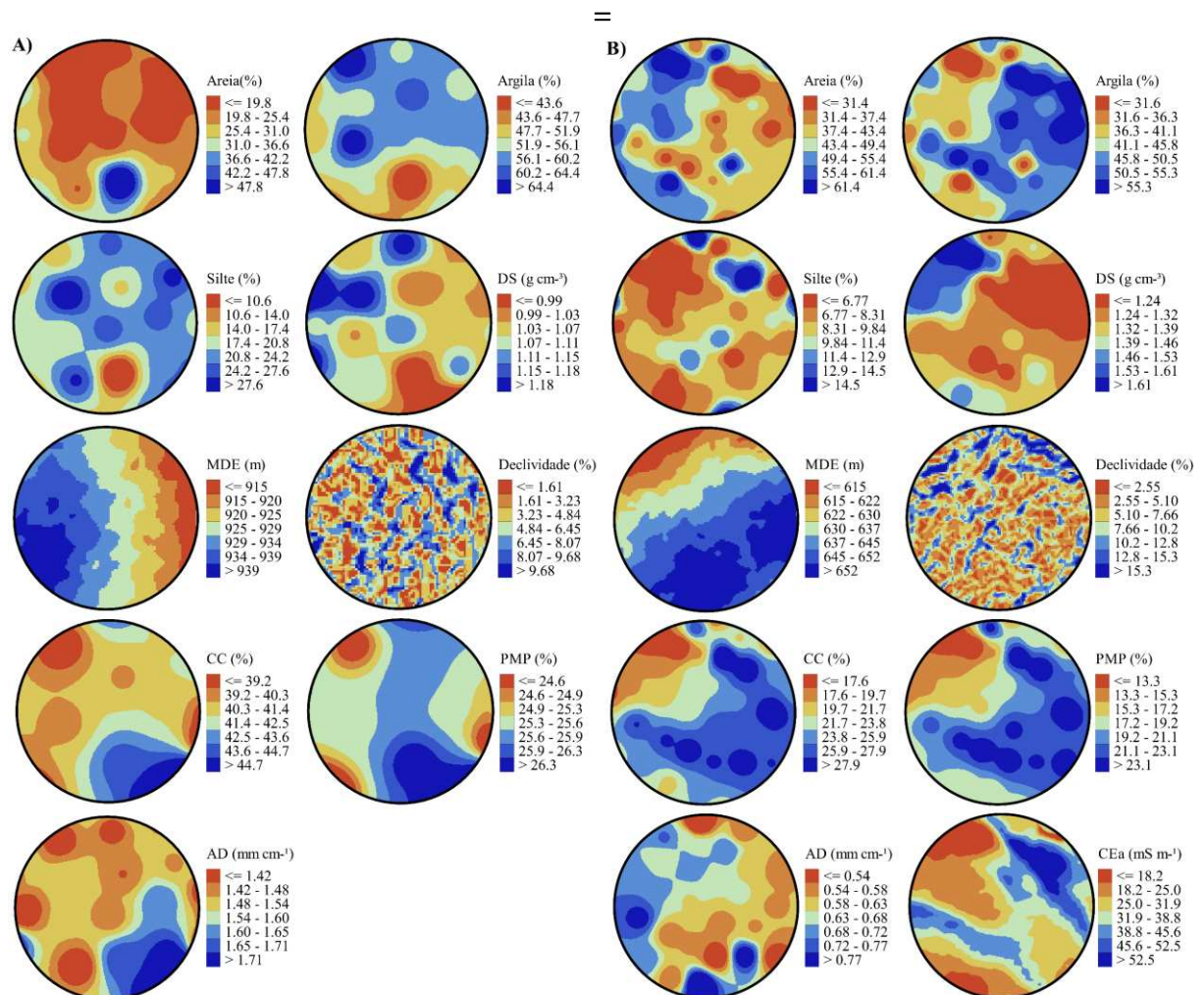
5.3.1. Interpolação das variáveis físico-hídricas do solo

Os mapas de variabilidade espacial do modelo digital de elevação (MDE), da declividade e das variáveis físico-hídricas podem ser visualizados na Figura 8.

Analisando-se a Figura 8 observa-se uma maior variabilidade espacial dos parâmetros físico-hídricos no PivoBHALPA (Figura 8B). Essa maior variabilidade reflete nos valores de AD, indicando capacidade de armazenamento de água diferentes com impacto na eficiência de irrigação.

Observa-se, na Figura 8, que a altitude do PivoBHBV apresenta variação de 915 a 939 m, enquanto no PivoBHALPA ela varia de 615 a 652 m, com amplitude variando de 24 e 37 m, respectivamente. Os pivôs com declividades na maior parte da área abaixo de 8,0%, têm relevo variando de plano a suave ondulado (EMBRAPA, 1979). Em algumas regiões dos pivôs observa-se declividades superiores a 8,0%. No PivoBHALPA, por exemplo, são observadas declividades de até 15,3%, indicando relevo ondulado.

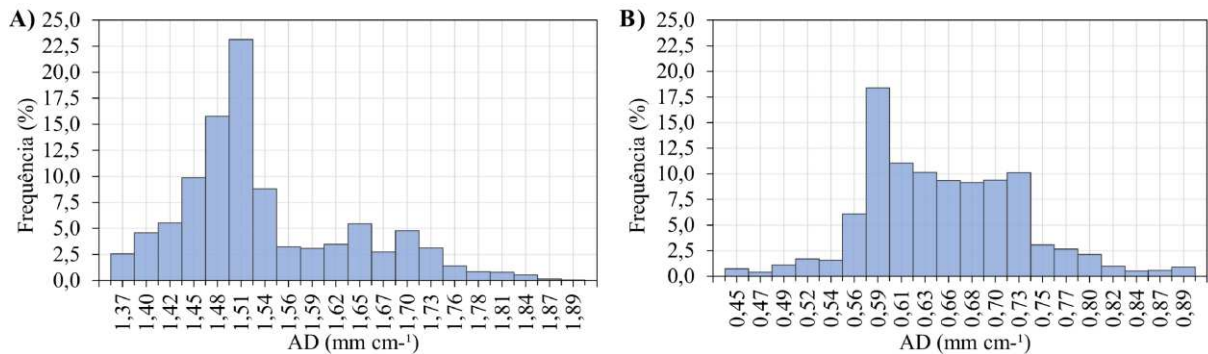
Figura 8 – Variabilidade espacial da textura do solo, do modelo digital de elevação (MDE), da declividade e das variáveis físico-hídricas do solo. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA.



Verifica-se que o padrão espacial da CC e PMP são diretamente proporcionais entre si, e inversamente proporcionais ao da DS. Isto é, as áreas com maiores valores de CC apresentam também os maiores valores de PMP e os menores valores de DS. No PivoBHBV, os maiores valores de CC, PMP e de AD são observados nas porções mais baixas do pivô, com maiores percentuais de argila e menores valores de densidade do solo. No PivoBHALPA, os maiores valores de CC e PMP são observados nas porções mais altas do pivô, já que nessas porções o percentual de argila é superior ao percentual de areia. Com relação a CEa, referente ao PivoBHALPA, verificou-se, em algumas porções do pivô, certa semelhança no comportamento espacial da CC e PMP.

Visto que as estratégias de manejo de irrigação avaliadas neste trabalho se baseiam no valor de AD, após a interpolação dos dados de AD verificou-se a frequência em que estes valores ocorrem nos pixels que compõem cada pivô avaliado (Figura 9).

Figura 9 – Análise de frequência da água disponível no solo após a interpolação. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA.



No PivoBHBV (Figura 9A), observa-se que 57,6% dos pixels possuem valores de AD variando entre 1,43 e 1,55 mm cm⁻¹. Com base no número total de pixels que compõem o PivoBHBV, considerando pixels com área de 25 m², verificou-se que 236 pixels (0,63%) possuem valores de AD iguais ao menor valor (1,34 mm cm⁻¹), 189 pixels (0,51%) possuem valores de AD iguais ao valor médio (1,52 mm cm⁻¹) e apenas 4 pixels (0,01%) possuem valores de AD iguais ao maior valor (1,89 mm cm⁻¹). Em 11.691 pixels (31,3%) e 25.311 pixels (68,1%), respectivamente, foram observados valores de AD abaixo e acima do valor médio. Essa variabilidade demonstra que é inviável operacionalizar o manejo visando atender a realidade de cada pixel e que sempre haverá áreas recebendo uma maior ou menor quantidade de água.

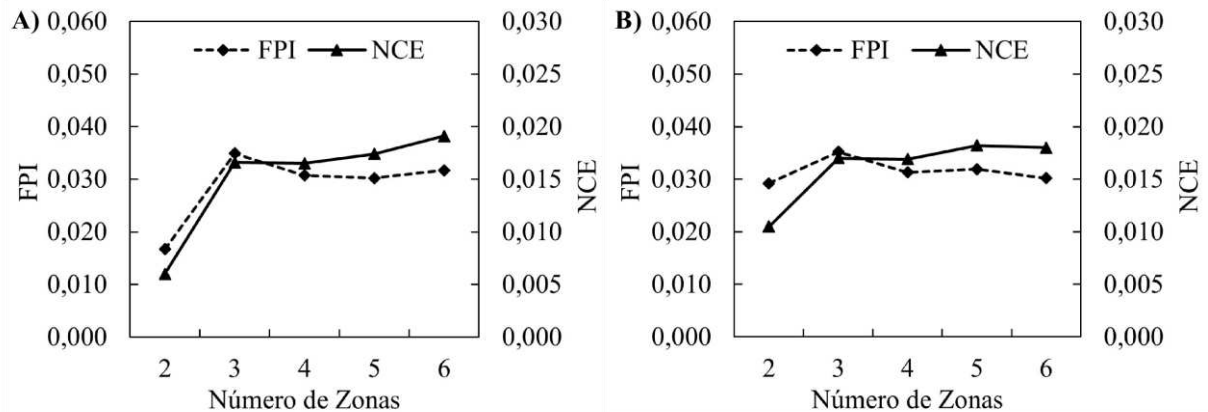
No PivoBHALPA (Figura 9B), observa-se que 58,07% dos pixels possuem valores de AD variando entre 0,58 e 0,68 mm cm⁻¹. Em 228 pixels (0,45%), observa-se valores de AD iguais ao menor valor (0,42 mm cm⁻¹), 1890 pixels (3,70%) possuem valores de AD iguais ao valor médio (0,64 mm cm⁻¹) e 179 pixels (0,35%) possuem valores de AD iguais ao maior valor (0,89 mm cm⁻¹). Em 22.331 pixels (44,1%) e 26.428 pixels (52,2%), respectivamente, foram observados valores de AD abaixo e acima do valor médio.

5.3.2. Agrupamento e geração das zonas de manejo de irrigação

Em análise realizada por meio do software MZA 1.0.1® (FRIDGEN *et al.*, 2004), as áreas dos pivôs, PivoBHBV (Figura 10A) e PivoBHALPA (Figura 10B), foram divididas em duas zonas de manejo de irrigação. Na Figura 10 apresenta-se o índice de Performance Fuzzy

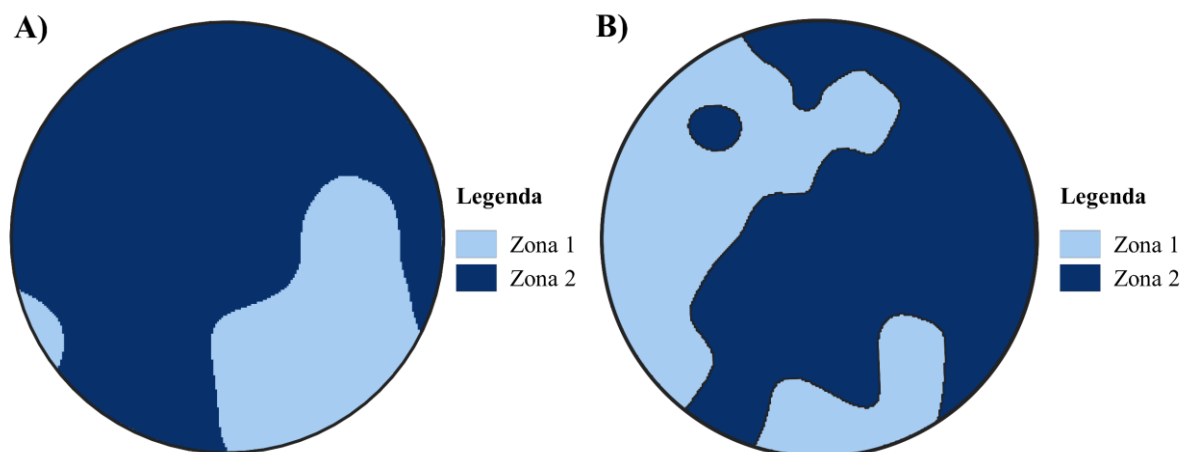
(FPI) e a entropia de Classificação Normalizada (NCE). O número de zonas de manejo mais adequado é indicado pelos menores valores de FPI e de NCE.

Figura 10 – Índice de Performance Fuzzy (FPI) e a Entropia de Classificação Normalizada (NCE) obtidos com base na água disponível no solo. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA.



Na Figura 11 estão apresentadas as zonas de manejo de irrigação geradas com base na água disponível no solo, para o PivoBHBV (Figura 11A) e para o PivoBHALPA (Figura 11B).

Figura 11 – Zonas de manejo de irrigação geradas com base na água disponível no solo. A) PivoBHBV; e B) PivoBHALPA.



No PivoBHBV (Figura 11A), a Zona 1 corresponde a 25,30% (23,48 ha) da área total do pivô e a Zona 2 a 74,70% (69,32 ha). No PivoBHALPA (Figura 11B) a Zona 1 corresponde a 40,87 % (51,75 ha) da área total do pivô e a Zona 2 a 59,13% (74,87 ha).

No PivoBHBV, considerando os valores reais de AD, os valores variaram de 1,55 a 1,89 mm cm⁻¹, na Zona 1, e de 1,34 a 1,54 mm cm⁻¹, na Zona 2. No PivoBHALPA, os valores

reais de AD variaram de 0,64 a 0,89 mm cm⁻¹, na Zona 1, e de 0,42 a 0,63 mm cm⁻¹, na Zona 2. Nos dois pivôs, nos pixels correspondentes à Zona 1, estão concentrados os maiores valores de AD, enquanto nos pixels que constituem a Zona 2, concentram-se os pixels com menores valores de AD.

5.4. Simulação da demanda hídrica e energética e da produtividade

5.4.1. Evapotranspiração atual

A evapotranspiração atual (ETa) é uma das variáveis que mais interferem na dinâmica do manejo de irrigação, sofrendo influência direta do clima, do solo e da planta. O comportamento da ETa, nas estratégias de manejo de irrigação baseados na irrigação de precisão (IP e ZMI), foi semelhante em todas as datas de semeadura avaliadas (DS1, DS2, DS4 e DS4). Em relação ao manejo convencional (MC1, MC2 e MC3) foram verificadas diferenças tanto no comportamento quanto na demanda evapotranspirativa em locais diferentes do pivô.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores médios de ETa acumulada durante o ciclo da cultura da soja, nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Tabela 6 – Valores médios da evapotranspiração atual (ETa) acumulada durante o ciclo da cultura da soja, considerando as cinco estratégias de manejo (MC1, MC2, MC3, IP e ZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Ano	Data de Semeadura	PivoBHBV (mm)					PivoBHALPA (mm)				
		MC1	MC2	MC3	IP	ZMI	MC1	MC2	MC3	IP	ZMI
Chuvoso (AC)	DS1	555	552	548	553	553	437	429	425	431	429
	DS2	523	517	514	518	519	448	443	432	443	443
	DS3	500	497	488	497	496	468	463	457	464	463
	DS4	487	485	480	485	485	472	463	457	465	464
	Média	516	513	508	513	513	456	450	443	451	450
Seco (AS)	DS1	602	601	596	601	601	485	479	467	479	479
	DS2	535	534	527	534	533	489	482	472	482	483
	DS3	509	504	496	505	505	501	497	487	496	497
	DS4	492	486	488	490	492	479	472	463	473	472
	Média	535	531	527	533	533	489	483	472	483	483

*MC1 = manejo convencional com base no menor valor de água disponível no solo; MC2 = manejo convencional com base no valor médio de água disponível no solo; MC3 = manejo convencional com base no maior valor de água disponível no solo; IP = irrigação de precisão; e, ZMI = zonas de manejo de irrigação.

Observa-se, na Tabela 6, que no PivoBHBV, no AC, a ETa acumulada média durante o ciclo da cultura variou de 513 mm, no MC2, ZMI e IP, a 516 mm, no MC1. Para todas as datas de plantio, observa-se maiores valores de ETa acumulada no MC1. Esse comportamento se repete no AS, que apresentou ETa acumulada média durante o ciclo da cultura variando de 533 mm, no ZMI e IP, a 535 mm, no MC1. Destaca-se o fato de não ter havido diferenças no valor médio da ETa acumulada entre os manejos no ZMI e IP. O menor valor de ETa foi observado no MC3. Nota-se que a ETa acumulada no AS foi 3,4% maior que a ETa acumulada no AC, no MC1, 3,5%, no MC2, 3,7%, no MC3, 3,7%, no ZMI, e 3,6%, no IP.

Um comportamento semelhante pode ser observado no caso do PivoBHALPA, onde o maior valor médio da ETa acumulada foi observado no AS, no MC1 (489 mm). Entretanto, no PivoBHALPA, observou-se maior impacto entre um ano e outro, sendo que a ETa acumulada no AS foi 6,6% maior que a ETa acumulada no AC, no MC1, 6,8%, no MC2, 6,2%, no MC3, 6,8%, no ZMI, e 6,6%, no IP.

Analisando a Tabela 6 em relação ao manejo adotado, observa-se que a ETa acumulada média no IP foi semelhante aos valores obtidos no MC2 e ZMI. Os maiores valores foram observados no MC1 e os menores no MC3. Considerando-se os dois pivôs, observa-se que a ETa acumulada média no PivoBHALPA é cerca de 12,3% menor que no PivoBHBV, no AC, e 9,4% no AS.

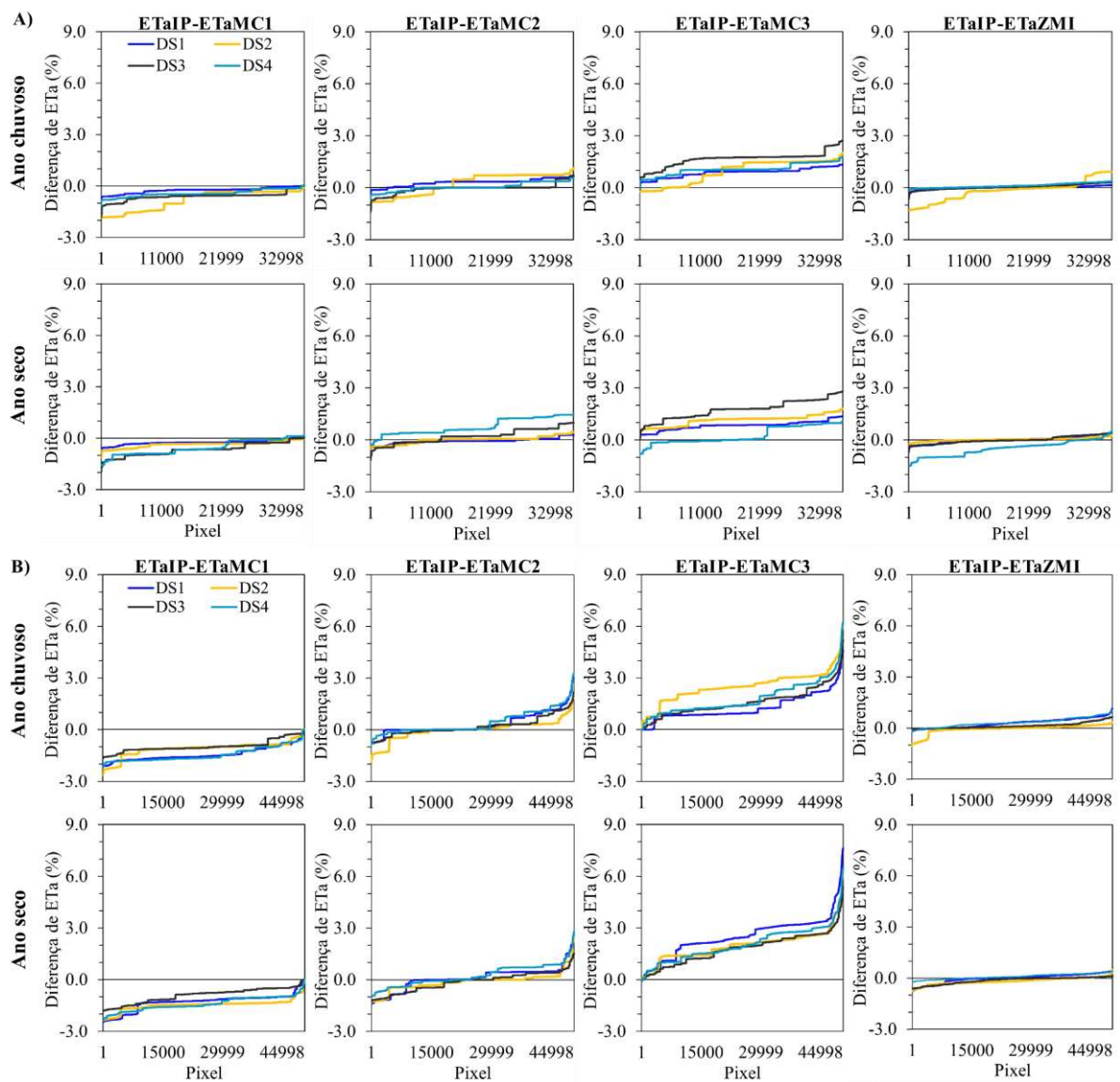
Nos dois pivôs analisados, os maiores valores de ETa observados no AS se deve basicamente aos maiores valores de ETo observados neste ano, já que a variação da precipitação foi compensada pela irrigação.

A fim de entender melhor o comportamento da ETa nas diferentes estratégias de manejo, apresenta-se na Figura 12 as diferenças, em cada pixel, entre os valores de ETa acumulada considerando o manejo IP (ETaIP) com os valores de ETa acumulada considerando o manejo MC (ETaMC) e ZMI (ETaZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco. Por exemplo, na Figura 12A, no manejo MC1, são apresentados os valores, para cada um dos 37.191 pixels do PivoBHBV, da diferença entre ETaIP-ETaMC1.

Na ETaIP, o manejo foi feito considerando o valor real de AD no pixel e, na ETaMC1, o manejo foi feito considerando que todos os pixels tivessem AD igual a AD do pixel com menor valor de água disponível. Neste caso, 36.955 pixels possuem AD maior que o pixel com menor AD, já que 236 pixels possuem valores de AD iguais ao pixel com menor valor de AD.

Em relação a ZMI, observou-se, em todas as datas de semeadura, dos dois anos avaliados, variações pequenas nos valores de $ETa_{IP}-ETa_{ZMI}$. A diferença $ETa_{IP}-ETa_{ZMI}$ média, no PivoBHBV e no PivoBHALPA, respectivamente, foi de 0,01 e 0,18%, no AC, e de 0,12 e 0,10%, no AS.

Figura 12 – Diferença entre a evapotranspiração atual (ETa) acumulada no pixel no manejo de irrigação de precisão (IP) e a ETa acumulada no pixel no manejo convencional (MC1, MC2 e MC3) e de zonas de manejo de irrigação (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4) em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



Em relação ao MC1, observou-se que, para quase todos os casos, a diferença entre $ETa_{IP}-ETa_{MC}$ foi negativa, indicando que, quando se realiza o manejo com base no menor valor de AD, a ETa é superestimada. Uma explicação para esse comportamento é que, no caso

do MC1, como o valor de AD é menor, de maneira geral, a umidade do solo ao longo do ciclo da cultura ficou mais próxima da CC, acarretando maiores valores de coeficiente de redução da evaporação do solo (K_s), e, conseqüentemente, impactando no aumento da ETa. Outra possível explicação para isto, é que, ao utilizar o MC1, a frequência de irrigação será maior. A maior frequência de irrigação reflete, em virtude da baixa cobertura do solo, em uma maior evaporação nas fases iniciais da cultura.

É evidente que a dinâmica da evaporação vai depender de uma combinação de fatores, como, por exemplo, a distribuição da chuva. Além disso, em virtude do menor valor de AD utilizado no manejo MC1, ocorrem, nos pixels com valor de AD maior do que o pixel de referência neste tipo de manejo, um déficit de água no solo, influenciando no aumento da ETa. Apesar da maior frequência de irrigação e de o déficit de umidade no solo ser menor que o déficit permitido no manejo, este déficit se acumula durante todo o ciclo da cultura, isto é, sempre haverá um déficit de umidade no solo. Contudo, a magnitude do seu impacto na ETa vai depender muito da diferença entre as ADs.

Quando o manejo é feito com base no maior valor de AD, isto é, em MC3, a irrigação é realizada com menor frequência, influenciando no coeficiente de correção da evaporação direta da água no solo, penalizando a evaporação. A menor frequência de irrigação impacta também, em menor grau, o déficit de umidade no solo, contribuindo para que ele seja maior que o déficit permitido no manejo (50% da disponibilidade total de água no solo), o que, por sua vez, afeta o coeficiente de correção da evapotranspiração da cultura, Equação 2, penalizando a ETa.

Analisando as diferenças entre os valores de ETa acumulada no manejo IP com o MC, no PivoBHBV (Figura 12A), durante o AC, observa-se que as maiores diferenças foram verificadas no MC3, com redução máxima no valor da ETa acumulada de 1,34% (7,4 mm), 2,02% (10,5 mm), 2,71% (13,5 mm) e 1,75% (8,5 mm), considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente. Considerando o MC1, nas DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, observou-se aumento médio da ETa de 0,25, 0,81, 0,60 e 0,42% (1,4, 4,2, 3,0 e 2,0 mm). No MC2, observou-se, em média, que nas DS1 e DS2 a ETa foi subestimada e, nas DS3 e DS4, a ETa foi semelhante a obtida pela IP. Considerando a diferença entre ETaIP-ETaMC2, observou-se redução média da ETa acumulada da ordem de 0,30% (1,7 mm), na DS1, e de 0,22% (1,2 mm), na DS2. No MC3, considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, observou-se redução percentual média da ETa acumulada igual a 0,87, 0,94, 1,66 e 1,07%, equivalentes a 4,8, 4,9, 8,2 e 5,2 mm, respectivamente.

Durante o AS, no MC1, considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, observou-se aumento percentual médio da ETa acumulada igual a 0,25, 0,36, 0,66 e 0,54%, equivalentes a 1,5, 1,9, 3,3 e 2,6 mm, respectivamente. No MC2, observou-se, em média, que nas DS3 e DS4 a ETa foi subestimada e, nas DS1 e DS2, a ETa foi semelhante a obtida pela IP. Considerando a diferença entre ETaIP-ETaMC2, no AS, observou-se redução média da ETa acumulada da ordem de 0,20% (1,0 mm), na DS3, e de 0,76% (3,7 mm), na DS4. As reduções percentuais médias nos valores de ETa acumulada, considerando a ETaIP-ETaMC3, foram iguais a 0,83, 1,14, 1,75 e 0,26% (5,0, 6,1, 8,8 e 1,3 mm), na DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente.

Avaliando-se a diferença total média, considerando todas as datas de semeadura no AC, em relação ao manejo IP, observa-se que o MC1 apresentou aumento da ETa acumulada igual a 0,52% (2,7 mm), no AC, e igual a 0,45% (2,4 mm), no AS. Por outro lado, observou-se que o MC2 e o MC3 apresentaram redução da ETa acumulada, respectivamente, igual a 0,30 e 1,13% (1,4 e 5,8 mm), no AC, e igual a 0,48 e 1,01% (2,4 e 5,3 mm), no AS. Observa-se que as maiores diferença na ETas acumuladas, nos dois anos analisados, foram provenientes do MC3.

No PivoBHALPA (Figura 12B), observou-se, em todas as datas de semeadura, tanto no AC como no AS, que a estratégia de manejo MC3 foi, também, a que apresentou as maiores diferenças entre os valores de ETa acumulada (ETaIP-ETaMC3). No MC3, durante o AC, considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, observou-se redução máxima na ETa acumulada de 4,55% (19,7 mm), 6,11% (27,1 mm), 5,19% (24,1 mm) e 6,24% (29,2 mm), respectivamente. Considerando a diferença média entre ETaIP-ETaMC1, no AC, na DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, observou-se aumento médio da ETa acumulada da ordem de 1,42, 1,10, 0,96 e 1,44% (6,1, 4,9, 4,5 e 6,7 mm). No MC2, observou-se, em média, que nas DS1, DS3 e DS4 a ETa foi subestimada e, na DS2, a ETa foi semelhante a obtida pela IP. Considerando a diferença entre ETaIP-ETaMC2, observou-se redução média da ETa acumulada da ordem de 0,34% (1,5 mm), na DS1, de 0,19% (0,9 mm), na DS3, e de 0,41% (1,9 mm), na DS4. No MC3, considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, observou-se redução percentual média da ETa acumulada igual a 1,28, 2,51, 1,59 e 1,80%, equivalentes a 5,5, 11,1, 7,4 e 8,4 mm, respectivamente.

No AS, observou-se, também, que as maiores diferenças foram verificadas no MC3, com redução máxima no valor da ETa acumulada de 7,63, 6,29, 5,35 e 6,45% (36,6, 30,5, 26,5 e 30,6 mm), considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente. Analisando as reduções percentuais médias da ETa acumulada com uso do MC3, no AS, considerando a DS1, DS2,

DS3 e DS4, respectivamente, obteve-se valores iguais a 2,51, 1,97, 1,80 e 2,05% (12,0, 9,5, 8,9 e 9,7 mm). Comparando a diferença média ETaIP-ETaMC1, observou-se aumento percentual médio da ETa acumulada igual a 1,30, 1,47, 0,91 e 1,39%, equivalentes a 6,2, 7,1, 4,5 e 6,6 mm, respectivamente. No MC2, observou-se, em média, que nas DS3 a ETa foi superestimada, na DS4, a ETa foi subestimada, e, nas DS1 e DS2, a ETa foi semelhante a obtida pela IP. Considerando a diferença entre ETaIP-ETaMC2, observou-se, na DS3, aumento médio da ETa acumulada da ordem de 0,12% (0,60 mm) e, na DS4, redução média da ETa acumulada da ordem de 0,24% (1,2 mm).

Avaliando-se a diferença total média, considerando todas as datas de semeadura no AC, em relação ao manejo IP, observa-se que o MC1 apresentou aumento da ETa acumulada igual a 1,23% (5,6 mm), no AC, e igual a 1,27% (6,1 mm), no AS. Por outro lado, observou-se que o MC2 apresentou, no AC, redução da ETa acumulada igual a 0,31% (1,41 mm), enquanto, no AS, apresentou aumento da ETa acumulada em 0,12% (0,60 mm) e redução em 0,17% (0,80 mm). O MC3, apresentou redução da ETa acumulada igual a 1,79% (8,10 mm), no AC, e a 2,08% (10,1 mm), no AS. Observa-se que as maiores diferença na ETas acumuladas, nos dois anos analisados, foram provenientes do MC3.

Comparando a ETa acumulada nos dois pivôs, observa-se menores valores de ETa acumulada (AC = 451 mm e AS = 483 mm) no PivoBHALPA. Neste pivô, observou-se também um maior impacto da estratégia de manejo adotada na ETa, o que pode ser avaliado pelas ETaIP-ETaMC, principalmente na condição ETaIP-ETaMC3. Nessa condição a redução média da ETa acumulada no PivoBHALPA foi 1,4 vezes maior que no PivoBHBV, no AC, e 1,9 vezes maior, no AS.

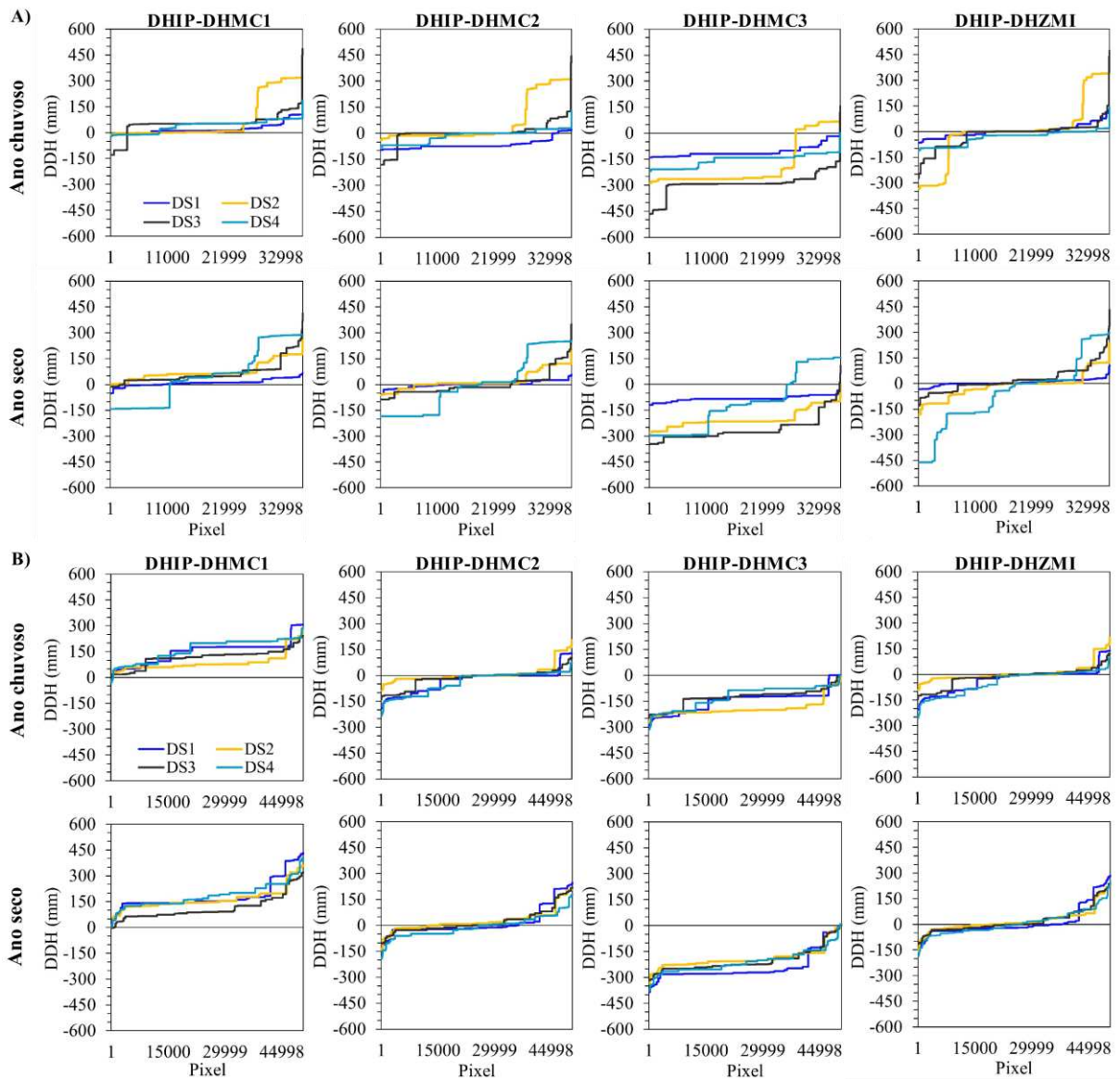
5.4.2. Déficit de umidade no solo

Na Figura 13 apresenta-se os valores dos déficits de umidade no solo (DH) calculados pela diferença dos déficits acumulados em cada pixel obtidos no manejo IP em relação ao MC e ZMI, considerando as quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco. Valores negativos indicam que o DH na IP é maior. Neste caso, não há potencial de redução de déficit hídrico (PRDH). Por outro lado, valores positivos indicam que o DH na IP é menor e, neste caso, há PRDH.

Analisando a Figura 13 observa-se, como era esperado, que os potenciais de redução de déficit hídrico ocorreram, na sua maioria, na estratégia de manejo MC1. Nessa estratégia, em média, observou-se PRDH em 3,8%, no PivoBHBV, e de 14,9% no PivoBHALPA. No

PivoBHALPA essa tendência foi observada em todos os casos, com exceção de 228 pixels (0,45%) que possuem AD igual ao menor valor de AD. Nesses 228 pixels, o PRDH foi igual a zero.

Figura 13 – Diferença entre o déficit de umidade do solo acumulada no pixel (DDH), valor calculado considerando a diferença em cada pixel do déficit de umidade do solo acumulada no manejo de irrigação de precisão (IP) e os déficits de umidades do solo acumuladas no pixel no manejo convencional (MC1, MC2 e MC3) e de zonas de manejo de irrigação (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



No caso do PivoBHBV, essa tendência foi observada em 99,37% dos pixels, com exceção de 236 pixels que possuem AD igual ao menor valor de AD. Nesses pixels, o PRDH foi igual a zero. Em 17,95% dos pixels, no PivoBHBV, e 0,63% dos pixels, no PivoBHALPA,

aproximadamente, observou-se uma diferença de déficit de umidade no solo negativa. Esse comportamento pode ser observado principalmente na DS4 do AS, no PivoBHBV. Esse comportamento ocorre em pixels com valores de AD muito próximos ao valor real de AD, em situações em que a umidade do solo, no dia anterior, está próxima ao déficit de manejo. No dia seguinte, com a contabilização da ETa do dia, o déficit ultrapassa o déficit de manejo de projeto. Observa-se também que no AC esse impacto foi menor do que no AS, pois a magnitude do impacto não depende somente da diferença entre as ADs, mas também das condições de clima.

No PivoBHBV (Figura 13A), considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, observa-se que, em relação ao MC1, de 37.191 pixels, cerca de 78,7, 71,1, 91,2 e 74,2% dos pixels, no AC, e 72,5, 98,8, 92,7 e 68,6% dos pixels, no AS, apresentaram DH maior que o DH da IP. Considerando o MC2, comparado ao MC1, reduziu-se a quantidade de pixels com DH maior que o DH da IP, sendo que este comportamento ocorreu em 7,0, 31,0, 34,4 e 24,0% dos pixels, no AC, e em 62,7, 70,4, 31,3 e 46,9% dos pixels, no AS. Em relação ao MC3, foram observados poucos pixels com DH maior que o da IP, já que a lâmina de irrigação, considerando esta estratégia, é superior ao déficit de umidade permitido. Considerando o MC3, observou-se valor de DH acima do DH da IP, apenas na DS2 do AC, e na DS4 do AS, correspondendo a, aproximadamente, 23,4 e 26,1% dos pixels.

Em termos médios, em relação ao MC1, MC2 e MC3, respectivamente, 29.315, 8.959 e 2.181 pixels (78,8, 24,1 e 5,9%), no AC, e 30.925, 19.651 e 2.430 pixels (83,2, 52,8 e 6,5%), no AS, apresentaram DH maior que o da IP. Nestes pixels, o DH acima do permitido, pode refletir em prejuízos na produtividade da cultura.

Com base na diferença de déficit de umidade no solo total, considerando todas as datas de semeadura, considerando a comparação entre a diferença DHIP-DHMC1, a IP apresentou PRDH igual a 5,1%, no AC, e a 5,4%, no AS. Considerando a comparação entre a diferença DHIP-DHMC2, a IP apresentou PRDH igual a 2,3%, no AC, e a 2,5%, no AS. Em relação ao MC3, foi observado baixo PRDH, sendo ,no AC, igual a 1,1% e, no AS, igual a 2,3%.

No PivoBHALPA (Figura 13B), considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, observa-se que, em relação ao MC1, de 50.649 pixels, cerca de 99,0, 99,1, 99,8 e 99,8% dos pixels, no AC, e 99,3, 99,6, 98,4 e 99,7% dos pixels, no AS, apresentaram DH maior que o DH da IP. Considerando o MC2, comparado ao MC1, reduziu-se a quantidade de pixels com DH maior que o DH da IP, sendo que este comportamento ocorreu em 7,4, 28,5, 40,9 e 39,8% dos pixels, no AC, e em 28,2, 69,4, 44,4 e 43,7% dos pixels, no AS. Em relação ao MC3, foram observados poucos pixels com DH maior que o da IP, já que a lâmina de irrigação, considerando esta estratégia, é superior ao déficit de umidade permitido.

Considerando o MC3, observou-se valor de DH acima do DH da IP, apenas na DS1 do AC, e na DS4 do AS, correspondendo a, aproximadamente, 1,1 e 0,7% dos pixels.

Em termos médios, em relação ao MC1, MC2 e MC3, respectivamente, 50.236, 14.765 e 145 pixels (99,2, 29,2 e 0,30%), no AC, e 50.288, 23.518 e 130 pixels (99,4, 46,4 e 0,30%), no AS, apresentaram DH maior que o da IP. Nestes pixels, o DH acima do permitido, pode refletir em prejuízos na produtividade da cultura.

Com base na diferença de déficit de umidade no solo total, considerando todas as datas de semeadura, considerando a comparação entre a diferença DHIP-DHMC1, a IP apresentou PRDH igual a 32,2%, no AC, e a 35,4%, no AS. Considerando a comparação entre a diferença DHIP-DHMC2, a IP apresentou PRDH igual a 2,5%, no AC, e a 6,9%, no AS. Em relação ao MC3, foi observado baixo PRDH, sendo, no AC, igual a 0,11% e, no AS, igual a 0,20%.

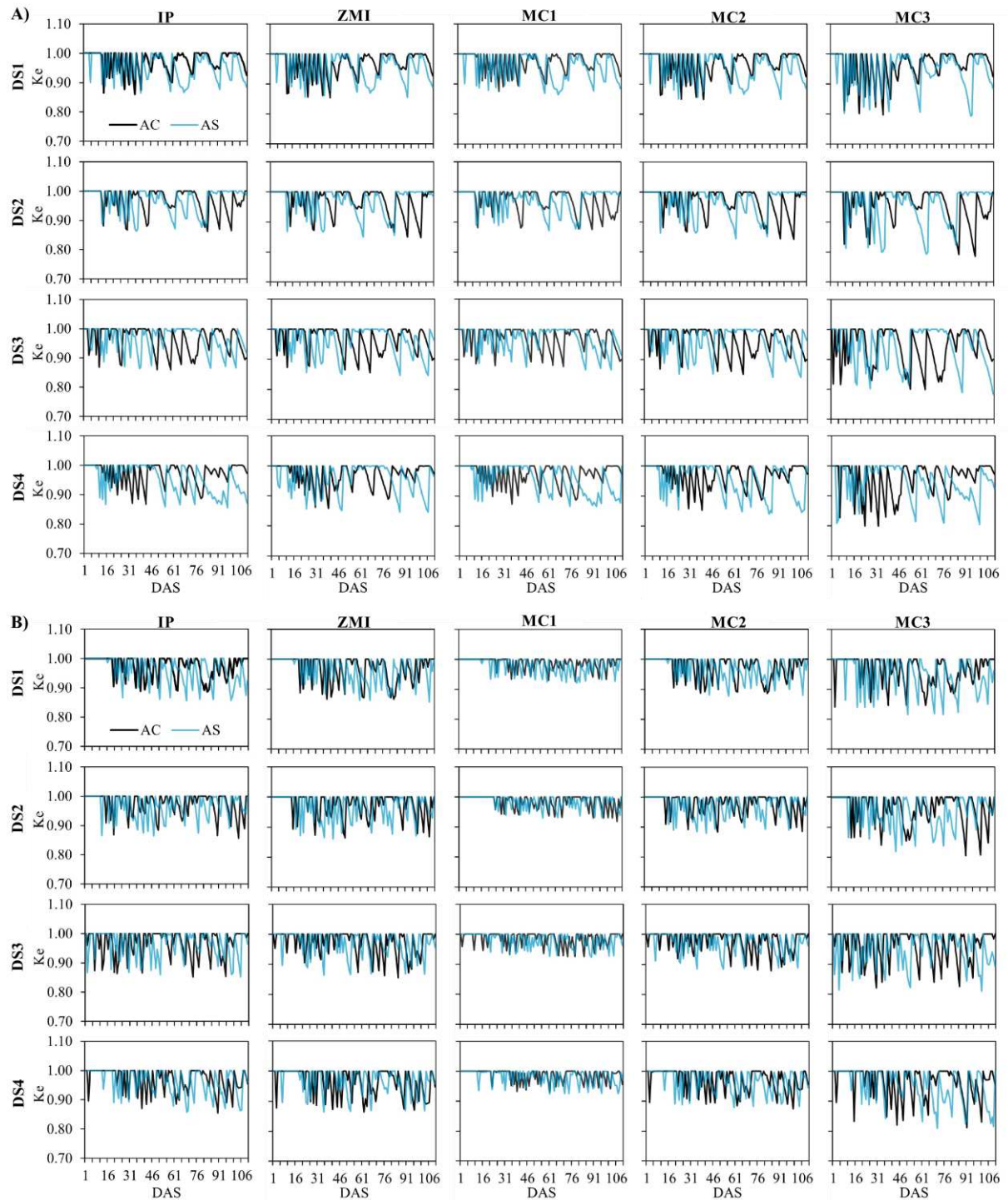
Em relação a ZMI, observou-se, em todas as datas de semeadura, dos dois anos avaliados, diferenças médias de déficit de umidade no solo entre DHIP-DHZMI muito baixas (PivoBHBV= 2,0% (AC) e 2,3% (AS); e PivoBHALPA= 2,8% (AC) e 6,4% (AS)), indicando que o uso de ZMI contribuiu para reduzir a variabilidade.

Na Figura 14 apresenta-se, para um pixel escolhido aleatoriamente, o comportamento do coeficiente de redução da evaporação do solo, avaliado durante o ciclo da cultura de soja, para os dois pivôs (PivoBHBV, PivoBHALPA), considerando os manejos de IP, ZMI e MC, as quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Analisando a Figura 14, observa-se que os valores de K_e , em todas as DS, para os anos AC e AS, nos IP, ZMI, MC1 e MC2 tendem a ficar entre 1 e 0,9, mantendo os valores de evaporação em níveis mais elevados, devido a maior frequência de irrigação. No final do ciclo da cultura esses valores tendem a ser um pouco maiores, isto ocorre devido a maior profundidade do sistema radicular da cultura, fazendo com que os intervalos entre as irrigações sejam maiores. Este comportamento é mais evidente nos anos chuvosos. No MC3, há uma tendência de apresentar maiores valores de K_e , devido a frequência de irrigação ser menor, quando comparado às demais estratégias de manejo de irrigação.

Comparando os valores de K_e entre os pivôs, observa-se que os valores de K_e foram menores no PivoBHALPA, uma vez que os valores de AD neste pivô é menor, a irrigação tende a ser mais frequente e, conseqüentemente, tem-se maiores perdas por evaporação.

Figura 14 – Coeficiente de redução da evaporação do solo (K_e), avaliado durante o ciclo da cultura da soja, para um pixel do pivô, considerando os manejos de irrigação de precisão (IP), zonas de manejo de irrigação (ZMI) e manejo convencional (MC1, MC2 e MC3), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso (AC) e um ano seco (AS). A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



5.4.3. Percolação profunda

A percolação profunda é uma variável que tem grande impacto na eficiência de irrigação e é, quase sempre, desprezada nas avaliações. A PP apresentada neste trabalho se refere à irrigação excessiva. Ela ocorre sempre que a lâmina de irrigação aplicada for maior que o déficit de manejo. A água aplicada em excesso percola para profundidades maiores que a profundidade efetiva do sistema radicular, ficando indisponível para a planta.

Nos casos do manejo IP e MC1, a PP é igual a zero. No IP, o manejo foi feito com base na AD real de cada pixel, ou seja, a irrigação nunca é aplicada em excesso. No caso do MC1, o manejo foi realizado considerando que todos os pixels da área irrigada têm valor de AD igual ao menor valor de AD. Ou seja, neste caso a lâmina de irrigação sempre será menor ou, no máximo, igual ao déficit de manejo. No caso do MC2, MC3 e ZMI, os valores de PP calculados representam o potencial de redução de percolação profunda.

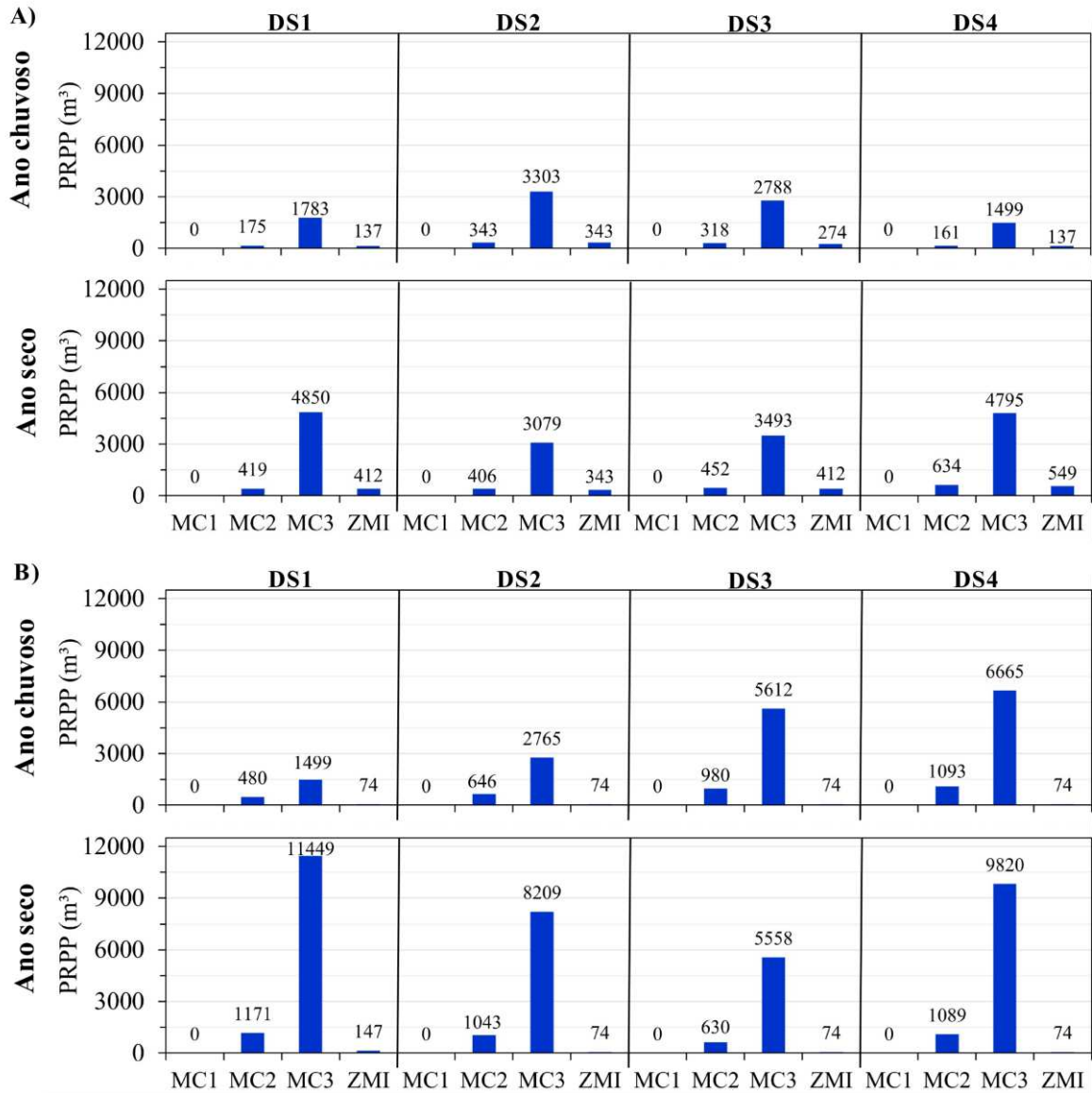
Com base no volume total de água percolada, nos dois pivôs de estudo, o uso da IP alcançou PRPP bastante expressivos, em relação ao MC3, em todas as datas de semeadura avaliadas (Figura 15).

Observa-se, em todas as condições, que o PRPP da IP em relação a ZMI é sempre inferior às estratégias de MC2 e MC3. Em todas as condições analisadas, tanto no PivoBHBV como no PivoBHALPA, observou-se que as lâminas de PP geradas com o uso de ZMI foram muito próximas a zero (PivoBHBV= 0,24 mm (AC) e 0,46 mm (AS); e PivoBHALPA= 0,06 mm (AC) e 0,07 mm (AS)), aproximando-se mais do manejo com base na IP, indicando um melhor aproveitamento da água de irrigação, comparado as estratégias de MC2 e MC3.

No PivoBHBV (Figura 15A), os maiores valores de PRPP foram obtidos no MC3. No AC, o maior valor de PRPP, em relação ao MC3, foi observado na DS2, correspondendo a 3303 m³ de água percolada. Na DS1, DS3 e DS4, respectivamente, os PRPPs foram iguais a 1.783, 2.788 e 1.499 m³. No AS, os maiores PRPP foram observados nas DS1 e DS4, sendo, respectivamente, iguais a 4.850 e 4.795 m³. Na DS2 e DS3, os PRPPs foram, respectivamente, iguais a 3.079 e 3.493 m³.

No PivoBHALPA (Figura 15B), considerando o AC, os maiores PRPPs, em relação ao MC3, foram de 6.665 e 5.612 m³, sendo observadas nas DS4 e DS3, respectivamente. Na DS1, o PRPP foi igual a 1.499 m³, e, na DS2, foi igual a 2.765 m³. No AS, os maiores PRPPs foram observados nas DS1 e DS4, cujos valores alcançados foram da ordem de 11.449 e 9.820 m³. Na DS2, o PRPP foi igual a 8.209 m³, e, na DS3, foi igual a 5.558 m³.

Figura 15 – Potencial de redução de percolação profunda (PRPP) da água de irrigação, obtido da diferença entre as percolações profundas calculadas no manejo com irrigação de precisão (IP) e aquelas obtidas no manejo convencional (MC1, MC2 e MC3) e no manejo com base nas zonas de manejo de irrigação (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), considerando um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



Analisando os valores médios obtidos nas quatro datas de semeadura, no PivoBHBV, a IP, em relação a MC2 e MC3, apresentou PRPP igual a 249,1 e 2.343,2 m³, no AC, e 477,8 e 4.054,0 m³, no AS, correspondendo a 0,14 e 1,5% (AC) e a 0,19 e 1,7% (AS) do volume de irrigação aplicada no ciclo da cultura. No PivoBHALPA, devido à maior área irrigada e maior variabilidade espacial das características físico-hídricas do solo, os valores de PRPP foram ainda maiores. Em relação ao MC2 e ao MC3, respectivamente, observou-se valores de PRPP

iguais a 799,7 e 4.135,4 m³, no AC, e iguais a 983,0 e 8.587,7 m³, no AS, correspondendo a 0,35 e 2,3% (AC) e a 0,32 e 3,0% (AS) do volume de água aplicada via irrigação no ciclo da cultura da soja.

Considerando a estratégia MC2, observou-se PP em 11.691 pixels (31,43%), no PivoBHBV, e em 27.357 pixels (54,01%), no PivoBHALPA, que foram aqueles pixels onde o valor médio de AD foi maior que os valores de AD real do pixel. Na estratégia MC3, foi observada PP em 37.187 pixels (99,99%), no PivoBHBV, e em 50.470 pixels (99,65%), no PivoBHALPA. No PivoBHBV, considerando a DS2, por exemplo, o valor médio de PP considerando o MC3 foi cerca de 11,1% maior que o PP no MC2. Já no PivoBHALPA, o valor médio de PP considerando o MC3 foi cerca de 13,8% maior que o PP no MC2.

No AS, os valores observados de PP foram superiores aos observados no AC. Isso se deve ao fato de que a PP simulada se refere à irrigação aplicada a mais que o necessário. Como em um AS se irriga mais, era esperado se perder mais água por PP profunda nesse período.

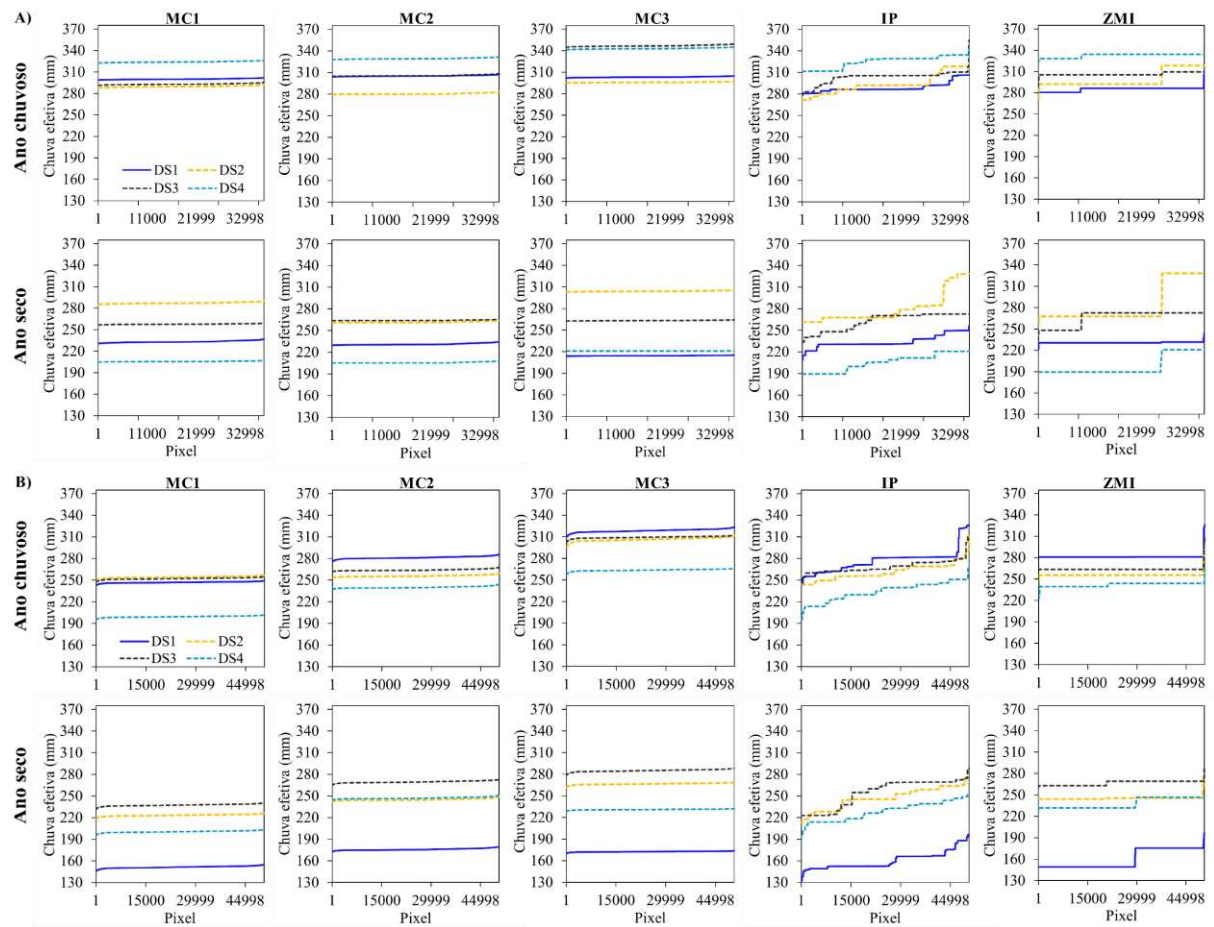
5.4.4. Chuva efetiva

Na Figura 16 apresenta-se os valores de chuva efetiva calculados para MC, IP e ZMI, para as quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco. A chuva efetiva representa a parcela da chuva que fica armazenado no solo disponível para a cultura. A chuva efetiva pode ser influenciada pela estratégia de manejo adotada, podendo ser utilizada para reduzir a lâmina necessária de irrigação. Entretanto, quando a chuva efetiva é determinada erroneamente ou quanto é substituída pela chuva total no manejo da irrigação, pode se ter uma subestimativa da lâmina necessária de irrigação, que, por sua vez, pode refletir no aumento do déficit hídrico e, conseqüentemente, em redução da produtividade da cultura.

Nas simulações realizadas, não foi possível observar uma tendência no comportamento da chuva efetiva, pois a sua dinâmica vai depender de uma combinação de fatores, como a estratégia de manejo utilizada e condições de clima e de planta. Por exemplo, analisando cenários contrastantes, em termos de total precipitado, no PivoBHBV (Figura 16A), considerando a DS1, dos 679,3 e 326,4 mm precipitados nesta data, respectivamente, no AC e no AS, os valores de chuva efetiva média observados pelas estratégias de MC foram iguais a 281 e 233 mm, no MC1, a 287 e 231 mm, no MC2, e a 305 e 214 mm, no MC3. Considerando o IP e ZMI, a chuva efetiva média, para as duas estratégias, foi de 291mm, no AC, e de 234 (IP) e 231 mm (ZMI), no AS. Já no PivoBHALPA (Figura 16B), considerando também a DS1, dos 803,0 e 281,8 mm precipitados nessa data, respectivamente, no AC e no AS, os valores de

chuva efetiva média observados pelas estratégias de MC foram iguais a 247 e 151 mm, no MC1, a 281 e 176 mm, no MC2, e a 318 e 173 mm, no MC3. Considerando o IP e ZMI, a chuva efetiva média, para as duas estratégias, foi de 275 mm, no AC, e de 160 mm, no AS.

Figura 16 – Chuva efetiva estimada na irrigação de precisão (IP), zonas de manejo de irrigação (ZMI) e manejo convencional (MC1, MC2 e MC3), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4) em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



Considerando o PivoBHBV e a estratégia IP, observou um valor médio da chuva efetiva, no AC, igual a 312 mm e, no AS, igual a 245 mm. A chuva efetiva possibilitou uma economia de água média de aproximadamente 60,8%, no AC, e de 46,0%, no AS. Considerando o PivoBHALPA, observou um valor médio da chuva efetiva, no AC, igual a 259 mm e, no AS, igual a 224 mm. O armazenamento da água da chuva possibilitou uma economia de água média de 60,0%, no AC, e de 46,8%, no AS.

Comparando os dois pivôs analisados, embora tenha-se observado uma quantidade precipitada maior no PivoBHALPA, a chuva efetiva foi maior no PivoBHBV. Isso se deve à maior capacidade de retenção de água do solo no PivoBHBV.

5.4.5. Lâmina de irrigação total

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de lâmina de irrigação total obtidos no manejo de irrigação IP, ZMI e MC, nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Tabela 7 – Valores de lâmina de irrigação total, considerando as cinco estratégias de manejo (MC1, MC2, MC3, IP e ZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Ano	Data de Semeadura	PivoBHBV (mm)					PivoBHALPA (mm)				
		MC1	MC2	MC3	IP	ZMI	MC1	MC2	MC3	IP	ZMI
Chuvoso (AC)	DS1	236	229	216	225	225	190	148	108	154	148
	DS2	233	237	221	224	220	194	188	128	182	187
	DS3	188	177	126	175	171	214	198	150	193	197
	DS4	148	159	148	153	137	260	212	186	218	209
	Média	201	201	178	194	188	215	187	143	187	185
Seco (AS)	DS1	339	341	357	337	340	330	299	292	309	314
	DS2	240	264	218	245	242	263	236	210	232	235
	DS3	223	227	183	224	220	252	216	185	230	219
	DS4	280	270	242	264	253	271	212	236	231	221
	Média	271	276	250	268	264	279	241	231	251	247

*MC1 = manejo convencional com base no menor valor de água disponível no solo; MC2 = manejo convencional com base no valor médio de água disponível no solo; MC3 = manejo convencional com base no maior valor de água disponível no solo; IP = irrigação de precisão; e, ZMI = zonas de manejo de irrigação.

Observa-se, na Tabela 7, que no PivoBHBV, no AC, a lâmina de irrigação total média durante o ciclo da cultura variou de 178 mm, no MC3, a 201 mm, no MC1. No AS, a lâmina de irrigação total média durante o ciclo da cultura variou de 250 mm, no MC3, a 276 mm, no MC2. Destaca-se o fato de ter havido poucas diferenças no valor médio de irrigação total entre os manejos ZMI e IP, sendo esta diferença igual a 6 mm, no AC, e a 4 mm, no AS. Os menores valores de irrigação total foram observados no MC3, uma vez que, nesta estratégia, são observados, também, menores valores de ETa. Nota-se que a lâmina de irrigação total média no AS foi 25,6% maior que a lâmina de irrigação total média no AC, no MC1, 27,2%, no MC2, 28,9%, no MC3, 28,6%, no ZMI, e 27,4%, no IP.

No caso do PivoBHALPA, tanto no AC quanto no AS, o maior valor médio de irrigação total foi observado no MC1, sendo respectivamente iguais a 215 e 279 mm. No AC, as menores diferenças no valor médio de irrigação total foram observadas entre os manejos MC2 e IP, e, no AS, entre ZMI e IP, sendo igual a 0,0 e 4,0 mm, respectivamente. No

PivoBHALPA, a lâmina de irrigação total média no AS foi 23,1% maior que a lâmina de irrigação total média no AC, no MC1, 22,5%, no MC2, 38,0%, no MC3, 25,1%, no ZMI, e 25,4%, no IP.

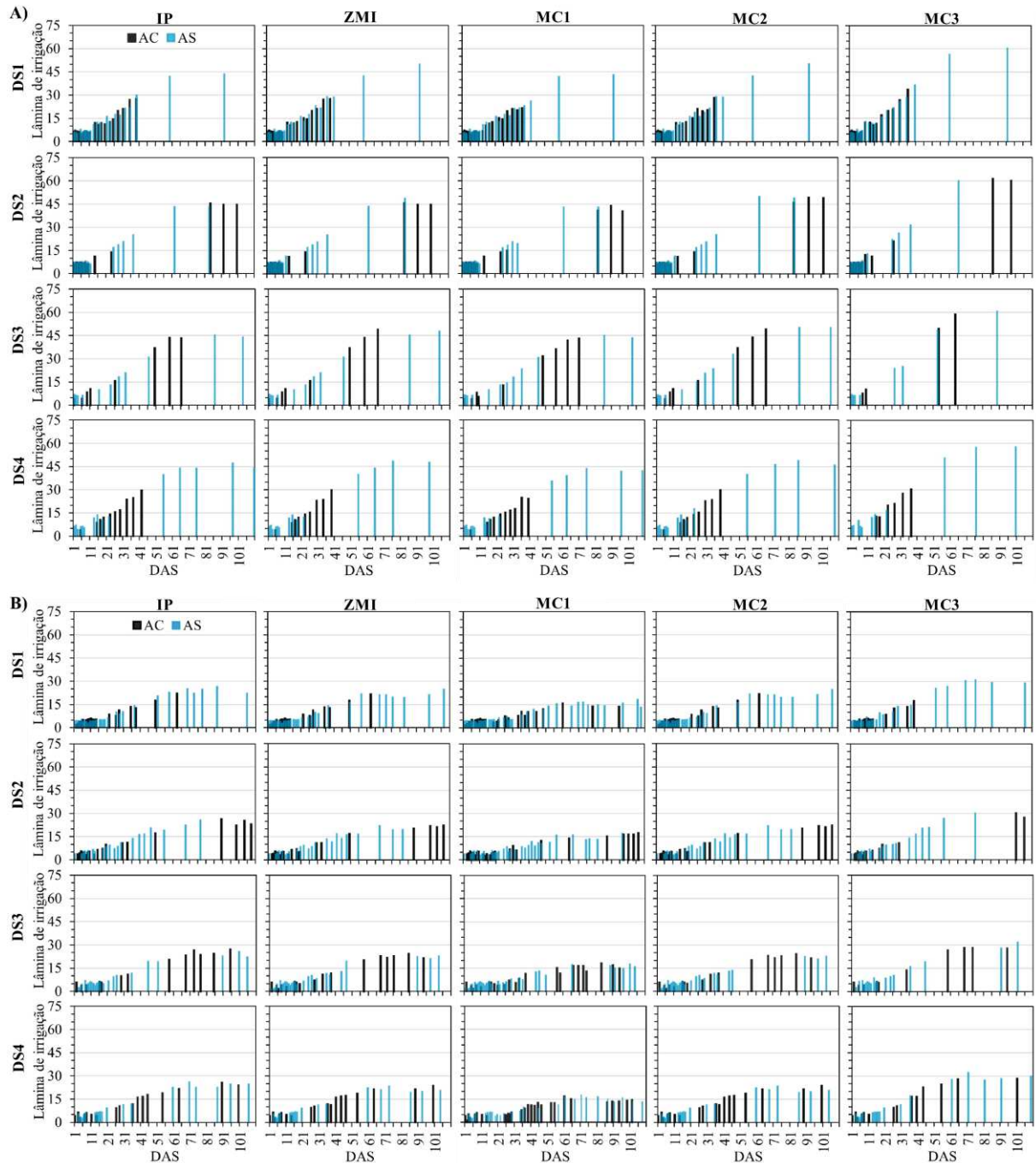
Analisando a Tabela 7 em relação ao manejo adotado, observa-se que a lâmina de irrigação total média no IP se aproximou mais dos valores obtidos no MC2 e ZMI. Os maiores valores foram observados no MC1 e os menores no MC3. Considerando-se os dois pivôs, observa-se que a lâmina de irrigação total média no PivoBHALPA é cerca de 4,8% menor que no PivoBHBV, no AC, e 6,0%, no AS.

Os maiores valores de lâmina de irrigação total observados no MC1, no AC, podem ser justificados por uma combinação do padrão de precipitação com a estratégia de manejo, o que resulta em irrigações mais frequentes e menor valor de chuva efetiva. No caso do MC3, as irrigações são menos frequentes e o déficit de água no solo é maior e a chuva efetiva são maiores.

Na Figura 17 apresenta-se a lâmina de irrigação diária aplicada durante o ciclo da cultura de soja, para um pixel escolhido aleatoriamente, nos dois pivôs (PivoBHBV, PivoBHALPA). Na simulação, foram consideradas os manejos de IP, ZMI e MC, as quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Analisando o comportamento das lâminas de irrigação diária ao longo do ciclo da cultura da soja, de forma geral, fica evidente que no manejo MC1, que considera o pixel de menor valor de AD como referência para toda a área irrigada, a frequência de irrigação é maior ao passo que a lâmina de irrigação diária é menor. Por outro lado, no manejo MC3, que considera o pixel de maior valor de AD como referência para toda a área irrigada, têm-se irrigações menos frequentes e maiores lâminas de irrigações diárias. Nas datas de semeadura do AS a frequência de irrigação tende a ser ainda maior, influenciando no aumento da lâmina de irrigação total ao final do ciclo da cultura. Por exemplo, no PivoBHBV (Figura 17A), na DS1, considerando a IP, ZMI, MC1, MC2 e MC3, respectivamente, foram observados, no AC, a ocorrência de 21, 20, 21, 19 e 17 eventos de irrigação, e, no AS, de 22, 22, 23, 22 e 19 eventos de irrigação. Nestes mesmo casos, respectivamente, as lâminas de irrigação simuladas, no AC, foram iguais a 225, 225, 236, 229 e 216 mm, e, no AS, iguais a 337, 340, 339, 341 e 357 mm. Nesse caso, diante do exposto, verificou-se que a lâmina de irrigação total, no AC, teve forte influência da frequência em que as irrigações ocorreram de acordo com cada estratégia de manejo, enquanto, no AS, a lâmina de irrigação total foi influenciada pela estratégia de manejo e pela distribuição das chuvas nessa DS.

Figura 17 – Lâminas de irrigação diária, avaliada durante o ciclo da cultura da soja, para um pixel do pivô, considerando o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP) com os manejos convencional (MC1, MC2 e MC3) e em zonas de manejo (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



No PivoBHALPA (Figura 17B), devido a maior variabilidade espacial, este comportamento é ainda mais evidente. Considerando também a DS1, no PivoBHALPA, foram observados, no AC, a ocorrência de 19, 19, 27, 19 e 15 eventos de irrigação, e, no AS, de 30, 32, 40, 32 e 25 eventos de irrigação. Nestes mesmo casos, respectivamente, as lâminas de

irrigação simuladas, no AC, foram iguais a 154, 148, 190, 148 e 108 mm, e, no AS, iguais a 309, 314, 330, 299 e 292 mm. Como esperado, no PivoBHALPA, a lâmina de irrigação total foi fortemente influenciada pela frequência em que as irrigações ocorreram de acordo com cada estratégia de manejo. Ou seja, no MC1, onde se teve maior frequência de irrigação obteve-se a maior lâmina de irrigação total, mesmo ocorrendo irrigações diárias menores. No MC3, aconteceu o contrário.

Na Tabela 8 apresenta-se as porcentagens de pixels, nos pivôs PivoBHBV e PivoBHALPA, que recebem lâminas de irrigação maiores que o déficit de manejo, iguais ao déficit e menores que o déficit.

Tabela 8 – Porcentagens de pixels nos pivôs PivoBHBV e PivoBHALPA que receberam lâminas de irrigação maiores (L_{Ma}), iguais (L_I) e menores (L_{Me}) que o déficit de manejo.

Estratégia de manejo	PivoBHBV (%)			PivoBHALPA (%)		
	L _{Ma}	L _I	L _{Me}	L _{Ma}	L _I	L _{Me}
MC1	0.00	0.63	99.37	0.00	0.45	99.55
MC2	31.43	0.51	68.06	44.09	3.13	52.18
MC3	99.99	0.01	0.00	99.65	0.35	0.00

Áreas dos pixels = 25m²; Totais de pixels: PivoBHBV = 37.191; e PivoBHALPA = 50.649.

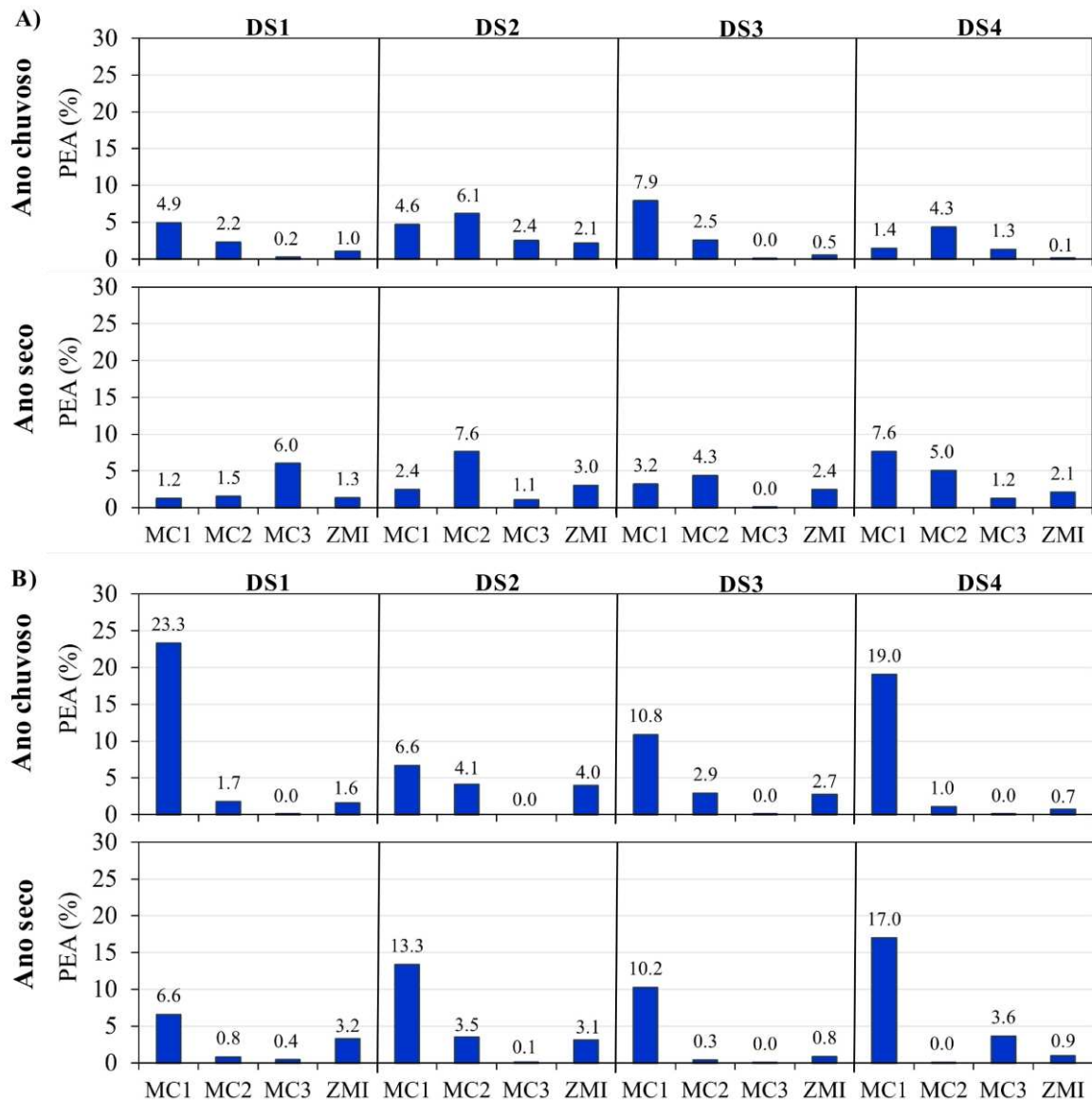
Analisando a Tabela 8, observa-se que, no MC1, existem alguns pixels (áreas) recebendo quantidades de água ideal (PivoBHBV = 0,63% e PivoBHALPA = 0,45%) e um grande número de áreas recebendo quantidades insuficientes (PivoBHBV = 99,37% e PivoBHALPA = 99,55%); já no MC3, no PivoBHBV e no PivoBHALPA, respectivamente, observa-se que 0,01% e 0,35% dos pixels estão recebendo, com base do déficit hídrico de manejo, a quantidade ideal de água; Nesses mesmos pivôs, observa-se que 99,99% e 99,65% dos pixels recebem quantidades maiores de água que aquela simulada no manejo IP.

No MC2, uma parte dos pixels estarão sempre recebendo uma menor quantidade de água (PivoBHBV = 68,1% e PivoBHALPA = 52,2%), os pixels que possuem AD igual a média, estarão recebendo a quantidade ideal (PivoBHBV = 0,51% e PivoBHALPA = 3,73%) e outra parte dos pixels estarão recebendo água em excesso (PivoBHBV = 31,4% e PivoBHALPA = 44,1%). No manejo de irrigação de precisão, o manejo é realizado conforme o valor real de AD no pixel, com isso 100% dos pixels recebem a quantidade de água ideal.

Na Figura 18 apresenta-se o potencial de economia de água calculado pela diferença do somatório entre a lâmina de irrigação aplicada na condição IP e as lâminas aplicadas no manejo MC e na ZMI, considerando as quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco. Haverá potencial de economia de água sempre que a lâmina de

irrigação aplicada em um determinado pixel for maior que a lâmina de irrigação calculada no IP.

Figura 18 – Potencial de economia de água (PEA) calculado comparando o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP) com os manejos convencional (MC1, MC2 e MC3) e em zonas de manejo de irrigação (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



No MC1, analisando o PEA observado no PivoBHBV (Figura 18A), verifica-se, nas quatro datas de semeadura do AC, que o emprego da IP resultou em economia de água. Na DS3, o PEA foi igual a 12.787 m³, sendo este o maior valor obtido, correspondendo a 7,9% do volume total de água aplicado na IP. Na DS1, obteve-se PEA de 10.214 m³ (4,9%), na DS2, o

PEA foi de 9.655 m³ (4,6%) e, na DS4, de 1.984 m³ (1,4%). Em relação ao MC2, o maior PEA ocorreu na DS2, sendo o valor igual a 12.774 m³ (6,1%). Na DS1, DS3 e DS4, respectivamente, os PEAs foram iguais a 4.685, 4.095 e 6.108 m³ (2,2, 2,5 e 4,3%). Em relação ao MC3, o emprego da IP apresentou economia de água nas DS2 e DS4, sendo os valores de PEA, respectivamente, iguais a 5.086 e 1.791 m³ (2,4 e 1,3%). Na DS1, o PEA foi de apenas 493 m³ (0,2%) e, na DS3, não resultou em PEA. Avaliando o uso da IP em relação a ZMI, comparado ao MC, principalmente, MC1 e MC2, observou-se relativamente menores valores de PEAs. Considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, os PEAs em relação a ZMI foram iguais a 2.167, 4.380, 806 e 119 m³ (1,0, 2,1, 0,5 e 0,1%).

No AS, verificou-se que, no caso da MC1, a maior economia de água devido ao uso da IP foi observada na DS4, cujo valor alcançado foi de 18.718 m³ (7,6%). Na DS1, obteve-se PEA de 3.848 m³ (1,2%), na DS2, de 5.512 m³ (2,4%) e, na DS3, de 6.618 m³ (3,2%). Em relação ao MC2, a IP apresentou PEA em todas as datas de semeadura, sendo observado a maior economia de água na DS2, na ordem de 17.328 m³ (7,6%), enquanto na DS1, DS3 e DS4 foram, respectivamente, de 4.677, 9.030 e 12.304 m³ (1,5, 4,3 e 5,0%). Em relação ao MC3, a IP apresentou o maior PEA na DS1, sendo este de 18.827 m³ (6,0%), enquanto na DS2 e DS4, respectivamente, os PEAs foram da ordem de 2.415 e 3.017 m³ (1,1 e 1,2%). Na DS3, não resultou em PEA. Na DS1, do AS, foram identificados baixos índices pluviométricos, este fato favoreceu o aumento da frequência de irrigação na estratégia MC3, que, combinada as maiores lâminas de irrigação por evento, necessário para repor o déficit do pixel de maior AD, resultou em maior uso de água no ciclo da cultura da soja, comparado ao IP. O uso da IP em relação a ZMI, no AS, comparado ao MC, principalmente, MC1 e MC2, observou-se, também, menores PEAs. Considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, os PEAs em relação a ZMI foram iguais a 4.139, 6.873, 5.007 e 5.053 m³ (1,3, 3,0, 2,4 e 2,1%).

No PivoBHALPA (Figura 18B), no AC, observa-se que o emprego da IP em relação ao MC1, resultou em economia de água em todas as condições, sendo que na DS1 e na DS4 foram obtidas as maiores economias, com valores de PEAs, respectivamente, iguais a 45.384 e 52.568 m³ de água, correspondendo a uma economia equivalente a 23,3 e 19,0% do volume total de água utilizada no ciclo da soja. Nas outras datas de semeadura, os PEAs foram menores, mas ainda assim bem expressivos, comparado ao PivoBHBV. Na DS2, foi observado PEA de 15.301 m³ (6,6%) e, na DS3, de 26.555 m³ (10,8%). Em relação ao MC2, o maior valor de PEA ocorreu na DS2, com PEA da ordem de 9.416 m³ (4,1%). Na DS1, DS3 e DS4, respectivamente, os valores de PEAs foram iguais a 3.383, 7.048 e 2.871 m³ (1,7, 2,9 e 1,0%). Com relação ao MC3, em nenhuma das DS foram observados valores PEA expressivo, já que os volumes de

água simulados para o MC3 permaneceram próximo ao volume de água simulado com o uso da IP. O maior PEA observados em relação ao MC3 foi igual a 95 m³ (0,01%), ocorrido na DS1. As menores economias de água obtidas com o uso da IP, foram observadas em relação ao manejo ZMI, principalmente, quando comparado aos MC1 e MC2. Considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, os PEAs em relação a ZMI foram iguais a 3.056, 9.107, 6.709 e 1.885 m³ (1,6, 4,0, 2,7 e 0,7%).

No AS, em relação ao MC1, também foram verificados PEA em todas as condições, sendo que na DS2 e na DS4 foram observados os maiores PEAs, respectivamente, iguais a 39.142 e 49.649 m³, correspondendo a 13,3 e 17,0% do volume total de água usado no ciclo da soja com a IP. Na DS1, observou-se PEA de 25.661 m³ (6,6%) e, na DS3, de 29.833 m³ (10,2%). Em relação MC2, o maior valor de PEA foi observado na DS2, igual a 10.149 m³ (3,5%). Na DS1, DS3 e DS4, respectivamente, os PEAs foram iguais a 3.046, 1.006 e 80 m³ (0,8, 0,3 e 0,1%). Com relação ao MC3, os maiores PEAs observados foram de 10.600 e 1.689 m³ (3,6 e 0,4%), respectivamente, na DS4 e DS1. Os PEAs em relação a ZMI, considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, foram iguais a 12.721, 9.059, 2.385 e 2.673 m³ (3,2, 3,1, 0,8 e 0,9%).

No PivoBHBV, os PEAs médios em relação as estratégias de manejo de irrigação, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram iguais a 8.660, 6.915, 1.844 e 1.868 m³ (4,7, 3,8, 1,0 e 0,9%), no AC, e de 8.674, 10.835, 6.065 e 5.053 m³ (3,6, 4,6, 2,8 e 2,2%), no AS. No PivoBHALPA, os PEAs médios, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram iguais a 34.952, 5.680, 24 e 5.189 m³ (14,9, 2,4, 0,1 e 2,2%), no AC, e de 36.071, 4.734, 3.130 e 6.709 m³ (11,8, 1,5, 1,0 e 2,0%), no AS.

Avaliando-se o PEA médio por ano, observa-se, em termos volumétricos, um maior potencial de economia de água no AS. Isso ocorre pela fato de a lâmina de irrigação ser maior, em todas as estratégias de manejo, quando comparada ao ano AC. No PivoBHBV, o PEA médio foi igual a 5.806 m³ (3,2%), no AC, e de 9.200 m³ (3,7%), no AS. No PivoBHALPA, o PEA médio foi de 13.552 m³ (5,8%), no AC, e de 14.645 m³ (4,8%), no AS.

Comparando os dois pivôs analisados neste estudo, observou-se que a IP expressou maior potencial de economia de água no PivoBHALPA, devido a maior variabilidade espacial das características do solo. No PivoBHALPA, foi verificado um PEA de 2,3 vezes maior que no PivoBHBV, durante o AC, e de 1,6 vezes, durante o AS.

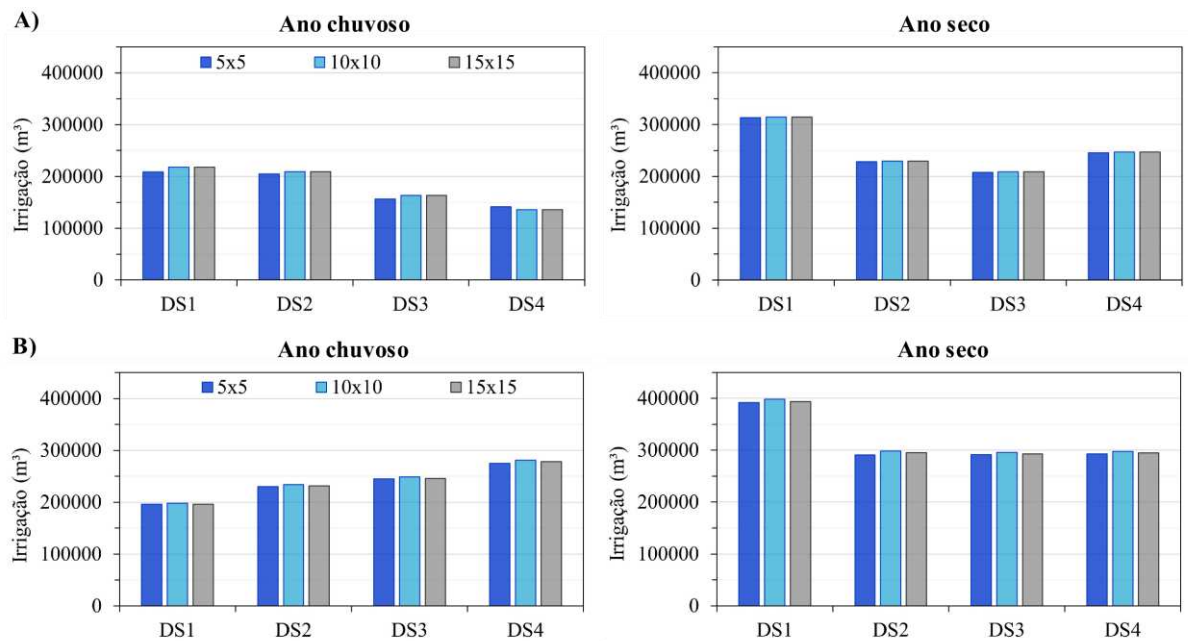
Em estudo realizado por LaRue (2011), foi relatado os benefícios de um sistema de pivô central com aplicação a taxa variável, onde verificou-se uma redução de 12% na aplicação de água. Em outro estudo realizado em condições de campo, Yari *et al.* (2017) obtiveram uma

economia de água de até 25 e 34%, com a utilização do manejo de irrigação de precisão, durante as safras de 2013 e 2014, respectivamente. Na safra de 2015, a economia de água obtida foi ainda mais expressiva. Neste caso, os autores verificaram redução de até 43% na água aplicada. Já Miller *et al.* (2018) obtiveram uma redução na aplicação de água de até 18 mm, com variação média dentro do campo de 12 mm. Tais evidências indicam que os benefícios provenientes do uso de irrigação de precisão é muito específico do local e das condições avaliadas.

5.4.6. Avaliação do impacto do tamanho do pixel no volume de água de irrigação

Na Figura 19 apresenta-se o volume de água de irrigação, calculado com base no manejo de irrigação de precisão (IP), para diferentes tamanhos de pixel (5x5, 10x10 e 15x15 metros), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco.

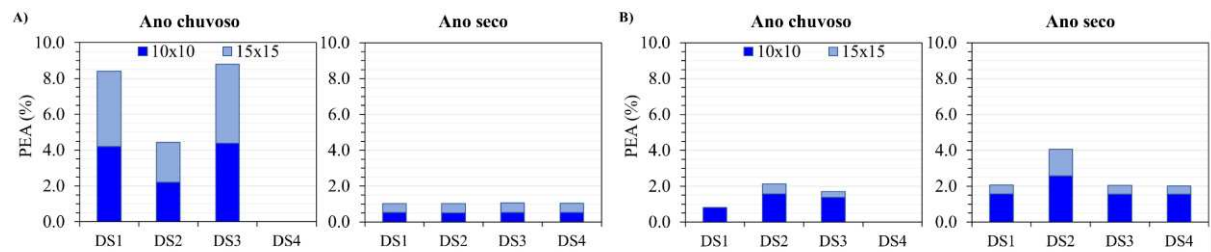
Figura 19 – Irrigação total aplicada (m^3), simulada com base no manejo de irrigação de precisão (IP), considerando diferentes tamanhos de pixel (5x5, 10x10 e 15x15 metros), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4) em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



Em se tratando de eficiência de irrigação, quanto menor a área a ser manejada, menor será a variabilidade espacial do solo, e maior a eficiência. Por outro lado, quanto menor a área a ser manejada, mais difícil será a operacionalização em campo. Sendo assim, deve-se buscar um equilíbrio entre o ótimo da eficiência e o que é factível, na prática, em termos operacionais.

Na Figura 20 apresenta-se o potencial de economia de água calculado pela diferença do somatório entre a lâmina de irrigação aplicada na condição IP utilizando o pixels de 25 m² (5x5 m) como padrão e as lâminas aplicadas na condição IP utilizando o pixels de 100 m² (10x10 m) e de 225 m² (15x15 m), considerando as quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco. Haverá potencial de economia de água sempre que a lâmina de irrigação aplicada considerando o tamanho de pixel 5 x 5 m for menor que a lâmina de irrigação calculada considerando os demais tamanhos de pixel.

Figura 20 – Potencial de economia de água (PEA) calculado comparando o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP), em diferentes tamanhos de pixel (5x5, 10x10 e 15x15 metros), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4) em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



Analisando as diferenças em termos de potenciais de economia de água, observou-se que, no PivoBHBV (Figura 20A), os maiores PEAs, no AC, ocorreram nas DS1 e DS3, com valores iguais a 4,2 e 4,4%, respectivamente, tanto na comparação 5x5-10x10 quanto na 5x5-15x15. Na DS2, o PEA em relação a ambos os tamanhos de pixels foi de 2,2%, e, na DS4, não resultou em economia de água. No AS, observou-se que houve uma tendência, em todos os cenários, os PEAs variaram de 0,50 a 0,53%.

No PivoBHALPA (Figura 20B), os maiores PEAs, no AC, ocorreram nas DS2 e DS3, com valores iguais a 1,58 e 1,37%, respectivamente, na comparação 5x5-10x10, e iguais a 0,55 e 0,33%, na comparação 5x5-15x15. No AS, os maiores PEAs ocorreram na DS2, sendo de 2,58%, na comparação 5x5-10x10, e de 1,48%, na comparação 5x5-15x15.

No caso do PivoBHBV, considerando a mesma data de semeadura, observa-se que houve pouca diferença no volume total de água aplicada em função dos diferentes tamanhos de pixels. No caso do PivoBHALPA, apesar de ocorrer menores PEAs comparado ao PivoBHBV, observou-se maiores variações, tanto nos diferentes tamanhos de pixels quanto nas diferentes datas de semeadura.

Essas pequenas diferenças observadas no volume de água aplicada, pode ser atribuída a maior variabilidade do solo nos pixels maiores e as diferentes demandas ocorridas em função

das datas de semeadura. Além disso, é importante destacar a variação do tamanho da área total dos pivôs. Isso ocorre principalmente na região do perímetro do círculo do pivô, onde pixels com áreas maiores tendem a ultrapassar a área real do pivô. Considerando o pixel de 10x10 m e o de 15x15 m, respectivamente, no PivoBHBV, a área do pivô foi aproximadamente 0,48 e 0,49 ha maior que considerando o pixel de 5x5 m, e, no PivoBHALPA, foi de 1,98 e 0,61 ha.

5.4.7. Energia requerida

A energia é atualmente um dos principais custos de produção na agricultura irrigada e seu custo deve ser sempre considerado nos projetos de irrigação. Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios de energia requerida por hectare obtidos no manejo de irrigação IP, ZMI e MC, nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Tabela 9 – Valores de energia requerida média (kW ha⁻¹), considerando as cinco estratégias de manejo (MC1, MC2, MC3, IP e ZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Ano	Data de Semeadura	PivoBHBV (kW ha ⁻¹)					PivoBHALPA (kW ha ⁻¹)				
		MC1	MC2	MC3	IP	ZMI	MC1	MC2	MC3	IP	ZMI
Chuvoso (AC)	DS1	960	920	840	892	890	1040	800	600	830	799
	DS2	920	960	880	892	879	1040	1000	680	984	999
	DS3	760	680	480	687	680	1160	1080	800	1048	1079
	DS4	600	640	600	612	531	1400	1160	1000	1184	1121
	Média	810	800	700	771	745	1160	1010	770	1012	1000
Seco (AS)	DS1	1360	1360	1400	1342	1360	1800	1600	1600	1681	1693
	DS2	960	1040	880	962	939	1440	1280	1120	1261	1255
	DS3	880	880	720	885	871	1360	1160	1000	1245	1177
	DS4	1120	1080	960	1042	999	1480	1160	1280	1256	1191
	Média	1080	1090	990	1058	1042	1520	1300	1250	1361	1329

*MC1 = manejo convencional com base no menor valor de água disponível no solo; MC2 = manejo convencional com base no valor médio de água disponível no solo; MC3 = manejo convencional com base no maior valor de água disponível no solo; IP = irrigação de precisão; e, ZMI = zonas de manejo de irrigação.

Observa-se, na Tabela 9, que no PivoBHBV, no AC, a energia requerida média durante o ciclo da cultura variou de 700 kW ha⁻¹, no MC3, a 810 kW ha⁻¹, no MC1. No AS, a energia requerida média durante o ciclo da cultura variou de 990 kW ha⁻¹, no MC3, a 1090 kW ha⁻¹, no MC2. As menores diferenças no valor médio de energia requerida foram observadas entre os manejos ZMI e IP, sendo igual a 26 kW ha⁻¹, no AC, e a 16 kW ha⁻¹, no AS. Os menores valores de energia requerida foram observados no MC3. Nota-se que a energia requerida média no AS

foi 25,0% maior que a energia requerida média no AC, no MC1, 26,6%, no MC2, 29,3%, no MC3, 28,5%, no ZMI, e 27,1%, no IP.

No PivoBHALPA, tanto no AC quanto no AS, o maior valor médio de energia requerida foi observado no MC1, sendo, respectivamente, iguais a 1160 e 1520 kW ha⁻¹. No AC, as menores diferenças no valor médio de energia requerida foram observadas entre os manejos MC2 e IP, e, no AS, entre ZMI e IP, sendo igual a 2 e 32 kW ha⁻¹, respectivamente. No PivoBHALPA, a energia requerida média no AS foi 23,7% maior que a energia requerida média no AC, no MC1, 22,3%, no MC2, 38,4%, no MC3, 24,8%, no ZMI, e 25,7%, no IP.

Analisando a Tabela 9 em relação ao manejo adotado, observa-se que a lâmina de irrigação total média no IP se aproximou mais dos valores obtidos no MC2 e ZMI. Os maiores valores foram observados no MC1 e os menores no MC3. Considerando-se os dois pivôs, observa-se que a energia requerida média no PivoBHALPA é cerca de 29,4% maior que no PivoBHBV, no AC, e 28,5% no AS.

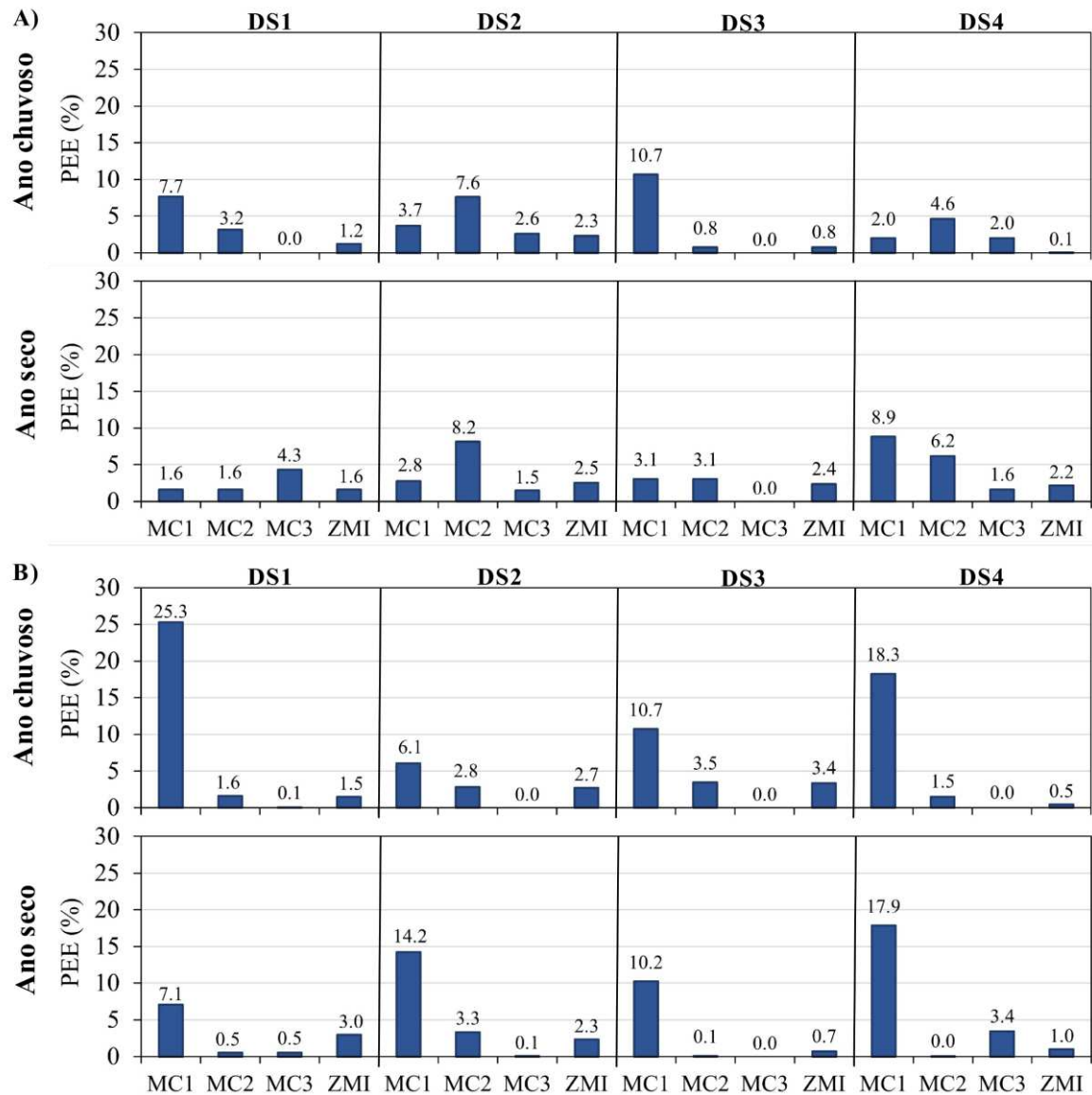
Na Figura 21 apresenta-se o potencial de economia de energia calculado pela diferença do somatório entre a energia requerida na condição IP e a energia requerida no manejo MC e ZMI, considerando as quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco. Assim como no PEA, haverá potencial de economia de energia sempre que a energia requerida em um determinado pixel for maior que a energia requerida calculada no IP.

No MC1, analisando os valores de potencial de economia de energia no PivoBHBV (Figura 21A), verifica-se, nas quatro datas de semeadura do AC, que o emprego da IP resultou em economia de energia. Na DS3, o maior valor obtido de PEA foi igual a 6.824 kW, correspondendo a 10,7% do consumo total de energia no ciclo da soja com a IP. Na DS1, obteve-se PEE igual a 6.345 kW (7,7%), na DS2, igual a 3.034 kW (3,7%) e, na DS4, igual a 1.139 kW (2,0%). Em relação ao MC2, o maior PEE ocorreu na DS2, com PEE da ordem de 6.335 kW (7,6%). Na DS1, DS3 e DS4, respectivamente, os PEEs foram iguais a 2.626, 483 e 2.631 kW (3,2, 0,8 e 4,6%). Em relação ao MC3, o emprego da IP representou um PEE, na DS2 e na DS4, iguais a, respectivamente, 2.162 e 1.139 kW (2,6 e 2,0%). Os PEEs advindos do uso da IP em relação a ZMI, considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, foram, respectivamente, iguais a 1.015, 1.889, 483 e 38 kW (1,2, 2,3, 0,8 e 0,1%).

No AS, em relação ao MC1, observa-se que o maior PEE ocorreu na DS4, com valor igual a 8.578 kW (8,9%). Na DS1, obteve-se PEE igual a 2.022 kW (1,6%), na DS2, de 2.476 kW (2,8%) e, na DS3, de 2.530 kW (3,1%). Em relação ao MC2, o uso da IP apresentou PEE em todas as datas de semeadura, sendo na DS2 e na DS4 as que apresentaram os maiores valores, iguais a 7.291 e 5.983 kW (8,2 e 6,2%), respectivamente. Na DS1 e DS3 foram,

respectivamente, de 2.022 e 2.530 kW (1,6 e 3,1%). Em relação ao MC3, o uso da IP representou um potencial de economia de energia maior na DS1, com valor de PEE igual a 5.422 kW (4,3%), enquanto na DS2 e DS4, respectivamente, os PEEs foram da ordem de 1.329 e 1.551 kW (1,5 e 1,6%). Os menores valores de PEEs, no AS, também foram observados na comparação do IP com a ZMI, principalmente, quando comparado ao MC1 e MC2. Considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, os PEEs em relação a ZMI foram iguais a 2.005, 2.239, 1.936 e 2.113 kW (1,6, 2,5, 2,4 e 2,2%).

Figura 21 – Potencial de economia de energia (PEE) calculado comparando o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP) com os manejos convencional (MC1, MC2 e MC3) e em zonas de manejo (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



No PivoBHALPA (Figura 21B), no AC, observa-se que o emprego da IP em relação ao MC1, resultou em economia de energia em todas as condições, sendo que na DS1 e na DS4 foram observados os maiores PEEs, respectivamente, iguais a 26.606 e 27.387 kW de energia, correspondendo a 25,3 e 18,3% do consumo total de energia no ciclo da soja com a IP. Nas outras datas de semeadura os PEEs foram menores. Na DS2, foi observado PEE de 7.570 kW (6,1%) e, na DS3, de 14.231 kW (10,7%). Em relação ao MC2, o maior PEE foi observado na DS3, com PEE da ordem de 4.592 kW (3,5%). Na DS1, DS2 e DS4, respectivamente, os PEEs foram iguais a 1.711, 3.532 e 2.282 kW (1,6, 2,8 e 1,5%). Com relação ao MC3, o maior PEE observado foi igual a 69 kW (0,1%), ocorrido na DS1. Na demais datas de semeaduras, os PEEs foram inexistentes. Os menores valores de PEEs, foram observados na comparação do IP com a ZMI, principalmente, em relação ao MC1 e MC2. Considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, os PEEs em relação a ZMI foram iguais a 1.554, 3.382, 4.452 e 690 kW (1,5, 2,7, 3,4 e 0,5%).

No AS, em relação ao MC1, foram verificados PEE em todas as condições, sendo que na DS2 e na DS4 foram observados os maiores valores, respectivamente, iguais a 22.693 e 28.391 kW de energia, correspondendo a 14,2 e 17,9% do consumo total de energia no ciclo da soja com a IP. Na DS1, observou-se PEE igual a 15.100 kW (7,1%) e, na DS3, igual a 16.123 kW (10,2%). Em relação MC2, os maiores valores de PEEs ocorreram na DS2 e na DS1, respectivamente, iguais a 5.254 e 1.131 kW (3,3 e 0,5%). Nas DS3 e DS4, o uso da IP não resultou em PEE. Com relação ao MC3, os maiores PEEs observados foram iguais a 5.445 e 1.131 kW (3,4 e 0,5%), respectivamente, na DS4 e DS1. Na DS2, observou-se PEE igual a 118 kW (0,1%) e, na DS3, não apresentou PEE. Os PEEs em relação a ZMI, considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, foram iguais a 6.298, 3.741, 1.105 e 1.614 kW (3,0, 2,3, 0,7 e 1,0%).

No PivoBHBV, os PEEs médios em relação as estratégias de manejo de irrigação, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram iguais a 4.336, 3.019, 1.651 e 856 kW (6,0, 4,0, 2,3 e 1,1%), no AC, e iguais a 3.901, 4.457, 2.767 e 2.073 kW (4,1, 4,8, 2,5 e 2,2%), no AS. No PivoBHALPA, os PEEs médios, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram de 18.948, 3.278, 69 e 2.520 kW (15,1, 2,6, 0,1 e 2,0%), no AC, e de 20.577, 2.185, 3.288 e 3.189 kW (12,3, 1,3, 2,0 e 1,8%), no AS.

A energia requerida simulada com o uso da IP e ZMI, apesar da pouca variação da lâmina entre uma zona e outra, apresentaram comportamentos e valores simulados próximos,

com PEEs, na maioria das vezes, próximo de zero e menor que das estratégias de MC, indicando o potencial do uso de ZMI de reduzir a variabilidade espacial da área irrigada.

Considerando o PEE médio por ano, observa-se que no AS têm-se maior PEE comparado ao AC, uma vez que o uso de água no AS é maior em todas as estratégias de manejo e potencializado nas estratégias MC. No PivoBHBV, o PEE médio foi igual a 3.002 kW (4,1%), no AC, e a 3.709 kW (3,8%), no AS. No PivoBHALPA, o PEE médio foi igual a 7.432 kW (5,9%), no AC, e de 8.683 kW (5,2%), no AS.

Comparando os dois pivôs analisados neste estudo, observou-se que a IP expressou maior PEE no PivoBHALPA, devido a maior variabilidade espacial das características do solo. No PivoBHALPA foi verificado um PEE 2,5 vezes maior que no PivoBHBV, durante o AC, e de 2,3 vezes, durante o AS.

Em estudos realizados por Yari *et al.* (2017), constatou-se economia de energia de 18% foi alcançada utilizando o manejo da irrigação de precisão comparada ao manejo de irrigação convencional.

5.4.8. Produtividade

Na IP, por utilizar o valor real de AD de cada pixel, considerando cada pixel como uma unidade de manejo, é aplicado o requerimento de água real demandado pela cultura, com isso a produtividade alcançada em todos os pixels foi igual a produtividade potencial média, estimada em 4.200 kg ha⁻¹. No caso do manejo de irrigação por ZMI, embora se considere regiões homogêneas como unidade de manejo, assemelhando-se com a IP, ainda assim vão existir pixels recebendo quantidades maiores ou menores que a ideal, podendo resultar em redução na produtividade da cultura. Quando se utiliza o MC, já que o manejo é conduzido considerando um único valor de AD, a produtividade na área irrigada é menor e desuniforme.

Na Tabela 10 estão apresentados os valores médios de produtividade estimadas para o manejo de irrigação IP, ZMI e MC, nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Analisando a Figura 10 observa-se que, no PivoBHBV, os menores valores de produtividade média ocorreram no MC3, sendo, no AC, igual a 3723 kg ha⁻¹, e, AS, igual a 3860 kg ha⁻¹. As menores diferenças de produtividade média foram observadas entre os manejos ZMI e IP, sendo igual a 13 kg ha⁻¹, no AC, e a 12 kg ha⁻¹, no AS. Verifica-se que, no MC1, a produtividade média no AS foi 0,50% menor que a produtividade média no AC, enquanto, nos

MC1 e MC3, foram 1,7 e 3,6% maiores que a produtividade média no AC, respectivamente. No ZMI, observou-se valores médios de produtividades semelhantes entre um ano e outro.

Tabela 10 – Valores médios de produtividade (kg ha⁻¹), considerando as cinco estratégias de manejo (MC1, MC2, MC3, IP e ZMI), nas quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Ano	Data de Semeadura	PivoBHBV (kg ha ⁻¹)					PivoBHALPA (kg ha ⁻¹)				
		MC1	MC2	MC3	IP	ZMI	MC1	MC2	MC3	IP	ZMI
Chuvoso (AC)	DS1	4037	3929	3936	4200	4152	4200	4025	3160	4200	4199
	DS2	4178	4192	4073	4200	4200	4191	4168	3146	4200	4199
	DS3	4188	4138	3205	4200	4200	4200	4181	3400	4200	4199
	DS4	4139	4074	3677	4200	4194	4200	4061	3678	4200	4168
	Média	4136	4083	3723	4200	4187	4198	4109	3346	4200	4191
Seco (AS)	DS1	4183	4190	4200	4200	4200	4200	4054	3992	4200	4200
	DS2	4040	4200	3784	4200	4200	4200	4141	3865	4200	4199
	DS3	4092	4113	3572	4200	4150	4174	3992	3520	4200	4160
	DS4	4147	4109	3884	4200	4200	4200	3910	4151	4200	4058
	Média	4116	4153	3860	4200	4188	4194	4024	3882	4200	4154

*MC1 = manejo convencional com base no menor valor de água disponível no solo; MC2 = manejo convencional com base no valor médio de água disponível no solo; MC3 = manejo convencional com base no maior valor de água disponível no solo; IP = irrigação de precisão; e, ZMI = zonas de manejo de irrigação.

Um comportamento semelhante pode ser observado no caso do PivoBHALPA, onde o menor valor médio da produtividade foi observado no AC, no MC3, igual a 3346 kg ha⁻¹. No PivoBHALPA, o maior impacto na produtividade média observado entre um ano e outro, também ocorreu no MC3, sendo que no AS foi 13,8% maior que a produtividade média no AC. No MC1, MC2 e ZMI, respectivamente, a produtividade média no AS foi 0,1, 2,1 e 0,9% menor que no AC.

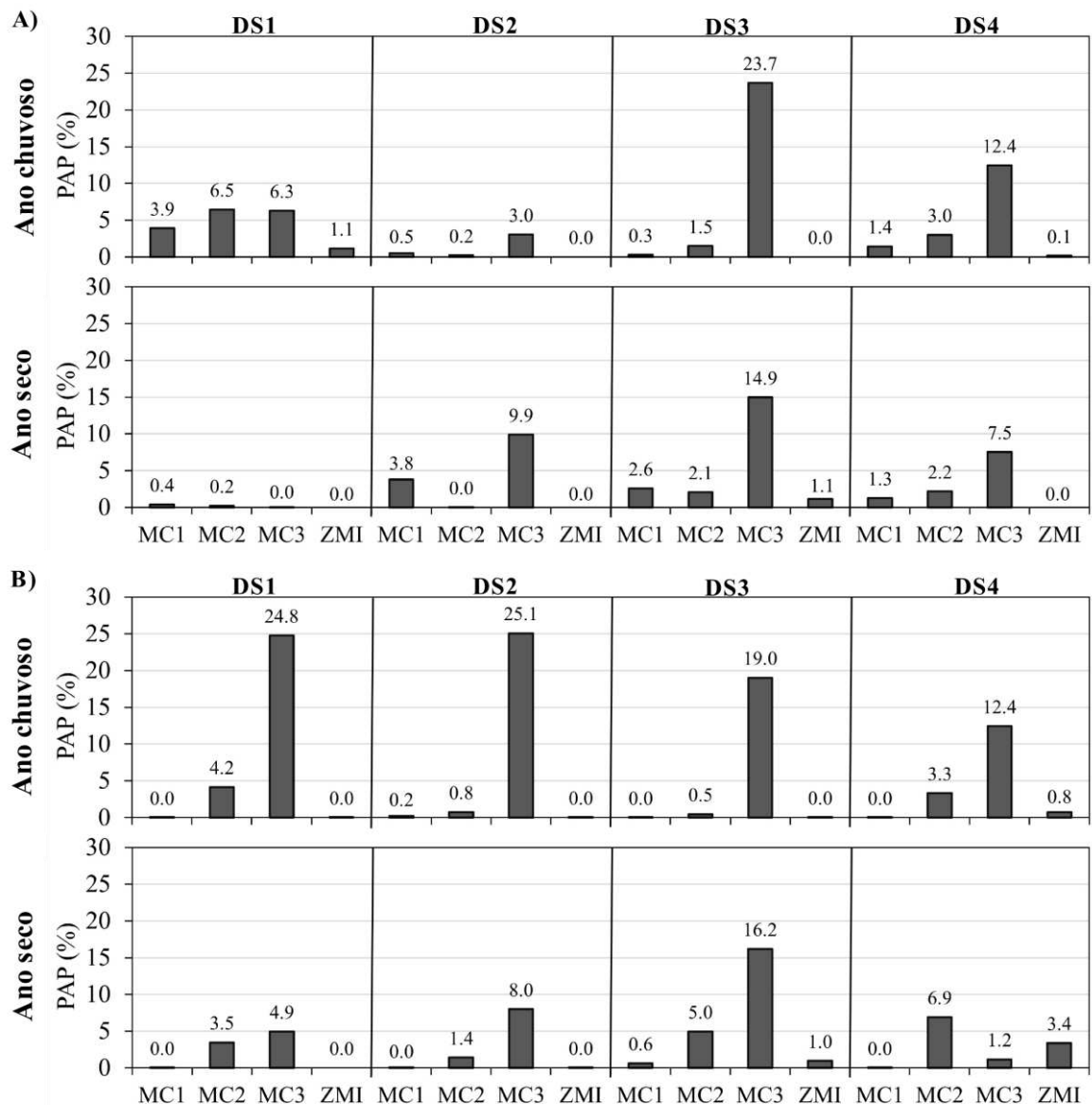
Em relação ao manejo adotado, observa-se que a produtividade média no IP se aproximou mais dos valores obtidos no MC1 e ZMI. Os menores valores foram observados no MC3. Considerando-se os dois pivôs, observa-se que a produtividade média no PivoBHALPA é cerca de 1,4% menor que no PivoBHBV, no AC, e 0,30% no AS.

A diferença na produtividade observada entre os anos AC e AS, para um mesmo MC, é muito pequena e se deve a uma combinação de fatores que podem contribuir para a redução da ETa. Por exemplo, no modelo MSEI, a irrigação é realizada sempre que a ETa acumulada no período for maior que o déficit de manejo permitido. Pode acontecer, por exemplo, de em um determinado dia a ETa acumulada estar bem próxima do déficit, ou seja, a diferença entre déficit e ETa acumulada, embora ainda positiva, é bem pequena. No dia seguinte, com a

contabilização da ETa, o valor da ETa acumulada se torna maior que o valor do déficit, reduzindo o valor da ETa e, conseqüentemente, a produtividade.

Na Figura 22 apresenta-se os valores de potencial de aumento de produtividade da cultura da soja calculado comparando-se o total produzido simulado com manejo da irrigação em condições de IP com os totais produzidos simulados com os MCs e com ZMI, para quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

Figura 22 – Potencial de aumento de produtividade (PAP) calculado comparando-se o manejo da irrigação em condições de irrigação de precisão (IP) com os manejos convencional (MC1, MC2 e MC3) e em zonas de manejo (ZMI), para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), em um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV e B) PivoBHALPA.



No PivoBHBV (Figura 22A), dentre todas as condições avaliadas, a única que não apresentou PAP foi a DS1, no AS. No AC, com exceção de DS1, os maiores valores de PAP foram observados no MC3. Na comparação do manejo IP com o MC3, os potenciais de aumento de produtividade observados nas DS1, DS2, DS3 e DS4 foram, respectivamente, iguais a 6,3% (264,0 kg ha⁻¹), 3,0% (127,2 kg ha⁻¹), 23,7% (994,7 kg ha⁻¹) e a 12,4% (522,9 kg ha⁻¹). Avaliando a estratégia MC1, os maiores valores de PAP, obtidos devido ao uso IP, foram iguais a 3,9% (162,9 kg ha⁻¹), na DS1, e de 1,4% (60,6 kg ha⁻¹), na DS4. Na DS2, observou-se PAP de 0,5% (22,3 kg ha⁻¹) e, na DS3, de 0,3% (11,9 kg ha⁻¹). Em relação ao MC2, observou-se valores de PAP nas DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, iguais a 6,5% (271,2 kg ha⁻¹), 0,2% (8,2 kg ha⁻¹), 1,5% (61,8 kg ha⁻¹) e 3,0% (126,3 kg ha⁻¹). Na comparação do manejo IP com a ZMI, observou-se baixos valores de PAP. No AC, somente nas DS1 e DS4 foram observados valores de PAP acima de zero, sendo, respectivamente, iguais a 1,1% (48,0 kg ha⁻¹) e 0,1% (5,7 kg ha⁻¹).

No AS, os maiores valores de PAP observados na comparação do IP com o MC1, foram iguais a 3,8% (159,8 kg ha⁻¹), na DS2, a 2,6% (108,5 kg ha⁻¹), na DS3, e a 1,3% (53,2 kg ha⁻¹), na DS4. Na DS1, observou-se valor de PAP igual a 0,4% (16,5 kg ha⁻¹). Em relação ao MC2, os maiores valores de PAP foram iguais a 2,1% (86,6 kg ha⁻¹), na DS3, e de 2,2% (91,0 kg ha⁻¹), na DS4. Na DS1, observou-se valor de PAP igual a 0,2% (10,1 kg ha⁻¹) e, na DS2, não resultou em PAP. Os maiores valores de PAP, no AS, também foram observados na comparação do IP com o MC3. Com relação ao MC3, os valores de PAP observados nas DS2, DS3 e DS4 foram, respectivamente, de 9,9% (415,7 kg ha⁻¹), 14,9% (627,8 kg ha⁻¹) e 7,5% (316,2 kg ha⁻¹). O uso do manejo baseado nas condições de IP comparado a ZMI, resultou em PAP acima de zero, somente, na DS3, com valor de PAP igual a 1,1% (48,0 kg ha⁻¹).

No PivoBHALPA (Figura 22B), com relação ao MC1, tanto no AC quanto no AS, observou-se valores de PAP muito pequenos, indicando um baixo potencial para aumentar a produtividade quando se usa essa estratégia. No AC, nas demais estratégias de manejo, principalmente na MC3, o uso da IP proporcionou altos potenciais de aumento de produtividade. No caso do MC3, nas DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, os valores de PAP foram iguais a 24,8% (1.040,4 kg ha⁻¹), 25,1% (1.053,7 kg ha⁻¹), 19,0% (799,5 kg ha⁻¹) e 12,4% (522,2 kg ha⁻¹).

Na comparação entre o manejo de IP e o MC1, observou-se valor de PAP maior que zero apenas na DS2, com valor igual a 0,2% (8,9 kg ha⁻¹). Em relação ao MC2, os valores mais expressivos de PAP foram observados nas DS1 e DS4, sendo iguais a 4,2% (175,2 kg ha⁻¹) e 3,3% (139,4 kg ha⁻¹). Na DS2 e DS3, respectivamente, observou-se valores de PAP iguais a

0,8% (31,5 kg ha⁻¹) e 0,5% (19,4 kg ha⁻¹). Na comparação entre o manejo de IP e a ZMI, observou-se valor de PAP acima de zero, somente, na DS4, com valor igual a 0,8% (31,6 kg ha⁻¹).

No AS, na comparação entre o manejo de IP e o MC1, observou-se valor de PAP acima de zero, somente, na DS3, com valor igual a 0,6% (26,2 kg ha⁻¹). Com relação ao MC2, os valores de PAP, nas DS1, DS2, DS3 e DS4 foram, respectivamente, iguais a 3,5% (146,2 kg ha⁻¹), 1,4% (59,4 kg ha⁻¹), 5,0% (208,1 kg ha⁻¹) e 6,9% (290,3 kg ha⁻¹). Os maiores valores de PAP, durante o AS, também foram observados no MC3, cujos valores nas DS1, DS2, DS3 e DS4 foram, respectivamente, iguais a 4,9% (207,7 kg ha⁻¹), 8,0% (335,2 kg ha⁻¹), 16,2% (680,0 kg ha⁻¹) e 1,2% (49,3 kg ha⁻¹). Na comparação entre o manejo de IP e a ZMI, observou-se valor de PAP acima de zero, somente, na DS3 e DS4, com valores iguais a 1,0% (40,1 kg ha⁻¹) e 3,4% (142,3 kg ha⁻¹), respectivamente.

No PivoBHBV, os PAPs obtidos devido ao uso da IP, considerando as estratégias MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram da ordem de 1,5, 2,8, 11,4 e 0,6% (64,5, 116,9, 477,2 e 26,8 kg ha⁻¹), no AC, e de 2,0, 1,1, 8,1 e 1,1% (84,5, 47,0, 340,0 e 48,0 kg ha⁻¹), no AS. No PivoBHALPA, foram da ordem de 0,2, 2,2, 20,3 e 0,8% (8,9, 91,4, 854,0 e 31,6 kg ha⁻¹), no AC, 0,6, 4,2, 7,6 e 2,2% (26,2, 176,0, 318,1 e 91,2 kg ha⁻¹), no AS.

Considerando o PAP médio por ano, observa-se que no AC têm-se maior PAP comparado ao AS, uma vez que no AC se tem uma maior contribuição da água das chuvas. No PivoBHBV, o PAP médio foi igual a 5,2% (219,5 kg ha⁻¹), no AC, e a 3,7% (157,2 kg ha⁻¹), no AS, correspondendo, respectivamente, a 20,4 e 14,6 toneladas. No PivoBHALPA, o PAP médio foi igual a 7,6% (318,1 kg ha⁻¹), no AC, e de 4,1% (173,4 kg ha⁻¹), no AS, correspondendo, respectivamente, a 40,3 e 22,0 toneladas.

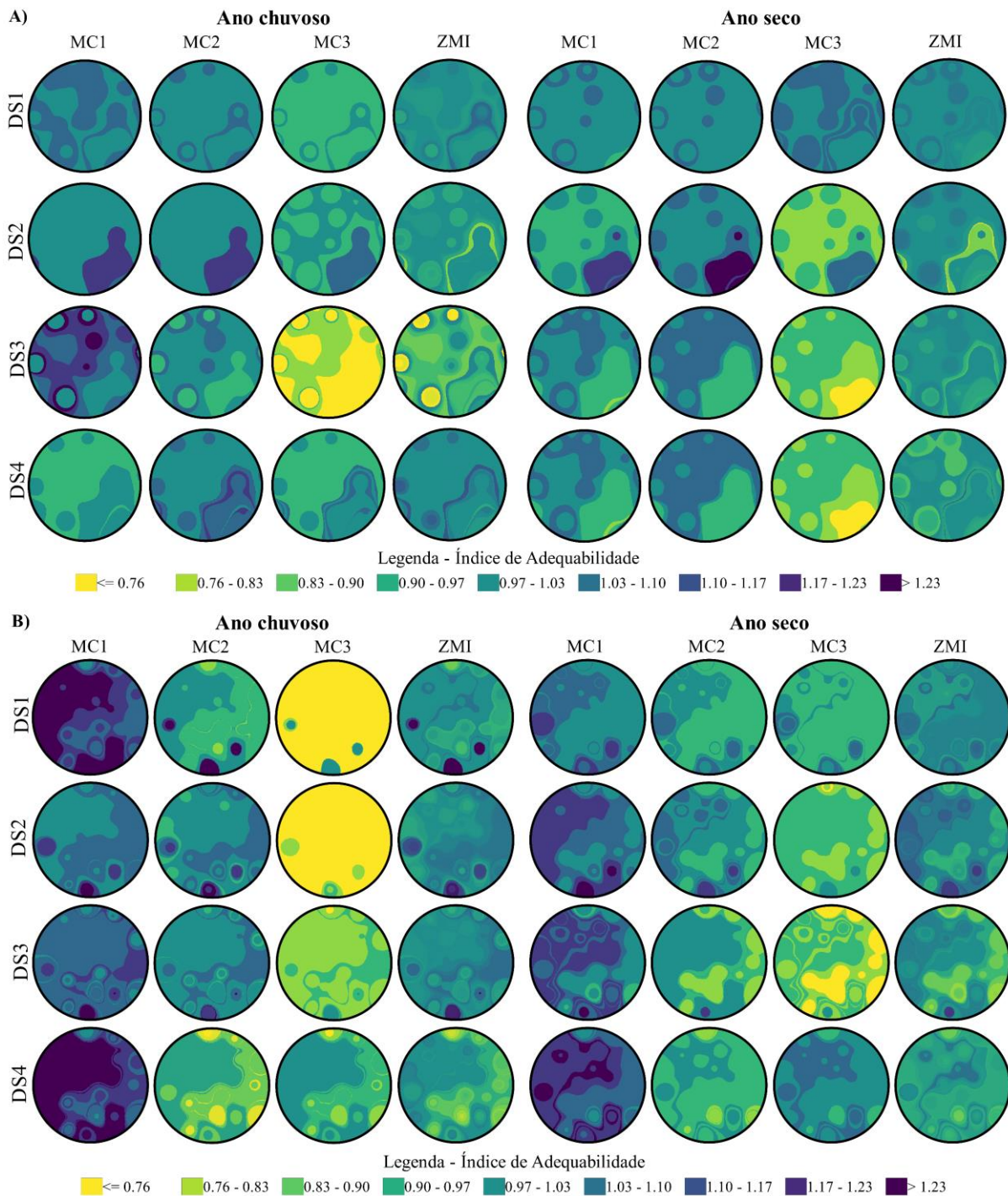
Comparando os dois pivôs analisados neste estudo, observou-se que a IP expressou maior PAP no PivoBHALPA, devido a maior extensão da área de estudo combinado a maior variabilidade espacial das características do solo. No PivoBHALPA foi verificado um PAP 1,9 vezes maior que no PivoBHBV, durante o AC, e de 1,5 vezes, durante o AS.

5.5. Índice de adequabilidade da irrigação

O Índice de adequabilidade da irrigação é um critério interessante de ser analisado, pois ele possibilita identificar quão bem uma meta preestabelecida foi atingida. No caso deste trabalho, o IA foi calculado comparando-se, em cada pixel, a lâmina de irrigação aplicada nos

manejos MC e ZMI com a lâmina de irrigação aplicada no IP. Os valores de IA são apresentados na Figura 23.

Figura 23 – Valores dos índices de adequabilidade da irrigação calculados para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), considerando um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV; B) PivoBHALPA.



Observa-se que, para os dois pivôs centrais estudados, os valores de IA mais próximos da meta ($IA = 1,0$) foram obtidos com o uso de ZMI. No PivoBHBV, considerando a estratégia ZMI, no AC, observou-se IA, em média, variou de 0,90 a 1,20, e, no AS, de 0,90 a 1,15. No PivoBHALPA, no AC, a variação foi de 0,88 a 1,30, e, no AS, de 0,90 a 1,15. Considerando as estratégias de MC no PivoBHBV, no AC, o IA variou, em média, de 0,95 a 1,25 (MC1), 0,95 a 1,23 (MC2) e 0,85 a 1,10 (MC3), e no AS, de 0,88 a 1,18 (MC1), 0,91 a 1,22 (MC2) e 0,83 a 1,10 (MC3). Enquanto no PivoBHALPA, no AC, esta variação foi de 1,00 a 1,53 (MC1), 0,83 a 1,30 (MC2) e 0,65 a 1,00 (MC3), e no AS, de 0,95 a 1,30 (MC1), 0,80 a 1,15 (MC2) e 0,80 a 1,10 (MC3).

Dentre as estratégias de MC, embora seja observado em todas as condições avaliadas, áreas com aplicação de lâmina total deficitária e excessiva, verificou-se que, para os dois pivôs centrais estudados, os valores de IA mais próximos da meta foram obtidos com o uso do MC2, mas, ainda assim, em menores proporções, quando comparado com a ZMI. Enquanto com o uso do MC1 e MC3 é verificado, na maioria dos pontos, a simulação de lâmina de irrigação excedente ($IA > 1,0$) e deficitária ($IA < 1,0$), respectivamente.

Analisando os valores médios de IA observados no PivoBHBV (Figura 23A), pelas diferentes estratégias de manejo de irrigação, considerando as diferentes datas de semeadura, no AC, observou-se que, em relação ao MC1 o maior valor médio de IA ocorreu na DS3, e o menor ocorreu na DS4, cujos valores foram iguais a 1,13 e 0,94, respectivamente. Na DS1 e DS2, aconteceu comportamento semelhante a DS3, cujos valores de IA médios observados foram iguais a 1,06 e 1,04. Já na DS4, houve uma tendência de ocorrência de irrigação deficitária, justificada pela menor frequência de irrigação.

Em relação ao MC2, os valores médios de IA acima de 1,0 foram observados na DS1, DS2 e DS4 (1,02, 1,04 e 1,05), e valor médio de IA abaixo de 1,0 foi observado na DS3 (0,99). Em relação ao MC3, em todas as datas de semeadura foram observados valores médios de IA abaixo de 1,0 (DS1= 0,92; DS2= 0,97; DS3= 0,75; e DS4= 0,95), indicando irrigação deficitária. Em relação a ZMI, observa-se que os valores foram mais próximos de 1,0 (DS1= 1,0; DS2= 0,98; DS3= 1,0; e DS4= 1,02), quando comparados com as estratégias de MC na mesma DS.

No AS, em relação ao MC1, observou-se valores médios de IA acima de 1,0 na DS1 e DS4 (1,01 e 1,07), valor médio igual a 1,0 na DS3, e valor abaixo de 1,0 na DS2 (0,98). Em relação ao MC2, em todas as datas de semeadura foram observados valores médios de IA acima de 1,0 (DS1= 1,01; DS2= 1,07; DS3= 1,03; e DS4= 1,02). Em relação ao MC3, observou-se valor médio de IA acima de 1,0 na DS1 (1,05) e valores abaixo de 1,0 na DS2, DS3 e DS4

(0,88, 0,85 e 0,92). EM relação a ZMI, comparado com as estratégias de MC na mesma DS, os valores médios de IA foram mais próximos de 1,0 (DS1= 1,0; DS2= 0,98; DS3= 0,98; e DS4= 0,97).

No PivoBHALPA (Figura 23B), em relação ao MC1, observou-se que em todas as datas de semeadura obteve-se valores médios de IA acima de 1,0 (DS1= 1,25; DS2= 1,06; DS3= 1,11; e DS4= 1,24). Em relação ao MC2, os valores médios de IA acima de 1,0 foram observados na DS2 e DS3 (1,03 e 1,02), e valores médios de IA abaixo de 1,0 foi observado na DS1 e DS4 (0,96 e 0,94). Em relação ao MC3, em todas as datas de semeadura foram observados valores médios de IA abaixo de 1,0 (DS1= 0,69; DS2= 0,70; DS3= 0,83; e DS4= 0,94), indicando irrigação deficitária. Em relação a ZMI, observa-se que os valores foram mais próximos de 1,0 (DS1= 1,0; DS2= 1,02; DS3= 1,02; e DS4= 0,95), quando comparados com as estratégias de MC na mesma DS.

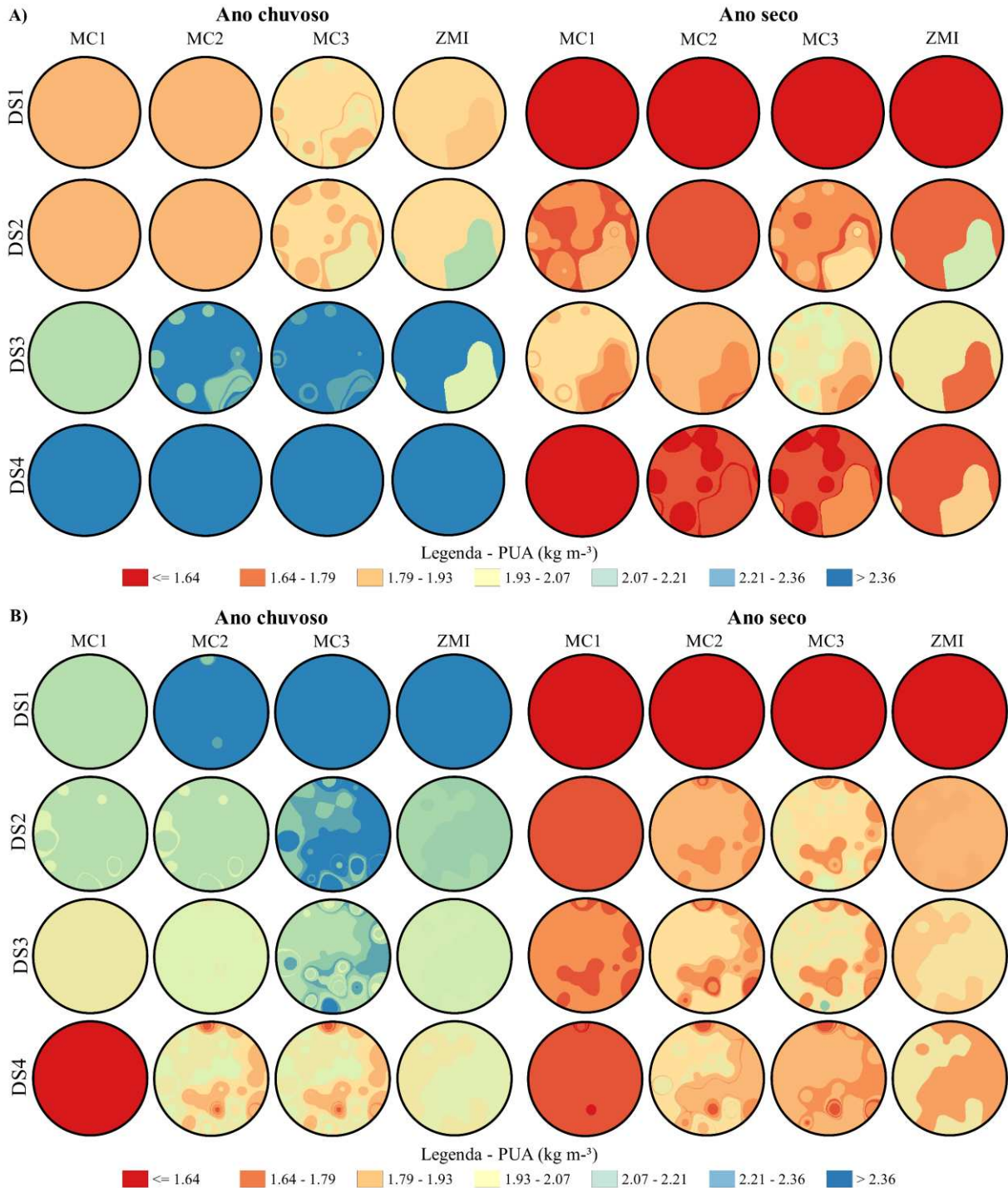
No AS, em relação ao MC1, também observou-se que em todas as datas de semeadura obteve-se valores acima de 1,0 (DS1= 1,05; DS2= 1,12; DS3= 1,11; e DS4= 1,17). Em relação ao MC2, foram observados valores médios de IA abaixo de 1,0 na DS1, DS3 e DS4 (0,95, 0,94 e 0,92), e valor médio igual a 1,0 na DS2. Em relação ao MC3, observou-se valores abaixo de 1,0 na DS1, DS2 e DS3 (0,93, 0,88 e 0,82) e valor acima de 1,0 apenas na DS4 (1,03). Em relação a ZMI, comparado com as estratégias de MC na mesma DS, os valores médios de IA foram mais próximos de 1,0 (DS1= 1,02; DS2= 1,03; DS3= 0,97; e DS4= 0,97).

No PivoBHBV, os IAs médios em relação as estratégias de manejo de irrigação, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram iguais a 1,04, 1,02, 0,90 e 1,00, no AC, e iguais a 1,01, 1,03, 0,92 e 0,99, no AS. No PivoBHALPA, os IAs médios, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram iguais a 1,17, 0,99, 0,79 e 1,00, no AC, e iguais a 1,11, 0,95, 0,91 e 0,99, no AS. Como era de se esperar, observa-se uma maior variabilidade nos valores de IA no pivô PivoBHALPA.

5.6. Produtividade de uso da água de irrigação

Na Figura 24 apresenta-se os mapas referentes à produtividade de uso da água de irrigação no MC e ZMI, para quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco. A PUA representa a quantidade produzida por volume de irrigação utilizado. Quanto mais se produzir com uma menor quantidade de água, maior será esse indicador. Em virtude deste fato, é natural que o PUA seja maior nos anos chuvosos.

Figura 24 – Produtividade de uso da água de irrigação (kg m^{-3}) calculado para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), considerando um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV; B) PivoBHALPA.



Analisando os valores médios de PUA observado no PivoBHBV (Figura 24A), no AC, nas diferentes estratégias de manejo de irrigação, considerando as diferentes datas de semeadura, observou-se que os maiores valores médios de PUA ocorreram, respectivamente, na DS4 e DS3. Os valores médios de PUA, considerando os MC1, MC2, MC3 e ZMI,

respectivamente, foram iguais a 2,80, 2,60, 2,74 e 2,80 kg m⁻³, na DS4, e iguais a 2,20, 2,45, 2,63 e 2,50 kg m⁻³, na DS3. Na DS1 e DS2, foram observados os menores valores médios de PUA, cujo valor, para todas as estratégias, foi igual a 1,80 kg m⁻³, com exceção do MC3, onde os PUAs médios foram iguais a 1,90 kg m⁻³, na DS1, e a 1,89 kg m⁻³, na DS2.

No AS, observou-se que os maiores valores médios de PUA ocorreram, respectivamente, na DS3 e DS2. Os valores médios de PUA, considerando os MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, na DS3, foram iguais a 1,84, 1,77, 1,95 e 1,85 kg m⁻³, e na DS2, iguais a 1,69, 1,60, 1,75 e 1,70 kg m⁻³. Os menores valores de PUA foram observados na DS1, sendo o valor médio, considerando todas as estratégias, igual a 1,20 kg m⁻³. Na DS4, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, os valores médios de PUA foram da ordem de 1,48, 1,55, 1,58 e 1,60 kg m⁻³.

No PivoBHALPA (Figura 24B), os maiores valores médios de PUA, no AC, ocorreram na DS1 e na DS2. Considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, os valores médios de PUA, na DS1, foram iguais a 2,20, 2,69, 2,90 e 2,74 kg m⁻³, e na DS2, iguais a 2,19, 2,19, 2,46 e 2,20 kg m⁻³. Na DS3, os valores médios de PUA foram da ordem de 2,00, 2,10, 2,25 e 2,15 kg m⁻³, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente. Os menores valores médios de PUA foram observados na DS4, sendo, no MC1 igual a 1,50 kg m⁻³, no MC2 e MC3 a 1,95 kg m⁻³, e na ZMI igual a 2,06 kg m⁻³.

No AS, observou-se que os maiores valores médios de PUA ocorreram, respectivamente, na DS3 e na DS4. Considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, os valores médios de PUA, na DS3, foram iguais a 1,68, 1,83, 1,90 e 1,90 kg m⁻³, e na DS4, iguais a 1,60, 1,85, 1,77 e 1,94 kg m⁻³. Na DS2, os valores de médios de PUA foram da ordem de 1,60, 1,77, 1,89 e 1,80 kg m⁻³, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente. Os menores valores médios de PUA foram observados na DS1, sendo, no MC1 igual a 1,30 kg m⁻³, no MC2 a 1,34 kg m⁻³, no MC3 a 1,35 kg m⁻³, e na ZMI igual a 1,35 kg m⁻³.

No PivoBHBV, os valores médios de PUA em relação as estratégias de manejo de irrigação, considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram iguais a 2,15, 2,16, 2,29 e 2,17 kg m⁻³, no AC, e iguais a 1,55, 1,53, 1,65 e 1,56 kg m⁻³, no AS. No PivoBHALPA, foram, respectivamente, iguais a 1,97, 2,23, 2,39 e 2,30 kg m⁻³, no AC, e iguais a 1,54, 1,70, 1,72 e 1,74 kg m⁻³, no AS. Dentre as estratégias de MC, o MC3 apresentou os maiores valores médios de PUA, indicando que a redução da lâmina de irrigação compensou a queda na produtividade. A utilização de ZMI, se mostrou uma alternativa promissora, principalmente quando comparado com o MC1 e MC2, na qual obtiveram valores médio de PUA abaixo dos obtidos pela ZMI. A maior uniformidade nos valores de PUA foi observada com o uso de ZMI.

Comparando os dois anos analisados, observa-se que no AC obteve-se maiores valores PUAs. Isto ocorre pelo fato de que a quantidade de chuva no AC foi 35,6% maior do que no AS, no PivoBHBV, e 44,5%, no PivoBHALPA, contribuindo para reduzir a lâmina de irrigação, sem afetar a quantidade produzida. Os valores médios de PUA observados, no AC, para o PivoBHBV e o PivoBHALPA, foram, respectivamente, iguais a 2,19 e 2,20 kg m⁻³, enquanto, no AS, foram iguais a 1,56 e 1,66 kg m⁻³. Observou-se no AC, tanto em magnitude quanto espacialmente, menores variações nos valores de PUA, quando comparado ao AS.

Observou-se no PivoBHALPA que, via de regra, a produtividade de uso da água de irrigação foi mais elevada, embora seja observado também maiores variações nos valores de PUA entre as datas de semeadura e entre as estratégias de manejo de irrigação; já no PivoBHBV esta variação foi maior entre as datas de semeadura.

5.7. Análise econômica

O custo médio de produção de soja obtido junto a Conab (2019) para a região de Brasília-DF (PivoBHBV) e de São Paulo-SP (PivoBHALPA) está apresentado na Tabela 11. Os custos médio de produção, para o ano de 2019, para o PivoBHBV e para o PivoBHALPA foram iguais a 3.960,64 e 3.740,07 R\$ ha⁻¹, respectivamente.

Tabela 11 – Custo médio de produção da cultura de soja para a região de Brasília-DF (PivoBHBV) e de São Paulo (PivoBHALPA).

Discriminação	PivoBHBV		PivoBHALPA	
	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Participação (%)	Custo (R\$ ha ⁻¹)	Participação (%)
I - Despesas de custeio da lavoura				
1 - Operação com máquinas	331,71	8,38	226,61	6,06
2 - Mão-de-obra	-	-	29,12	0,78
3 - Administrador	24,00	0,61	49,00	1,31
4 - Sementes	525,00	13,26	357,00	9,55
5 - Fertilizantes	865,05	21,84	680,40	18,19
6 - Defensivos agrícolas	827,78	20,90	694,70	18,57
7 - Demais despesas	-	-	102,15	2,73
Total (A)	2573,54	64,99	2138,98	57,19
II - Outras despesas				
8 - Transporte externo	0,90	0,02	105,30	2,82
9 - Despesas administrativas	77,21	1,95	61,10	1,63
10 - Seguro da produção	77,21	1,95	142,58	3,81
11 - Assistência técnica	-	-	40,74	1,09
12 - CESSR	61,20	1,55	66,40	1,78

Total (B)	216,52	5,47	416,12	11,13
III - Despesas financeiras				
13 - Juros do financiamento	108,52	2,74	96,39	2,58
Total (C)	108,52	2,74	96,39	2,58
Custo variável (A+B+C=D)	2898,58	73,20	2651,49	70,90
IV - Depreciações				
14 - Depreciação de benfeitorias/instalações	296,30	7,48	284,31	7,60
15 - Depreciação de implementos	104,87	2,65	104,59	2,80
16 - Depreciação de máquinas	134,58	3,40	93,54	2,50
Total (E)	535,75	13,53	482,44	12,9
V - Outros custos fixos				
17 - Manutenção periódica benfeitorias/instalações	2,37	0,06	12,79	0,34
18 - Encargos sociais	10,94	0,28	22,34	0,6
19 - Seguro do capital fixo	13,80	0,35	11,73	0,31
Total (F)	27,11	0,69	46,86	1,25
Custo fixo (E+F=G)	562,86	14,22	529,30	14,15
Custo operacional (D+G=H)	3461,44	87,42	3180,79	85,05
VI - Renda de fatores				
20 - Remuneração esperada sobre o capital fixo	113,57	2,87	96,53	2,58
21 - Terra própria	385,63	9,74	462,75	12,37
Total (I)	499,2	12,61	559,28	14,95
CUSTO TOTAL (H+I=J)	3960,64	100,00	3740,07	100,00

Fonte: Conab, 2019.

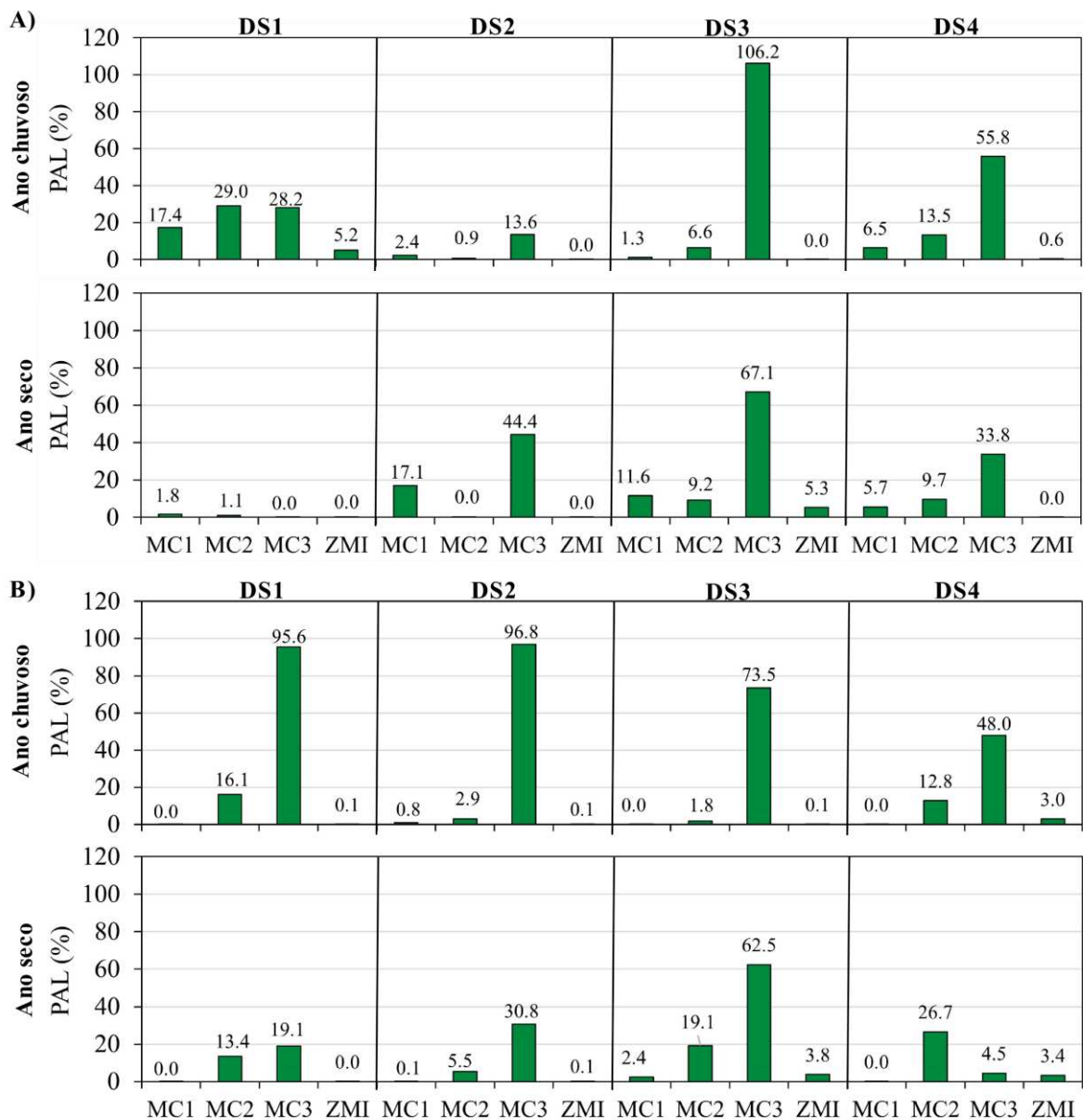
Na Figura 25 visualiza-se o potencial de aumento de lucratividade (PAL), alcançados com o uso da IP em relação ao MC e a ZMI, simulado para quatro datas de semeadura da cultura da soja, em um ano chuvoso e um ano seco.

No PivoBHBV (Figura 25A), no AC, em relação ao MC1, observa-se que os maiores potenciais para aumento de lucratividade com uso da IP foram verificados na DS1 e DS4, respectivamente, de 17,4 e 6,5% (R\$ 18.378,80 e R\$ 6.845,82). Na DS2, o PAL obtido foi de 2,4% (R\$ 2.522,27), e na DS3 foi de 1,3% (R\$ 1.353,13). Em relação ao MC2, os maiores PAL também foram verificados na DS1 e DS4, respectivamente, de 29,0 e 13,5% (R\$ 30.601,39 e R\$ 14.247,49). Na DS2, o PAL obtido foi de 0,9% (R\$ 933,24) e na DS3 foi de 6,6% (R\$ 6.970,68). Os maiores valores de PALs foram observados no MC3, o que pode ser explicado pelas perdas na produtividade da cultura observadas nessa estratégia de manejo.

Os PALs observados em relação ao MC3 foram iguais a 106,2% (R\$ 112.229,35), na DS3, e, iguais a 28,2, 13,6 e 55,8% (R\$ 29.788,91, R\$ 14.354,64 e R\$ 58.996,99), nas DS1, DS2 e DS4, respectivamente. Os maiores percentuais de aumento de lucratividade observados

em relação ao MC3, principalmente na DS3, podem ser justificados em função da receita total que, neste caso específico, foi negativa (-6,2%), ou seja, o custo de produção foi maior de que a receita total gerada, com isso não se teve lucro e sim prejuízo. Em relação a ZMI, os PALs foram menos expressivos, quando comparados às estratégias de MC dentro da mesma data de semeadura. Na DS2 e na DS3, por exemplo, não ocorreram PALs. Na DS1 e na DS4, os PALs observados em relação a ZMI foram, respectivamente, iguais a 5,2 e 0,6% (R\$ 5.498,06 e R\$ 658,03).

Figura 25 – Potencial de aumento de lucratividade (PAL) calculado para quatro datas de semeadura da cultura da soja (DS1, DS2, DS3 e DS4), considerando um ano chuvoso e um ano seco. A) PivoBHBV; B) PivoBHALPA.



No AS, em relação ao MC1, os maiores valores de PALs foram observados na DS2 e na DS3, sendo, respectivamente, iguais a 17,1 e 11,6% (R\$ 18.028,26 e R\$ 12.238,31). Na DS1, o PAL obtido foi de 1,8% (R\$ 1.868,79), e, na DS4, foi de 5,7% (R\$ 6.014,55). Em relação ao MC2, os maiores PALs ocorreram na DS3 e na DS4, sendo, respectivamente, iguais a 9,2 e 9,7% (R\$ 9.769,63 e R\$ 10.276,82). Na DS1, o PAL obtido foi de 1,1% (R\$ 1.145,81) e de 0,04% (R\$ 43,38) na DS2. Os potenciais de aumento de lucratividade devido ao uso da IP no MC3, foram expressivos nas DS2, DS3 e DS4, respectivamente, com valores iguais a 44,4, 67,1 e 33,8% (R\$ 46.903,95, R\$ 70.830,40 e R\$ 35.673,46). No ZMI, apenas na DS3, observou-se PAL, com valores iguais a 5,3% (R\$ 5.625,21).

No PivoBHALPA (Figura 25B), no MC1, a produtividade da cultura se assemelha com a produtividade obtida com o uso da IP, com isso não houve redução significativa na receita total referente a adoção desta estratégia, resultando em valores PALs iguais ou muito próximos a zero. No AC, o PAL mais expressivos em relação ao MC1 foi observado na DS2, de 0,8% (R\$ 1.363,26). Na DS1, o PAL obtido foi igual a 0,02% (R\$ 32,91), na DS3, foi de 0,01% (R\$ 13,88) e, na DS4, igual a 0,02% (R\$ 28,07).

Em relação ao MC2, os maiores PALs ocorreram na DS1, com valor igual a 16,1% (R\$ 26.668,53), e, na DS4, igual a 12,8% (R\$ 21.221,13). Na DS2, o valor foi igual a 2,9% (R\$ 4.798,67) e, na DS3, igual a 1,8% (R\$ 2.954,49). Neste pivô, os maiores PALs também foram observados no MC3. Comparado ao MC3, o uso da IP apresentou PAL de 95,6, 96,8, 73,5 e 48,0% (R\$ 158.340,25, R\$ 160.359,50, R\$ 121.678,45 e R\$ 79.470,88), respectivamente, na DS1, DS2, DS3 e DS4. Em relação a ZMI, os PALs também foram menos expressivos, quando comparados às estratégias de MC dentro da mesma data de semeadura. Considerando a DS1, DS2, DS3 e DS4, respectivamente, os valores de PAL em relação a ZMI foram da ordem de 0,06, 0,07, 0,11 e 3,0% (R\$ 104,65, R\$ 116,65, R\$ 175,92 e R\$ 4.922,41).

No AS, em relação ao MC1, PAL mais expressivos foi observado na DS3, com valor igual a 2,4% (R\$ 4003,29). Na DS1, o PAL obtido foi de 0,05% (R\$ 80,07), na DS2 foi de 0,06% (R\$ 86,96) e na DS4 foi de 0,04% (R\$ 66,82). Em relação ao MC2, os maiores PALs foram observados na DS4, de 26,7% (R\$ 44.172,35), na DS3, de 19,1% (R\$ 31.659,82) e na DS1, de 13,4% (R\$ 22.252,57). Na DS2, o PAL foi igual a 5,5% (R\$ 9.039,39).

No MC3, o PAL foi bastante expressivos na DS3, que apresentou PAL na ordem 62,5% (R\$ 103.480,93). Neste caso específico, a receita total com o uso do MC3 foi muito próxima do custo de produção total, e, em consequência, o lucro foi muito abaixo do esperado. Considerando a DS2, DS1 e DS4, respectivamente, os PALs foram da ordem de 30,8, 19,1, e

4,5% (R\$ 51.000,87, R\$ 31.612,40 e R\$ 7.509,78). Em relação a ZMI, foram observados PAL na DS2, de 0,10% (R\$ 152,37), na DS3, de 3,8% (R\$ 6.240,37), e na DS4, de 3,4% (R\$ 5.655,31).

No PivoBHBV, o PAL médio considerando o MC1, MC2, MC3 e ZMI, respectivamente, foram iguais a 6,9, 12,5, 51,0 e 1,5% (R\$ 7.275,00, R\$ 13.188,20, R\$ 53.842,47 e R\$ 1.539,02), no AC, e iguais a 9,0, 5,0, 36,3 e 1,3% (R\$ 9.537,48, R\$ 5.308,91, R\$ 38.359,68 e R\$ 1.406,71), no AS. No PivoBHALPA, foram iguais a 0,2, 8,4, 78,5 e 0,8% (R\$ 359,53, R\$ 13.910,70, R\$ 129.962,27 e R\$ 1.329,91), no AC, e iguais a 0,6, 16,2, 29,2 e 1,8% (R\$ 1.059,29, R\$ 26.781,04, R\$ 48.400,99 e R\$ 3.012,39), no AS. Em relação as estratégias de MC, o MC3 apresentou o maior PAL, indicando que a redução na produtividade da cultura quando se utiliza o MC3 acarretou queda bastante expressiva na lucratividade.

Considerando os dois anos analisados, observa-se maiores valores de PAL no AC. No AC, tem-se uma maior contribuição da água das chuvas, o que contribui para reduzir a quantidade e a frequência de irrigação, impactando no gasto de energia, que é um dos maiores custos associados ao custo de produção total. No AS, aumenta-se a demanda e, por consequência, aumenta-se a quantidade e a frequência de irrigação. Os valores médios de PAL observados no AC foram iguais a 18,8% (R\$ 18.961,18) e 22,0% (R\$ 36.390,60), enquanto, no AS, foram iguais a 12,9% (R\$ 13.653,19) e 12,0% (R\$ 19.813,43), considerando o PivoBHBV e o PivoBHALPA, respectivamente.

Comparando os dois pivôs analisados neste estudo, observou-se um maior potencial de aumento de lucratividade devido ao uso da IP no PivoBHALPA, devido a maior variabilidade espacial das características do solo. No PivoBHALPA foi verificado um PAL 1,9 vezes maior que no PivoBHBV, durante o AC, e de 1,5 vezes, durante o AS.

Yari et al. (2017), comparando o uso da irrigação de precisão com o manejo de irrigação convencional, constataram, durante as safras de 2013 e 2014, uma redução de 15 e 21 % no custo de energia, e de 17% em 2015.

6. CONCLUSÕES

O potencial de economia de água com o uso da irrigação de precisão comparado ao manejo convencional, no PivoBHBV, foi de até 7,9% (AC) e 7,6% (AS), e no PivoBHALPA, foi de até 23,3% (AC) e 17,0% (AS).

O potencial de economia de energia com o uso da irrigação de precisão comparado ao manejo convencional, no PivoBHBV, foi de até 10,7% (AC) e 8,9% (AS), e no PivoBHALPA, foi de até 25,3% (AC) e 17,9% (AS).

O potencial de aumento de produtividade da cultura da soja com o uso da irrigação de precisão comparado ao manejo convencional, no PivoBHBV, foi de até 23,7% (AC) e 14,9% (AS), e no PivoBHALPA, foi de até 25,1% (AC) e 16,2% (AS).

Os resultados observados com uso de zonas de manejo de irrigação foram semelhantes aos obtidos pela irrigação de precisão.

O potencial de aumento de lucratividade da cultura da soja com o uso da irrigação de precisão, no PivoBHBV, foi de até 106,2% (AC) e 67,1% (AS), e no PivoBHALPA, foi de até 96,8% (AC) e 62,5% (AS).

O PivoBHALPA apresentou potenciais de economia de água e energia, no AC, cerca de 2,3 e 2,5, e, no AS, 1,6 e 2,3 vezes maior que no PivoBHBV. Os potenciais de aumento de produtividade e lucratividade foi cerca de 1,9 e 1,5 vezes maior no PivoBHALPA, no AC e no AS, respectivamente.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantificação dos benefícios potenciais advindo do uso da irrigação de precisão realizada neste estudo pode ser um grande incentivo para a implantação e utilização da irrigação de precisão como estratégia de manejo eficiente do uso da água de irrigação. Os benefícios aqui documentados, comparados com outras estratégias de manejo de irrigação e simulados para diversas condições, tanto na economia de água e energia quanto no aumento de produtividade da cultura, auxilia na melhor compreensão do uso de tecnologias na irrigação e amplia a visão sobre o uso da irrigação de precisão frente a nova era da agricultura 4.0.

Embora, nas condições estudadas, tenha-se verificado o potencial de economia de água e energia e aumento da produtividade da cultura, os reais potenciais da irrigação de precisão é muito específico do local. Este estudo foi limitado às condições de dois sistemas de irrigação por pivô central, portanto, é recomendado que pesquisas adicionais sejam realizadas em diferentes locais sob diferentes culturas para quantificar e destacar os benefícios e desafios da tecnologia de irrigação de precisão, de modo a complementar os resultados obtidos nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AL-KUFAISHI, S. A.; BLACKMORE, B. S.; SOURELL, H. The feasibility of using variable rate water application under a central pivot irrigation system. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 20, p. 317–327, 2006.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)**. Rome, Italy: FAO, 1998.
- ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N. The expansion of center-pivot irrigation in the cerrado biome. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 56–61, 2019.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ALVES, E. DA S. et al. IMPACTO DAS CONDIÇÕES DO CLIMA E DA PLANTA NA LÂMINA IRRIGADA. **V Inovagri International Meeting; XXVIII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem; I Simpósio Latino Americano de Salinidade.**, 2019.
- AMES, D. P. **MapwinGIS reference manual**. Idaho Falls, Idaho, USA: Idaho State University, 2007.
- ANDRADE, M. A.; O’SHAUGHNESSY, S. A.; EVETT, S. R. ARSmartPivot v.1 - Sensor-based management software for center pivot irrigation systems. **In 2015 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers**, p. 26–29, 2015.
- AUGUSTIN, L. K. et al. Optimal Irrigation Scheduling for Summer Maize Crop: Based on GIS and CROPWAT Application in Hetao District; Inner Mongolia Autonomous Region, China. **Journal of Biology, Agriculture and Healthcare**, v. 5, n. 18, p. 95–102, 2015.
- AZEVEDO, E. B. **Viabilidade do uso do inversor de frequência em sistema de irrigação do tipo pivô central**. Universidade Federal de Lavras - UFLA, 2003.
- BARKER, J. B. et al. Evaluation of variable rate irrigation using a remote-sensing-based model. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 63–74, 2018.
- BARNES, E. M. et al. Precision irrigation management using modeling and remote sensing approaches. **American Society of Agricultural Engineers - In Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium**, p. 332–337, 2000.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; STEDUTO, P. Science of the Total Environment The water productivity score (WPS) at global and regional level : Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat , rice and maize. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 595–611, 2017.
- BHATTI, S. et al. Site-specific irrigation management in a sub-humid climate using a spatial evapotranspiration model with satellite and airborne imagery. **Agricultural Water Management**, v. 230, p. 105950, 2020.
- BOLUWADE, A.; MADRAMOOTOO, C.; YARI, A. Application of Unsupervised Clustering Techniques for Management Zone Delineation: Case Study of Variable Rate Irrigation in Southern Alberta , Canada. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 1, p. 1–8, 2016.

BRASIL. **Análise Territorial para o Desenvolvimento da Agricultura Irrigada no Brasil**, 2014.

CAMARGO, O. A. DE et al. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada)**, 2009.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-Scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501–1511, 1994.

CAMBRA BASECA, C. et al. A Smart Decision System for Digital Farming. **Agronomy**, v. 9, n. 5, p. 216, 2019.

CAMP, C. R.; SADLER, E. J. Irrigation, deep tillage, and nitrogen management for a corn-soybean rotation. **Transactions of the ASAE - American Society of Agricultural Engineers**, v. 45, n. 3, p. 601–608, 2002.

CASANOVA, J. J. et al. Development of a Wireless Computer Vision Instrument to Detect Biotic Stress in Wheat. **Sensors**, v. 14, p. 17753–17769, 2014.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 237–243, 2011.

CBH-ALPA - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO PARANAPANEMA. **Relatório de situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas do estado de São Paulo - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos - Alto Paranapanema – UGRHI-14**, 2016.

CID-GARCIA, N. M.; BRAVO-LOZANO, A. G.; RIOS-SOLIS, Y. A. A crop planning and real-time irrigation method based on site-specific management zones and linear programming. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 107, p. 20–28, 2014.

CORWIN, D. L. Site-specific management and delineating management zones. **Precision agriculture for sustainability and environmental protection**, p. 135–157, 2013.

COSTA, M. M. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta para agricultura de precisão em uma área sob Cerrado**. Universidade Federal de Viçosa, 2011.

DACCACHE, A. et al. Implementing precision irrigation in a humid climate - Recent experiences and on-going challenges. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 135–143, 2015.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield Response to Water. Irrigation and Drainage Paper 33**. 1979.

DUKE, H. R.; HEERMANN, D. F.; FRAISSE, C. W. Linear move irrigation system for fertilizer management research. **In proceedings international exposition and technical conference**, p. 72–81, 1992.

EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. Rio de Janeiro, RJ: Reunião Técnica de Levantamento de Solos, 1979.

EMBRAPA. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2011.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília - DF: Embrapa Solos,

2017.

EVANS, R. G. et al. Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems. **Irrigation Science**, v. 31, p. 871–887, 2013.

EVANS, R. G.; SADLER, E. J. Site-specific irrigation water management. **In Precision agriculture for sustainability and environmental protection**, p. 172–190, 2013.

FAO. **The future of food and agriculture - Trends and challenges**. Rome, Italy, 2017.

FARAHANI, H. J. et al. Evaluation of a low volume agro-chemical application system for center pivot irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 4, p. 517–528, 2006.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p. 147–159, 2007.

FRAISSE, C. W. **Variable water application with moving irrigation systems**. Colorado State university, Fort Collins, 1993.

FRAISSE, C. W.; HEERMANN, D. F.; DUKE, H. R. WITH LINEAR-MOVE IRRIGATION SYSTEMS. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n. 5, p. 1371–1376, 1995.

FRIDGEN, J. J. et al. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 100–108, 2004.

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1275–1284, 2009.

GIOTTO, E. et al. **Agricultura de Precisão no Sistema CR Campeiro 7**. 1. ed. Santa Maria: CESPOL, 2016.

GONZÁLEZ PEREA, R. et al. Modelling impacts of precision irrigation on crop yield and in-field water management. **Precision Agriculture**, v. 19, p. 497–512, 2018.

HAGHVERDI, A. et al. Perspectives on delineating management zones for variable rate irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 117, p. 154–167, 2015.

HAGHVERDI, A. et al. Studying uniform and variable rate center pivot irrigation strategies with the aid of site-specific water production functions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 327–340, 2016.

HAGHVERDI, A.; OZTURK, H. S.; CORNELIS, W. M. Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: Impact of data quality and data mining method. **Geoderma**, v. 226–227, p. 31–38, 2014.

HEDLEY, C. B.; YULE, I. J. Soil water status mapping and two variable-rate irrigation scenarios. **Precision Agriculture**, v. 10, p. 342–355, 2009.

HEDLEY, C. B.; YULE, I. J. Farmer uptake of variable rate irrigation technologies in New Zealand. **In: 10th international conference on precision agriculture**, p. 15–18, 2012.

HEERMANN, D. F. et al. Interdisciplinary irrigated precision farming research. **Precision Agriculture**, v. 3, p. 47–61, 2002.

HILLYER, C.; HIGINS, C. A demonstration of energy and water savings potential of variable rate irrigation. **In: 2014 ASABE and CSBE annual international meeting**. Montreal, Quebec, Canada, 2014.

- JENSEN, M. E.; HEERMANN, D. F. Meteorological approaches to irrigation scheduling. **Proc. Nat. Irrig. Symp., Am. Soc. Agric. Eng.**, p. 1–11, 1970.
- JONES, J. W. et al. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, n. 3–4, p. 235–265, 2003.
- KANG, L. et al. Linkage control system of water-saving irrigation. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 37, n. 8, p. 232–236, 2011.
- KASSING, R.; SCHUTTER, B. DE; ABRAHAM, E. Optimal Control for Precision Irrigation of a Large-Scale Plantation. **Water Resources Research**, v. 56, n. 10, p. 22, 2020.
- KHOSLA, R. et al. Spatial variation and site-specific management zones. **Geostatistical Applications for Precision Agriculture**, p. 195–219, 2010.
- KING, B. A.; KINCAID, D. C. A variable flow rate sprinkler for site-specific irrigation management. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 765–770, 2004.
- KLEIN, V. A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v. 40, n. 7, p. 1550–1556, 2010.
- KLINK, C. A. Policy Intervention in the Cerrado Savannas of Brazil: Changes in the Land Use and Effects on Conservation. **A. Consorte-McCrea, and E. Ferraz Santos, Ecology and Conservation of the Maned Wolf: Multidisciplinary Perspectives**, p. 293–308, 2014.
- LARUE, J. L. Variable rate irrigation 2010 field results. **American Society of Agricultural and Biological Engineers annual international meeting**, Louisville, Kentucky, USA, p. 135–143, 2011.
- LEVIDOW, L. et al. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 84–94, 2014.
- LI, X. et al. Maximizing water productivity of winter wheat by managing zones of variable rate irrigation at different deficit levels. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 153–163, 2019.
- LI, Y. et al. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 174–186, 2007.
- LI, Y. et al. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. **Journal of Zhejiang University Science B**, v. 9, n. 1, p. 68–76, 2008.
- LIAKOS, V. et al. A model for precision irrigation scheduling of soybeans for the South-eastern US. **In: Precision agriculture'19. Wageningen Academic Publishers**, p. 713–720, 2019.
- LINDBLOM, J. et al. Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 3, p. 309–331, 2017.
- LONGCHAMPS, L. et al. Spatial and temporal variability of soil water content in leveled fields. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 5, p. 1446–1454, 2015.
- LOZOYA, C. et al. Sensor-based model driven control strategy for precision irrigation. **Journal of Sensors**, v. 2016, p. 12, 2016.
- MAIER, N.; DIETRICH, J. Using SWAT for strategic planning of basin scale irrigation control policies: a case study from a humid region in northern Germany. **Water Resources**

- Management**, v. 30, p. 3285–3298, 2016.
- MCBRATNEY, A. B. et al. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v. 109, p. 41–73, 2002.
- MENDES, W. R. et al. Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing. **Expert Systems With Applications**, v. 124, p. 13–24, 2019.
- MILLER, K. A. et al. A geospatial variable rate irrigation control scenario evaluation methodology based on mining root zone available water capacity. **Precision Agriculture**, v. 19, p. 666–683, 2018.
- MO, X. et al. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. **Ecological Modelling**, v. 183, p. 301–322, 2005.
- MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. DE. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 6, p. 567–573, 2008.
- MOREIRA, J. M. M. A. P. et al. **Caracterização dos produtores do núcleo rural do buriti vermelho: aspectos sociais, geográficos e de uso do solo e da água**. Planaltina-DF: Embrapa Cerrados: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento-Embrapa Cerrados, 2010.
- NASCIMENTO, P. DOS S. et al. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 4, p. 1101–1113, 2014.
- NEUPANE, J.; GUO, W. Agronomic basis and strategies for precision water management: A review. **Agronomy**, v. 9, n. 2, p. 87, 2019.
- O'SHAUGHNESSY, S. A. et al. Site specific variable-rate irrigation as a means to enhance water use efficiency. **Transactions of the ASABE E - American Society of Agricultural Engineers**, Long Beach, California, USA, v. 59, n. 1, p. 239–249, 2016.
- O'SHAUGHNESSY, S. A. et al. Site-specific irrigation of grain sorghum using plant and soil water sensing feedback - Texas High Plains. **Agricultural Water Management**, v. 240, p. 106273, 2020.
- ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B.; CHITTLEBOROUGH, D. J. Soil pattern recognition with fuzzy Cmeans: Application to classification and soil-landform interrelationships. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 505–516, 1992.
- OLDONI, H.; BASSOI, L. H. Delineation of irrigation management zones in a Quartzipsamment of the Brazilian semiarid region. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1283–1294, 2016.
- OMARY, M.; CAMP, C. R.; SADLER, E. J. Center pivot irrigation system modification to provide variable water application depths. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 235–239, 1997.
- PAN, L. et al. Analysis of soil water availability by integrating spatial and temporal sensor-based data. **Precision Agriculture**, v. 14, p. 414–433, 2013.
- PASSO, D. P. et al. Mapeamento de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Buriti Vermelho, DF. **In Embrapa Cerrados-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SEMINÁRIO DA REDE AGROHIDRO, 2., 2014, Campinas. Impactos da agricultura e das mudanças**

climáticas nos recursos hídricos: anais. Brasília, DF, p. 183–185, 2014.

PAYERO, J. O. et al. Effect of timing of a deficit-irrigation allocation on corn evapotranspiration, yield, water use efficiency and dry mass. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1387–1397, 2009.

PELCAT, Y. et al. In-field management zone delineation from remote sensing imagery. **The key to sustainable management, Regina, Saskatchewan, Canada**, p. 42–53, 2004.

PEREIRA, P. H. C. et al. O uso da engenharia de automação na redução do consume de energia elétrica em um sistema de irrigação por pivô central. **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, p. 163–168, 2013.

PERRY, C.; POCKNEE, S. DEVELOPMENT OF A VARIABLE-RATE PIVOT IRRIGATION CONTROL SYSTEM. **Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference, University of Georgia.** Institute of Ecology, Athens, Georgia., p. 1–5, 2003.

QIUMING, K.; YANDONG, Z.; CHENXIANG, B. Automatic monitor and control system of water saving irrigation. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, n. 6, p. 136–139, 2007.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

RAES, D. et al. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 438–447, 2009.

RAGAB, R. Constraints and applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions. **In: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) (ed.), Irrigation Scheduling: from Theory to Practice.** Rome, Italy, p. 149–165, 1996.

RAMANKUTTY, N. et al. Trends in Global Agricultural Land Use: Implications for Environmental Health and Food Security. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, n. 1, p. 789–815, 2018.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1987.

RESENDE, Á. V et al. Agricultura de Precisão no Brasil: Avanços, Dificuldades e Impactos no Manejo e Conservação do Solo, Segurança Alimentar e Sustentabilidade. **In: XVIII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, Teresina: Embrapa Meio-Noroeste: Universidade Federal do Piauí.**, 2010.

RODRIGUES, L. N. et al. GEOPIVO: modelo para simulação do desempenho de sistemas de irrigação tipo pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande**, v. 5, n. 3, p. 397–402, 2001.

RODRIGUES, L. N. et al. Análise do desempenho da irrigação em áreas da bacia do rio São Francisco. **Embrapa Cerrados**, 2003.

RODRIGUES, L. N. et al. Estimation of Small Reservoir Storage Capacities with Remote Sensing in the Brazilian Savannah Region. **Water Resources Management**, v. 26, p. 873–882, 2012.

RODRIGUES, L. N.; MAIA, A. DE H. N. Funções de pedotransferência para estimar a condutividade hidráulica saturada e as e as umidades de saturação e residual do solo em uma

bacia hidrográfica do Cerrado. In: **Embrapa Meio Ambiente-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. Anais... Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011**, p. 12, 2011.

RODRIGUES, L. N.; MOREIRA, J. M. M. A. P. Desenvolvimento de um modelo de simulação de estratégias de irrigação. In: **Anais do III Inovagri International Meeting-2015**. INOVAGRI/INCT-EI, Fortaleza, Ceará, Brasil, p. 1817–1825, 2015.

RODRIGUES, M. S. et al. Spatial interpolation techniques for site-specific irrigation management in a mango orchard. **Comunicata Scientiae**, v. 9, n. 1, p. 93–101, 2018.

ROQUE, M. W. et al. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1827–1835, 2008.

ROTH, R. L.; GARDNER, B. R. Modified self-moving irrigation system for water-nitrogen crop production system. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 5, n. 2, p. 175–179, 1989.

RUIZ-SANCHEZ, M. C.; DOMINGO, R.; CASTEL, J. R. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 2, p. 5–20, 2010.

SADLER, E. J. et al. Opportunities for conservation with precision irrigation. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 60, n. 6, p. 371–378, 2005.

SCHAFFRATH, V. R. et al. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1369–1377, 2008.

SILVA, A. J.; MONTEIRO, M. DO S. L.; SILVA, M. V. DA. Contrapontos da consolidação do agronegócio no cerrado brasileiro. **Sociedade e Território – Natal**, v. 27, n. 3, p. 95–114, 2015.

SILVA, E. M. DA; AZEVEDO, J. A. DE. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 10, p. 1487–1494, 2002.

SMITH, R. J. et al. Review of precision irrigation technologies and their application. **National Centre for Engineering in Agriculture**, University of Southern Queensland, Toowoomba, Publication 1003017/1, 2010.

SOUZA, Z. M. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 51–58, 2004.

STARK, J. C. et al. A two-dimensional irrigation control system for site-specific application of water and chemicals. **Agronomy Abstracts**, v. 85, p. 329–338, 1993.

STEDUTO, P. et al. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. 2009.

STEWART, J. I. et al. Optimising crop production through control and water salinity levels. **Paper 67**, p. 191, 1977.

STOCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst, a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 289–307, 2003.

STONE, K. C. et al. Water flow rates from a site-specific irrigation system. **Applied**

Engineering in Agriculture, v. 22, n. 1, p. 73–78, 2006.

STONE, K. C. et al. Variable-rate irrigation management using an expert system in the eastern coastal plain. **Irrigation Science**, v. 33, n. 3, p. 167–175, 2015.

SUN, W. et al. Connecting microstructural attributes and permeability from 3D tomographic images of in situ shear-enhanced compaction bands using multiscale computations. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 10, p. 5, maio 2011.

UNITED NATIONS. **World population prospects: the 2017 revision, key findings and advance tables**. New York, 2017.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. **Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 1, p. 1–53, 2000.

WENDT, D. E. et al. ASSESSING GROUNDWATER POTENTIAL USE FOR EXPANDING IRRIGATION IN THE BURITI VERMELHO WATERSHED. **Irriga**, n. 1, p. 81–94, 2015.

YARI, A. et al. Performance evaluation of constant versus variable rate irrigation. **Irrigation and Drainage**, v. 66, n. 4, p. 501–509, 2017.

YARI, A. et al. Optimum irrigation strategy to maximize yield and quality of potato: A case study in southern Alberta, Canada. **Irrigation and Drainage**, p. 1–13, 2020.

ZHANG, X. et al. Zone mapping application for precision farming: A decision support tool for variable rate application. **Precision Agriculture**, v. 11, p. 103–114, 2010.

ZHANG, Y. et al. Effect of soil water deficit on evapotranspiration, crop yield, and water use efficiency in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 64, p. 107–122, 2004.

ZHAO, W. et al. Determining placement criteria of moisture sensors through temporal stability analysis of soil water contents for a variable rate irrigation system. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 4, p. 648–665, 2018.