



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS CURITIBANOS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ECOSISTEMAS AGRÍCOLAS E NATURAIS

Fernanda Oliveira da Silva

**EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA CULTURA DO TRIGO:  
SIMULAÇÃO EM MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Curitibanos  
2021

Fernanda Oliveira da Silva

**EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA CULTURA DO TRIGO:  
SIMULAÇÃO EM MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ecossistemas Agrícolas e Naturais da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.  
Orientador: Prof. Dr. João Batista Tolentino Júnior  
Área de Concentração: Manejo e Conservação de Ecossistemas Agrícolas e Naturais

Curitibanos  
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Fernanda Oliveira  
EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA CULTURA DO TRIGO :  
SIMULAÇÃO EM MUDANÇAS CLIMÁTICAS / Fernanda Oliveira Silva  
; orientador, João Batista Tolentino Júnior, 2021.  
203 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Curitibanos, Programa de Pós-Graduação em  
Ecossistemas Agrícolas e Naturais, Curitibanos, 2021.

Inclui referências.

1. Ecossistemas Agrícolas e Naturais. 2. Irrigação. 3.  
Modelo AquaCrop. 4. Triticum aestivum . I. Tolentino  
Júnior, João Batista . II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ecossistemas Agrícolas  
e Naturais. III. Título.

Fernanda Oliveira da Silva  
**EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NA CULTURA DO TRIGO: SIMULAÇÃO EM  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. João Batista Tolentino Júnior, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Pedro Rogério Giongo, Dr.  
Universidade Estadual de Goiás

Prof. Alexandre tem Caten, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Ciências.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. João Batista Tolentino Júnior, Dr.  
Orientador

Curitibanos, 2021.

## RESUMO

O clima exerce uma função essencial para a agricultura, logo, esta é afetada diretamente pelas suas variações e mudanças na temperatura e precipitação. Se estas mudanças climáticas estão ocorrendo, o manejo da agricultura terá que ser revisto, em especial a demanda de água e manejo da irrigação. A irrigação das culturas responde por 70% da utilização da água pelas atividades humanas. Por ser o setor que mais utiliza água, é também o setor que mais sofre com a escassez de água. Em um cenário de mudanças climáticas pode ocorrer conflitos de interesse da água para o consumo urbano com a agricultura irrigada. Para compreender as mudanças climáticas o Painel Intergovernamental de Mudanças climáticas (IPCC) propostos diferentes modelos climáticos que são representações matemáticas de processos indispensáveis no sistema climático da Terra. Destaco os GCMs por ter características de simular diversos aspectos climáticos, desde a temperatura atmosférica e dos oceanos, precipitação, ventos, nuvens, correntes oceânicas e extensão do gelo marinho. Os modelos são amplamente testados em comparação com observações históricas. Este trabalho teve como objetivo simular a eficiência do uso da água em cenários de mudanças climáticas de representative concentration pathway (RCP) projetados pelo (IPCC) nos cenários RCP 4.5 e RCP8.5, para 2050 e 2070. Como modelo de cultura agrícola foi utilizado o trigo (*Triticum aestivum*). Com os dados disponibilizados por Xavier, King & Scanlon (2016) foi criado o cenário atual de temperatura mínima, temperatura máxima e precipitação para o sul do Brasil que aplicou as médias dos dados de 1985 – 2014. Posteriormente, com os dados do WordClim de CMIP5 e com os 16 modelos disponíveis do GCM, extraiu-se os dados dos RCPs de temperatura mínima, temperatura máxima e precipitação com as mesmas longitudes e latitudes utilizadas para os dados de Xavier, King & Scanlon. Com o cenário atual constituído, foi somado os dados dos RCPs, por serem um dado que representa quando a temperatura e a precipitação vão aumentar em cada cenário dos RCPs. A modelagem de crescimento do trigo e eficiência do uso da água foi realizada com o *AquaCropR*. As simulações foram com realizada sem irrigação e com manejo de irrigação com base nas características de solo como a água disponível de 50, 75, 95 e 100% e com data de semeadura de 11/03 a 05/08, com intervalo de sete dias cada. Visto que foi simulado datas de semeadura fora do zoneamento climático atual para compreender como se comportará a cultura nos diferentes cenários e com uso de cobertura morta de 50%, já que a lavoura de trigo no Brasil é implantada no sistema de plantio direto em mais de 90% das áreas cultivadas. Foi determinado a eficiência do uso da água com base na irrigação e precipitação, eficiência do uso da água em relação a evapotranspiração e produtividade da cultura. Como resultado foi observado que a melhor lâmina para as mudanças climáticas em cenários RCPs foi a de 50% de água disponível no solo. Enquanto, que a lâmina de 95 e 100% para um contexto de mudanças climáticas não respondeu em maior produtividade. Os cenários RCP 4.5 para 2050 e 2070 tiveram comportamentos de eficiência de uso da água muito similar, sendo o mais indicado as datas de semeaduras para o Sul do Brasil com base em eficiência do uso da água as datas de 22/04, 29/04 e 06/05. Enquanto, o cenário de RCP 8.5 2050 seguiu a mesma tendencia em data de semeadura que o cenário RCP 4.5, já o RCP 8.5 2070 as datas foram 22/04 e 29/04. RCP 8.5 2070 se destaca por ter maior eficiência do uso da água acima de  $14 \text{ kg.m}^{-3}$ , essa maior eficiência está relacionada a maior produtividade da cultura, o qual chega a produzir 29,75% em alguns locais do Sul do Brasil a mais que o cenário atual. As medidas agrônômicas aplicadas na cultura do trigo como data de semeadura e manejo da irrigação, que podem amenizar os impactos das mudanças climáticas e otimizar a produção. O sul do Brasil mostra-se bem resiliente as mudanças do clima para a cultura do trigo.

**Palavras-chave:** Irrigação 1. Modelo *AquaCrop* 2. *Triticum aestivum* 3

## ABSTRACT

The climate plays an essential role for agriculture, so it is directly affected by its variations and changes in temperature and precipitation. If these climate changes are taking place, the management of agriculture will have to be reviewed, in particular the demand for water and irrigation management. Crop irrigation accounts for 70% of water use for human activities. As it is the sector that most uses water, it is also the sector that suffers the most from water scarcity. In a climate change scenario, conflicts of interest between water for urban consumption and irrigated agriculture may occur. To understand climate change the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) proposed different climate models that are mathematical representations of processes indispensable in the Earth's climate system. I highlight the GCMs for having characteristics of simulating several climatic aspects, from atmospheric and ocean temperatures, precipitation, winds, clouds, ocean currents and sea ice extension. The models are extensively tested against historical observations. This work aimed to simulate the efficiency of water use in climate change scenarios of representative concentration pathway (RCP) projected by (IPCC) in scenarios RCP 4.5 and RCP8.5, for 2050 and 2070. As a model of agricultural culture, it was used wheat (*Triticum aestivum*). With the data provided by Xavier, King & Scanlon (2016), the current scenario of minimum temperature, maximum temperature and precipitation for the south of Brazil was created, which applied the 1985 - 2014 data averages. Subsequently, with WordClim data from CMIP5 and with the 16 models available from comprehensive General Circulation Models (GCMs), data from the minimum temperature, maximum temperature and precipitation RCPs were extracted with the same longitudes and latitudes used for the Xavier, King & Scanlon data. With the current scenario constituted, the CPR data was added, as it is a data that represents when the temperature and precipitation will increase in each CPR scenario. The modeling of wheat growth and water use efficiency was performed with AquaCropR. The simulations were carried out without irrigation and with irrigation management based on soil characteristics such as available water of 50, 75, 95 and 100% and with sowing date from 11/03 to 08/05, with an interval of seven days each. Since it was simulated sowing dates outside the current climatic zoning to understand how the crop will behave in different scenarios and using 50% mulch, as the wheat crop in Brazil is implanted in the no-tillage system in more than 90% of cultivated areas. Efficiency of water use was determined based on irrigation and precipitation, efficiency of water use in relation to evapotranspiration and crop productivity. As a result, it was observed that the best blade for climate change in RCPs scenarios was 50% water available in the soil. Meanwhile, the 95 and 100% slide for a climate change context did not respond to greater productivity. The RCP 4.5 scenarios for 2050 and 2070 had very similar water use efficiency behaviors, with the most suitable dates for sowing dates for the south of Brazil based on the efficiency of water use, the dates of 22/04, 29/04 and 06/05. Meanwhile, the RCP 8.5 2050 scenario followed the same trend in the sowing date as the RCP 4.5 scenario, whereas RCP 8.5 2070, the dates were 22/04 and 29/04. RCP 8.5 2070 stands out for having greater efficiency in the use of water above 14 kg.m<sup>-3</sup>, this greater efficiency is related to greater productivity of the crop, which reaches 29,75% in some places in southern Brazil more than the current scenario. Agronomic measures applied to wheat crops as a date of sowing and irrigation management, which can mitigate the impacts of climate change and optimize production. Southern Brazil is proving to be very resilient to climate change for wheat cultivation.

**Keywords:** Irrigation 1. AquaCrop model 2. *Triticum aestivum* 3

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva do Coeficiente de Cultivo ( $K_c$ ) nas diferentes fases do ciclo de uma cultura. .....	25
Figura 2. Esquema de simulação do <i>AquaCrop</i> com indicação das 4 principais etapas e processos.....	29
Figura 3. Níveis de $CO_2$ para os diferentes cenários de mudanças climáticas.....	32
Figura 4. Rendimento total e produtividade média do trigo por estado no Brasil em 2019.....	33
Figura 5. Produtividade médio do trigo ( $kg\cdot ha^{-1}$ ) por municípios brasileiros em 2019. ....	33
Figura 6. Pontos com as coordenadas da região Sul que foi utilizada para obter os dados climáticos.....	35
Figura 7. Extração dados climáticos evapotranspiração.....	35
Figura 8. União dos dados climáticos.....	35
Figura 9. Fases da curva do Coeficiente de Cultivo para a cultura do trigo precoce. ....	37
Figura 10. Imagem Qgis com grid de pontos para extração das variáveis de interesse. ....	40
Figura 11. Curva do Coeficiente de Cultivo da cultura do Trigo.....	45
Figura 12. Fase II da curva do Coeficiente de Cultivo.....	45
Figura 13. Evapotranspiração determinada pelo Balanço Hídrico com 22 datas de semeadura para o ciclo da cultura do trigo com série de dados de 1985 a 2014, para região sul do Brasil.. .....	47
Figura 14. Irrigação determinada pelo Balanço Hídrico com 22 datas de semeadura para o ciclo da cultura do trigo de 1985- 2014.....	48
Figura 15. Precipitação para diferentes datas de semeadura para o ciclo da cultura do trigo de 1985- 2014.....	49
Figura 16. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário atual.....	51
Figura 17. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário atual.....	52
Figura 18. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário atual.....	53
Figura 19. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário atual.....	54
Figura 20. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário atual.....	55

Figura 21. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	59
Figura 22. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	60
Figura 23. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	61
Figura 24. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	62
Figura 25. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	63
Figura 26. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	65
Figura 27. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	66
Figura 28. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	67
Figura 29. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	68
Figura 30. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	69
Figura 31. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	71
Figura 32. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	72
Figura 33. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	73
Figura 34. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	74
Figura 35. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	75
Figura 36. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	76
Figura 37. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	77

Figura 38. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	78
Figura 39. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	79
Figura 40. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	80
Figura 41. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	82
Figura 42. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	83
Figura 43. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	84
Figura 44. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	85
Figura 45. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.....	86
Figura 46. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	87
Figura 47. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	88
Figura 48. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	89
Figura 49. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	90
Figura 50. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.....	91
Figura 51. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	92
Figura 52. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	93
Figura 53. . Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 75% no cenário RCP 8.5 50. ....	94
Figura 54. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	95

Figura 55. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.....	96
Figura 56. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	97
Figura 57. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	98
Figura 58. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 70% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	99
Figura 59. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	100
Figura 60. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.....	101
Figura 61. Máxima produtividade (kg.ha <sup>-1</sup> ) nos diferentes cenários de mudanças climáticas. ....	102
Figura 62. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.....	103
Figura 63. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) com irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.....	104
Figura 64. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) com irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.....	105
Figura 65. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) com irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.....	106
Figura 66. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) com irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.....	107
Figura 67. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.....	108
Figura 68. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) com irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.....	109
Figura 69. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) com irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.....	110
Figura 70. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) com irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.....	111
Figura 71. Produtividade da cultura (kg.ha <sup>-1</sup> ) com irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.....	112

Figura 72. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.....	113
Figura 73. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.....	114
Figura 74. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.....	115
Figura 75. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.....	116
Figura 76. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.....	117
Figura 77. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.....	118
Figura 78. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.....	119
Figura 79. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.....	120
Figura 80. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.....	121
Figura 81. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.....	122
Figura 82. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual.....	124
Figura 83. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 4.5 2070 e atual.....	125
Figura 84. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 50%.....	127
Figura 85. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 75%.....	128
Figura 86. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 100%.....	129
Figura 87. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 50%.....	131
Figura 88. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 75%.....	132
Figura 89. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 100%.....	133

Figura 90. Eficiência do uso da água considerando a precipitação do cenário RCP 4.5 2050 e atual. ....	135
Figura 91. Diferença da Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2050 e atual com irrigação de 50%. ....	136
Figura 92. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2050 e atual com irrigação de 75%. ....	137
Figura 93. Diferença da Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2050 e atual com irrigação de 95%. ....	138
Figura 94. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2050 e atual com irrigação de 100%. ....	139
Figura 95. Eficiência do uso da água considerando a precipitação do cenário RCP 4.5 2070 e atual. ....	140
Figura 96. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 50%. ....	141
Figura 97. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 75%. ....	142
Figura 98. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 95%. ....	143
Figura 99. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 100%. ....	144
Figura 100. Eficiência do uso da água considerando a precipitação do cenário RCP 8.5 2050 e atual. ....	145
Figura 101. Diferença da Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2050 e atual com irrigação de 50%. ....	146
Figura 102. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2050 e atual com irrigação de 75%. ....	147
Figura 103. Diferença da Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2050 e atual com irrigação de 95%. ....	148
Figura 104. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2050 e atual com irrigação de 100%. ....	149
Figura 105. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual. ....	150
Figura 106. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 50% . ....	151

Figura 107. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 75%. .....	152
Figura 108. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 95%. .....	153
Figura 109. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 100%. .....	154
Figura 110. Eficiência do uso da água média (I+P) (kg.m <sup>-3</sup> ) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários RCP.....	155
Figura 111. Eficiência do uso da água média±desvio-padrão (I+P - kg.m <sup>-3</sup> ) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários RCP. ....	156
Figura 112. Eficiência do uso da água média (I+P) (kg.m <sup>-3</sup> ) para diferentes datas de semeadura e cenários RCP. ....	157
Figura 113. Eficiência do uso da água média±desvio padrão (I+P - kg.m <sup>-3</sup> ) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários RCP. ....	158
Figura 114. Eficiência do uso da água média (ETc) (kg.m <sup>-3</sup> ) para diferentes lâminas de irrigação e respectivos cenários RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2070, RCP 8.5 2050 e RCP 8.5 2070. ....	159
Figura 115. Eficiência do uso da água média±desvio padrão (ETc - kg.m <sup>-3</sup> ) para diferentes lâminas de irrigação e respectivos cenários 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.....	160
Figura 116. Eficiência do uso da água (ETc - kg.m <sup>-3</sup> ) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070. ....	161
Figura 117. Eficiência do uso da água média (ETc - kg.m <sup>-3</sup> ) para diferentes datas de semeadura nos cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.....	162
Figura 118. Irrigação total (mm) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070. ....	163
Figura 119. Irrigação total média (mm) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários 4.5 2050 (4550), 4.5 2070 (4570), 8.5 2050 (8550) e 8.5 2070 (8570).....	163
Figura 120. Irrigação total média (mm) para diferentes datas de semeaduras nos cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070. ....	164
Figura 121. Irrigação média±desvio padrão (mm) para diferentes datas de semeaduras para a para os cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.....	165
Figura 122. Produtividade da cultura do trigo (kg.ha <sup>-1</sup> ) para diferentes datas de semeadura nos cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070. ....	166
Figura 123. Diferença entre a irrigação na cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 50%.....	168

Figura 124. Diferença entre a irrigação na cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 75%.....	169
Figura 125. Diferença entre a irrigação na cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 95%.....	170
Figura 126. Diferença entre a irrigação na cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 100%.....	171
Figura 127. a , Tendências de rendimento de grãos para 1981–2010 com base no rendimento médio de um conjunto de 30 modelos. Rendimento de grãos mediano relativo para aumentos de temperatura de +2 ° C ( b ) e +4 ° C ( c ) impostos no período de 1981 a 2010. ....	173

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Mudança projetada na temperatura média global da superfície para meados e final do século 21, em relação ao período 1986-2005. ....	22
Tabela 2. Data de semeadura do trigo simuladas para a região Sul do Brasil.....	36
Tabela 3. Modelos globais de circulação do CMIP5 considerados neste estudo para cenário RCP 4.5 e RCP 8.5 – 2050 e 2070. ....	39
Tabela 4. Duração das fases fenológicas em graus-dias utilizados no <i>AquaCrop</i> . ....	42
Tabela 5. Dados de entrada da cultura e manejo conservacionistas utilizados para os parâmetros do modelo <i>AquaCrop</i> . ....	43
Tabela 6. Eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) para o cenário RCP 4.5 2050.....	196
Tabela 7. Eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 4.5 2070.....	197
Tabela 8. Eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 8.5 2050.....	198
Tabela 9. Eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 8.5 2070.....	199
Tabela 10. Eficiência do uso da água ( $\text{ET}_c$ ) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 4.5 2050.....	200
Tabela 11. Eficiência do uso da água ( $\text{ET}_c$ ) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 4.5 2070.....	201
Tabela 12. Eficiência do uso da água ( $\text{ET}_c$ ) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 8.5 2050.....	202
Tabela 13. Eficiência do uso da água ( $\text{ET}_c$ ) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 8.5 2070.....	203

## LISTA DE SIGLAS

- BH – Balanço hídrico;
- CF – Cenário futuro;
- cc – Capacidade de campo;
- CC – Cobertura do dossel;
- CC<sub>pot</sub> – Cobertura do dossel potencial;
- DEP<sub>fim</sub> [1] – Retirada de água no final do dia, mm;
- DEP<sub>fim</sub> [i-1] – Retirada de água no final do dia anterior [i - 1], mm;
- DEP<sub>ini</sub> [1] – Retirada de água no início do dia, mm;
- DEP<sub>ini</sub> [i] – Retirada de água no início do dia [i], mm;
- Etc [1] – Evapotranspiração da cultura no primeiro dia do ciclo, mm;
- ET<sub>c</sub> – Evapotranspiração da cultura;
- Etc [i] – Evapotranspiração da cultura do dia [i], mm;
- ET<sub>o</sub> – Evapotranspiração de referência;
- Et0 [1] – Evapotranspiração de referência no primeiro dia do ciclo, mm;
- Et0 [i] – Evapotranspiração de referência do dia [i], mm;
- ESMs – Modelos do Sistema Terrestre
- EUA – Eficiência do uso da água, kg.m<sup>-3</sup>;
- IAF – Índice de Área Foliar;
- Irriga [1] – Irrigação no primeiro dia do ciclo do trigo, mm;
- Irriga [i] – Irrigação no dia [i] do ciclo do trigo, mm;
- HI – Índice de colheita;
- HI<sub>adj</sub> – Índice de colheita ajustado;
- Tr – Transpiração;
- TR – Condutância estomática e transpiração;
- Kc [1] – Coeficiente de Cultivo da cultura no primeiro dia do ciclo, adimensional;
- K<sub>c</sub> – coeficiente de cultura, adimensional;
- Kc<sub>TR</sub> – Transpiração da cultura;
- Ksat – Condutividade hidráulica saturada;
- GCMs – Modelos de Circulação Geral;
- Precipitação [i] – Precipitação no dia [i] do ciclo, mm;
- PMP – ponto de murcha permanente;
- RCPs – vias de concentração representativas

U2 – Umidade relativa;

RS – Radiação Solar;

TMax<sub>futuro</sub> – Temperatura máxima do GCMs, °C;

TMax<sub>atual</sub> – Temperatura máxima atual, °C;

WP – Produtividade de água normalizada

Y – Produtividade do trigo, kg.ha<sup>-1</sup>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>HIPÓTESE</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
4.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AGRICULTURA	20
4.2	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E RECURSOS HÍDRICOS	22
4.3	BALANÇO HÍDRICO	24
4.4	EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA	26
4.5	SOFTWARE AQUACROP	27
4.5.1	Modelo de Simulação Agrícola <i>AquaCrop</i>	28
4.6	A CULTURA DO TRIGO	31
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>34</b>
5.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
5.2	DADOS CLIMÁTICOS PARA COMPOR O CENÁRIO ATUAL	34
5.3	DADOS DA CULTURA DO TRIGO	36
5.3.1	Data de semeadura do trigo	36
5.3.2	Coefficiente de Cultivo	37
5.3.3	Determinação do Balanço Hídrico	38
5.4	DADOS CLIMÁTICOS PARA COMPOR OS CENÁRIOS FUTUROS	39
5.5	<i>AQUACROP</i>	41
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>45</b>
6.1	COEFICIENTE DE CULTIVO	45
6.2	BALANÇO HIDRICO	46
<b>7</b>	<b>DADOS AQUACROP</b>	<b>50</b>
7.1	CENÁRIOS MODELADOS PELO <i>AQUACROP</i>	50
<b>8</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>172</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>179</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>181</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O clima exerce uma função essencial para a agricultura, logo, esta é afetada diretamente pelas suas variações e mudanças. Se estas mudanças climáticas estão ocorrendo, o manejo da agricultura terá que ser revisto, em especial a demanda de água, o sistema e manejo da irrigação. É necessário compreender os efeitos das alterações climáticas sobre os recursos hídricos agrícolas e como isso pode afetar a produtividade agrícola a longo prazo (SEUNG-HWAN et al., 2013). A produtividade agrícola não pode ser subsidiada com aumento de área, mas sim, menores áreas com alta produtividade. Entender as lacunas da produtividade é um desafio, em especial a eficiência da água em diferentes cenários.

As principais mudanças climáticas incluem desde o aumento da temperatura média e mudança na distribuição temporal e espacial da chuva, elevação da evapotranspiração durante o verão como consequência do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (IPCC, 2014). Nas projeções sobre a precipitação, esperam-se que a estação chuvosa se torne mais úmida, ao mesmo tempo que as estações secas serão ainda mais secas. A ocorrência de secas tende a aumentar em muitas regiões do mundo, em especial para as áreas tropicais e subtropicais, sendo necessário a irrigação, exigindo maiores quantidade de água, gerando um possível conflito sobre o uso da água. Nestas circunstâncias, a eficiência do uso da água no meio agrícola é uma estratégia adaptativa (GU et al., 2019; HARMSEN et al., 2009).

A eficiência do uso da água é caracterizada como a razão entre produção de massa fresca e o uso da água, ou seja, reduzir a demanda por água e aumentar a produtividade (WANG et al., 2019). A irrigação pode ser utilizada para suplementar a demanda de água, uniformizando a distribuição de água ou para períodos de secas. O aumento da eficiência de uso da água é fundamental para diminuir o desperdício de água nos atuais padrões de produção da agricultura irrigada. A necessidade de irrigação em uma cultura é influenciada pela fenologia e por flutuações climáticas, que podem ser simuladas usando modelos agrometeorológicos, por exemplo os modelos *AquaCrop*, *AquaCrop-OS* e *AquacropR* (PIRMORADIAN; DAVATGAR, 2019; RODRIGUEZ; OBER, 2019)

O modelo *AquaCrop* apresenta um algoritmo e procedimentos que modelam diversas variáveis, sendo as mais relevantes a eficiência do uso da água, aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera e variação da temperatura para diferentes culturas. O modelo é adequado para o desenvolvimento de manejo de irrigação e análise de cenários em um contexto de mudanças climáticas (RAES et al., 2009, 2018a).

Este estudo tem como objetivo modelar diferentes cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2070, RCP 8.5 2050 e RCP 8.5 2070 para o Sul do Brasil, avaliando as variáveis de temperatura, precipitação e aumento de CO<sub>2</sub> usando como modelo a cultura do trigo para a eficiência do uso da água e produtividade agrícola com o pacote *AquaCropR*. Por meio desta modelagem, espera-se gerar dados sobre o manejo da irrigação, utilizando de forma racional à água e aumentar a produtividade agrícola em um cenário de mudanças climáticas. Neste contexto, medidas agronômicas como data de semeadura e manejo adequado da irrigação podem reduzir os impactos das mudanças climáticas sobre a cultura do trigo.

## **2 HIPÓTESE**

Devido as mudanças climáticas, a demanda de água para a agricultura irrigada aumentará devido aos eventos extremos de veranicos do Sul do Brasil. A irrigação pode ser uma estratégia adaptativa para a cultura se manter viável. Informações sobre o manejo da irrigação de quando e quanto irrigar em um contexto de mudanças climáticas pode otimizar a eficiência do uso da água na cultura do trigo, evitar conflito de interesse pelo consumo urbano e agricultura irrigada.

## **3 OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho consistiram em simular os efeitos das mudanças climáticas de temperatura, precipitação e concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> nos cenários RCP 4.5 e 8.5 pelo pacote *AquaCropR* (a) determinar a eficiência do uso da água na cultura do trigo, (b) determinar o rendimento de grãos, (c) determinar a melhor lâmina de irrigação e (d) determinar a melhor data de semeadura para o trigo no Sul do Brasil.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AGRICULTURA**

O Painel Intergovernamental de Mudanças climáticas (IPCC, 2021) é um órgão composto por 130 governos que tem como objetivo estudar e emitir relatórios sobre as

mudanças climáticas. Para entender as mudanças climáticas são propostos diferentes modelos climáticos que são representações matemáticas de processos indispensáveis no sistema climático da Terra. Entre eles se tem os modelos idealizados simples, a modelos de complexidade intermediária, a abrangentes Modelos de Circulação Geral (GCMs), incluindo Modelos do Sistema Terrestre (ESMs).

Aqui destaco os GCMs por ter características de simular diversos aspectos climáticos, desde a temperatura atmosférica e dos oceanos, precipitação, ventos, nuvens, correntes oceânicas e extensão do gelo marinho. Os modelos são amplamente testados em comparação com observações históricas (IPCC, 2021). Na plataforma do WorldClim (2021) tem disponível dados de projeção climáticas do IPPC de modelos climáticos globais para quatro vias de concentração representativas (RCPs), sendo o RCP 2.5, RCP 4.5, RCP 6.5, RCP 8.5.

As Vias de Concentração Representativas (RCPs) descrevem quatro vias diferentes de emissões de gases de efeito estufa do século 21 e concentrações atmosféricas, emissões de poluentes do ar e uso da terra. Os RCPs foram elaborados a partir de Modelos de Avaliação Integrada (IAMs) como entrada para uma ampla gama de simulações de modelos climáticos para projetar suas consequências para o sistema climático. Essas projeções climáticas, por sua vez, são utilizadas para avaliação de impactos e adaptação (IPCC, 2021).

Os cenários são usados para avaliar os custos associados às reduções de emissões consistentes com caminhos de concentração específicos. Incluem um cenário de mitigação rigoroso (RCP 2.6), dois cenários intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0) e um cenário com emissões de gases de efeito estufa muito altas (RCP 8.5). O clima futuro dependerá do aquecimento global causado por emissões antropogênicas e da variabilidade natural do clima. Na tabela 1, mostra as faixas fornecidas para RCPs específicos sobre o aumento da temperatura média global. Demonstra as diferenças na sensibilidade dos modelos climáticos. Assim como, a precipitação não será uniforme em um contexto de mudanças climáticas. As regiões de latitudes médias e subtropicais secas, a precipitação média tem uma tendência a diminuir, todavia, em regiões úmidas de latitude média, a precipitação média tem uma tendência a aumentar sob o cenário RCP 8.5 (IPCC, 2021).

As tendências mostram que as mudanças climáticas afetaram a sustentabilidade de sistemas agrícolas em muitas regiões (AHMED et al., 2019). As populações que dependem de alimentos provenientes de outros locais, serão mais vulneráveis (IPCC, 2014). Dissanayake et al. (2019) comentam que a agricultura desempenha papel fundamental na economia de países em desenvolvimentos, sendo uma das atividades mais dependente do clima e da água. Watson et al. (1995) já argumentavam que o aquecimento global antrópico teria um impacto

significativo sobre o ciclo hidrológico e, conseqüentemente, sobre os recursos hídricos. As mudanças climáticas tem intensificado os processos hidrológicos (ZHANG et al., 2019a).

Tabela 1. Mudança projetada na temperatura média global da superfície para meados e final do século 21, em relação ao período 1986-2005.

		2046-2065		2081-2100		
		Cenário	Significar	Faixa provável	Significar	Faixa provável
Mudança de temperatura média global da superfície (°C)	RCP 2.6	1,0	0,4 a 1,6	1,0	0,3 a 1,7	
	RCP 4.5	1,4	0,9 a 2,0	1,8	1,1 a 2,6	
	RCP 6.0	1,3	0,8 a 1,8	2,2	1,4 a 3,1	
	RCP 8.5	2,0	1,4 a 2,6	3,7	2,6 a 4,8	

Fonte: Adaptado IPCC, 2021.

Com aumento o aumento da temperatura, a mudança climática está acelerando o ciclo hidrológico global, ocorrendo uma mudança da distribuição temporal e espacial na precipitação. Desta forma, tem se observado uma maior variação na frequência e distribuição de inundações e secas, aumento na taxa de evapotranspiração em diferentes regiões do mundo. O aumento da temperatura resultará em uma maior evapotranspiração, resultando em um aumento da irrigação até o final do século (RESHMIDEVI et al., 2018).

A agricultura irrigada pode ser vista como uma estratégia adaptativa, uma vez que as mudanças climáticas afetam a demanda de água via irrigação por meio da fisiologia e fenologia da planta, precipitação efetiva, evapotranspiração da planta e água no solo (SHAHID, 2011). Asseng et al. (2013) ilustraram as possíveis mudanças climáticas para a cultura do trigo. Os modelos foram analisados com uma combinação de mudança na precipitação, aumento na temperatura e na concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. Os autores comentam que a incerteza dos impactos simulados para a agricultura variou conforme o manejo da cultura, solo e água.

## 4.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E RECURSOS HÍDRICOS

Os objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODS) constitui-se um banco de diretrizes para alcance universal para estabelecer ações de mitigar a pobreza e proteger o meio ambiente. Neste contexto, se destaca o uso do recurso comum da água em que o Brasil possui um dos maiores recursos de água doce do mundo. Todavia, a distribuição da água é desuniforme em termos de território, espaço e temporal (IBGE, 2018). O relatório sobre o

Desenvolvimento Mundial da Água divulgado pelas Nações Unidas apresentou que a demanda global por água vem crescendo à uma taxa anual de 1%, e tende a continuar acelerando nos próximos 20 anos (WWAP, 2018).

O aumento da população mundial, os riscos de inundações e as secas associados as mudanças climáticas e as demandas por água potável para serviços urbanos e ambientais levam ao um declínio nos recursos hídricos disponíveis para a agricultura (NASCIMENTO et al., 2019).

O setor agrícola, especificamente a agricultura irrigada, é o maior consumidor de água potável do mundo, consumindo cerca de 70% da água. Todavia, em países em desenvolvimento o consumo pode chegar a 95%. O Brasil se encontra entre os dez países com maior área equipada para irrigação do mundo, estando ao lado de países como: Tailândia, México, Indonésia, Turquia, Bangladesh, Vietnã, Uzbequistão, Itália e Espanha com áreas irrigadas entre 4 a 7 Mha (FAO, 2017).

Nas próximas duas décadas, as mudanças climáticas afetarão negativamente a produção agrícola, criando limites em diversas regiões. (PEREIRA; FIGUEIRA; MARQUES, 2020). A disponibilidade de água afetará diretamente a produção de alimento (KEREMANE; MCKAY, 2006).

De acordo com Iglodias & Garrote (2015) duas variáveis são críticas para a agricultura, sendo elas, a distribuição da precipitação no futuro e a ocorrência de eventos climáticos extremos. Entre as principais consequências das mudanças climáticas nos recursos hídricos para a produção agrícolas, podemos destacar:

- Elevação no consumo hídrico pela agricultura devido ao aumento da evapotranspiração da cultura (ETc) em resposta ao aumento das temperaturas;
- Escassez de água para as culturas em distribuição temporal e espacial, por conseguinte, aumentando a necessidade de água para fins de irrigação, principalmente em locais que já tem a ocorrência de estresse hídrico nas plantas;
- Redução da qualidade da água devido à maior temperatura da água e menores níveis de escoamento em algumas regiões, particularmente no verão, impondo mais estresse hídrico nas áreas irrigadas.

Neste contexto, a eficiência do uso da água para as culturas se torna relevante, evitando um conflito de interesse da água, entre o consumo urbano e a agricultura irrigada (ANA, 2017).

### 4.3 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico (BH) é a contabilização das entradas e saídas de água de um sistema. As saídas podem ser por meio da evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento subsuperficial e drenagem profunda. As entradas podem ser de diferentes formas, por chuva, orvalho, escoamento superficial, escoamento subsuperficial, ascensão capilar e por meio da irrigação (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

A falta de água é um fator relevante para minimizar a produtividade agrícola e em muitos países a falta da água pode ser suplementada com a irrigação. A exigência de água de irrigação representa basicamente a diferença entre a necessidade de água da cultura e a precipitação efetiva. O requisito de água de irrigação também inclui água adicional para a lixiviação de sais e para compensar a não uniformidade da aplicação de água (ALLEN et al., 2006).

A lâmina de água aplicada para as diferentes culturas é determinada pelo balanço hídrico da cultura, sendo assim, determina quando e quanto irrigar. O balanço hídrico pode ser realizado com dados provenientes de métodos diretos (TERRY A. HOWELL; ROBERT L. MCCORMICK; CLAUDE J. PHENE, 1985; VU; WATANABE; TAKAGI, 2005) e, ou pelo método indireto para determinar a evapotranspiração.

Os métodos indiretos relacionam a evapotranspiração de referência com o coeficiente de cultivo e são utilizados em diferentes agroecossistemas em todo o mundo (DJAMAN et al., 2019). A evapotranspiração de referência se refere a taxa evapotranspirométrica em uma superfície de referência, independentemente do tipo de cultura, do seu estágio vegetativo e das práticas de manejo adotadas em seu cultivo, ou seja, parâmetros climatológicos. Sendo assim, é uma variável de suma importância para o manejo da irrigação (DJAMAN et al., 2016). O método de Penman-Monteith é considerado como o método padrão para determinar a evapotranspiração de referência (ASCE-EWRI 2005).

O método de Penman-Monteith utiliza alguns dos principais dados meteorológicos, que são: temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento a 2 m de altura e radiação solar. A necessidade de diversos dados meteorológicos gera um obstáculo para a utilização do método, sendo por falta de dados ou pela qualidade do dado (TRAJKOVIC, 2005).

A evapotranspiração de cultura refere-se aos processos de transpiração realizado pelas plantas e a evaporação direta da água no solo, visto que estes processos ocorrem

simultaneamente, denominados evapotranspiração. Já a evapotranspiração de referência é a transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera (ALLEN et al., 2006).

Em geral, o coeficiente de cultivo é definido como a relação entre evapotranspiração de cultivo sem restrição de água e evapotranspiração de referência, equação 1:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (1)$$

Em que:

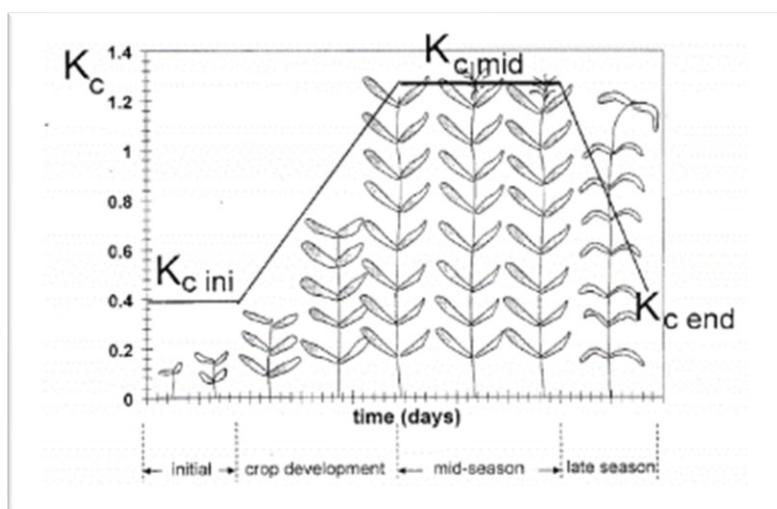
$K_c$  – coeficiente de cultivo, adimensional;

$ET_c$  – Evapotranspiração da cultura;

$ET_o$  – Evapotranspiração de referência.

No ciclo da cultura, utiliza-se mais de um coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), devido as necessidades fisiológicas de água necessário em cada fase fenológica da cultura (Figura 1). Durante a fase inicial tem um coeficiente de cultura constante ( $K_{c\ ini}$ ), durante o estágio de desenvolvimento, os coeficientes são determinados pela interpolação linear entre  $K_{c\ mid}$  e  $K_{c\ ini}$ . O  $K_c$  para o estágio intermediário é denominado  $K_{c\ mid}$ , sendo uma variável constante. E para o final do ciclo se tem uma interpolação linear entre o  $K_{c\ end}$  e o  $K_{c\ mid}$  (HESS; WADZUK; WELKER, 2019).

Figura 1 - Curva do Coeficiente de Cultivo ( $K_c$ ) nas diferentes fases do ciclo de uma cultura.



Fonte: ALLEN et al., 2006.

Outra forma de determinar a lâmina de água para a irrigação é por meio da capacidade de água disponível no solo. Que pode variar depende da textura e da estrutura do solo, logo, é variável com o tipo de solo. Apesar de o conceito de CAD definir que toda a água em sua faixa está disponível para a planta, a água está mais disponível para a planta quando está mais próxima da capacidade de campo. À medida que há extração de água pelo sistema radicular das plantas, o potencial matricial da água no solo reduz, para a planta utilizar essa água precisa de energia para a retirada da água que é mais difícil (MANTOVANI et al.,2009).

#### 4.4 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA

A gestão dos recursos hídricos é a atividade de planejamento, desenvolvimento, distribuição e gestão do uso ideal dos recursos hídricos. A eficiência do uso da água (EUA) é um conceito introduzido há mais de 100 anos por Briggs & Shantz (1913) que mostra uma relação entre a produtividade da planta e o uso da água. A eficiência do uso da água na agricultura é definida como a razão entre a água utilizada e a água retirada como um todo, sendo calculada com base no rendimento de grão ou na biomassa total produzida por unidade de água consumida pelas culturas (Equação 2) (WANG et al., 2019).

$$EUA = \frac{Y}{I+P} \quad (2)$$

Em que:

EUA – eficiência do uso da água, kg.m<sup>-3</sup>;

Y – produtividade, kg. ha<sup>-1</sup>;

I – irrigação, mm;

P – precipitação, mm.

Otimizar a eficiência do uso da água pode ser por meio de diferentes métodos, como o manejo da irrigação e gestão da água na fazenda. O manejo da irrigação é a decisão de quando e quanta água aplicar na cultura. Sempre voltado a maximizar a eficiência da irrigação, aplicando a necessidade exata de água para repor a umidade do solo até o nível desejado (HASANUZZAMAN, 2019). Com o manejo adequado da irrigação é uma forma de otimizar a eficiência do uso da água, aproveitando o máximo do armazenamento de umidade do solo, conserva a água no solo e uso racional dos recursos hídricos (FRANKS et al., 2015).

A alta demanda de água para fins de agricultura irrigada faz com que seja imposta grande pressão sobre a utilização dos recursos hídricos. O uso eficiente da água vêm sendo discutido por diferentes autores em diversas parte do mundo, por exemplo, França (MURGUE; THEROND; LEENHARDT, 2015), Austrália (LEE; ANCEV; VERVOORT, 2012), Gana (AIDAM, 2015), Paquistão (WATTO; MUGERA, 2013), Síria (YIGEZU et al., 2013), União Europeia (FERRAGINA, 2010), Inglaterra (KNOX; KAY; WEATHERHEAD, 2012). Esses debates foram estimulados pela intensificação das mudanças climáticas e como podem afetar os recursos hídricos.

Uma oportunidade promissora para o uso racional da água no setor agrícola é a eficiência do uso da água na agricultura irrigada. Uma vez que as áreas irrigadas têm uma retirada acima de 60% e uma eficiência de irrigação na propriedade inferior a 50%, devido ao dimensionamento hidráulico errôneo, melhorar a eficiência da irrigação tem grande impacto sobre o manejo dos recursos hídricos, logo, impactos no uso e no consumo de água (ZHANG et al., 2019b).

A eficiência do uso da água é uma medida chave para funções acopladas ao ciclo do carbono e água no ecossistema terrestre, é usado para descrever *trade-off* entre a perda de água e o sequestro de carbono no processo de fotossíntese da planta de carbono. As mudanças no clima podem afetar a eficiência do uso da água e compreender como afetam pode gerar informações para o manejo da agricultura em um contexto de mudanças climáticas (BHATTACHARYA, 2019).

Determinar a eficiência da água é de suma importância para a produtividade agrícola, especialmente em locais com restrição de água. As mudanças climáticas afetarão a distribuição temporal e espacial da precipitação, neste contexto, desenvolver pesquisas com que envolvam a irrigação e a eficiência do uso da água é de suma importância para gerar informações de como manejar a irrigação com foco no uso racional da água (SHARMA et al., 2016).

#### 4.5 SOFTWARE AQUACROP

O *AquaCrop* tem como objetivo quantificar a produtividade de diferentes culturas em relação a água e o manejo agrônômico. O software apresenta um algoritmo e procedimentos que modelam a infiltração da água, drenagem, o desenvolvimento da copa e da zona radicular, a taxa de evaporação e transpiração, a produção de biomassa e produtividade. Consegue-se

estudar a mudança dos insumos relacionados a água. Sendo assim, o modelo é adequado para o desenvolvimento de manejo de irrigação e análise de cenários (RAES et al., 2009, 2018a).

A limitação do software é o ambiente computacional, uma vez que o algoritmo é compilado (RAES et al., 2018a), limitando a aplicação do usuário que não consegue vincular o *AquaCrop* diretamente com outros modelos ou adaptar o código para objetivos específicos (BULATEWICZ et al., 2010; GIRARD et al., 2015). Todavia, Foster et al. (2017) propôs um software livre designado *AquaCrop-OS*, com base nas equações do modelo *AquaCrop*.

Rodriguez & Ober (2019) propuseram o pacote para o software R denominado *AquaCropR*, com as mesmas equações do modelo *AquaCrop*. Como o pacote foi desenvolvido em linguagem R permite o usuário ter acesso às equações, como o R utiliza scripts e permite criar interações, loops e outras ferramentas para otimizar os cálculos. Permite a possibilidade de interagir com outros softwares e o processamento de dados em lotes, otimizando o tempo para a execução dos diferentes modelos (VENABLES; SMITH, 2020).

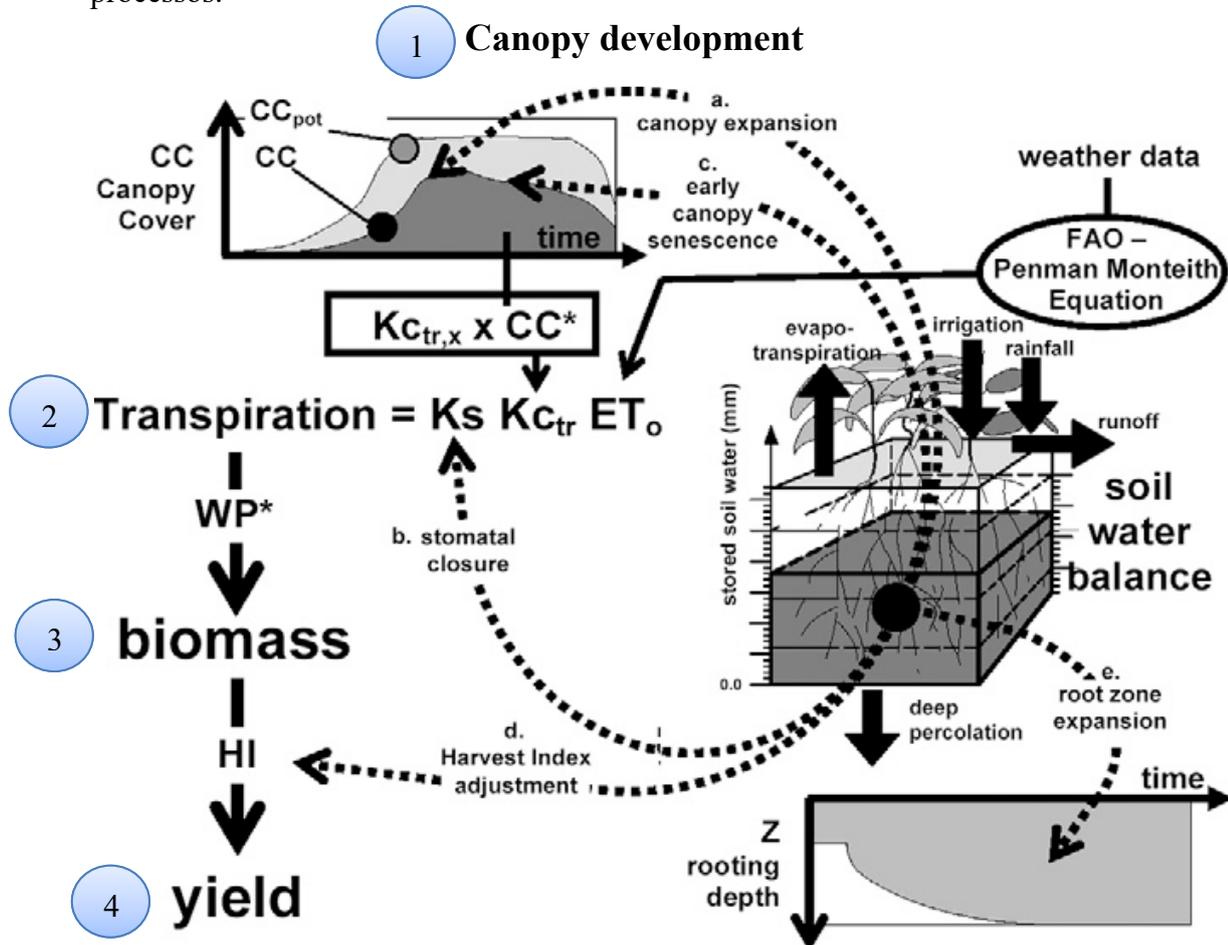
#### 4.5.1 Modelo de Simulação Agrícola *AquaCrop*

O *Aquacrop* é um modelo de simulação de produtividade de culturas, este modelo foi desenvolvido pela *Food and Agricultural Organization* – FAO, o mesmo é uma revisão do FAO – *Irrigation and Drainage Paper 33 -Yeild Response to water* (DOORENBOS; KASSAM, 1979). O modelo tem potencial de simular a produtividade potencial em função de várias condições hídricas (STEDUTO et al., 2012).

O esquema de funcionamento do *AquaCrop* está relacionado com os principais processos e variáveis contabilizadas do sistema solo-planta-atmosfera para estimar a produtividade das culturas (Figura 2). O modelo estima a produtividade final das culturas em basicamente 4 etapas: desenvolvimento do dossel, transpiração da cultura, acúmulo de biomassa, produtividade final (ALLEN et al., 2006; RAES et al., 2018a).

O *AquaCrop* tem como processo condutor o balanço de água no solo. No decorrer do ciclo da cultura, a fração de água armazenada no solo é estimada pelo balanço hídrico. A diminuição da água na zona radicular determina a magnitude do estresse hídrico afetando a expansão da cobertura do dossel (CC), condutância estomática e transpiração (TR), senescência do dossel e índice de colheita (HI) (RAES et al., 2009).

Figura 2. Esquema de simulação do *AquaCrop* com indicação das 4 principais etapas e processos.



Fonte: Adaptado Raes et al. (2009).

O **desenvolvimento do dossel** (1) é alcançado por meio da cobertura verde do dossel (CC) e não através do Índice de Área Foliar (IAF). A cobertura do dossel é a fração da superfície do solo coberta pelo dossel. Esta varia de zero na semeadura até um valor máximo, frequentemente ao atingir a metade do ciclo da cultura. Com o ajuste da quantidade de água no perfil do solo, o software determina a possibilidade de estresse na zona radicular e reflete este sinal na expansão do dossel. Uma vez que o estresse hídrico severo pode resultar em senescência precoce, sendo assim, a cobertura do dossel simulada será menor quando comparado com a cobertura do dossel potencial –  $CC_{pot}$  (RAES et al., 2009).

Em condições ótimas de água no solo, a **transpiração** (Tr) (2) é determinada pela equação 3.

$$Tr = ET_o \cdot Kc_{tr} \quad (3)$$

Em que:

Tr – transpiração;

ET<sub>o</sub> – evapotranspiração de referência;

K<sub>CTR</sub> - transpiração da cultura.

A transpiração da cultura é equivalente ao CC e, desta forma, é ajustado continuamente ao decorrer do ciclo da cultura. Os efeitos do estresse hídrico nas plantas e de prejudicar o desenvolvimento do dossel e depende da severidade o fechamento estomático e, conseqüentemente, afetar a transpiração da cultura (RAES et al., 2009).

A **biomassa acumulada** (B)(3) é equivalente ao acúmulo de transpiração. O fator de proporcionalidade é conhecido como produtividade de água normalizada (WP). A produtividade de água é a relação de produção de biomassa e a quantidade de água utilizada pela cultura. A WP é normalizada para o efeito das condições climáticas, ou seja, a produtividade de água normalizada (WP\*) é válida em diferentes locais, estações e concentrações de CO<sub>2</sub> (RAES et al., 2009).

A **produtividade final** (Y) (4), ou seja, no final do ciclo da cultura é determinada como a relação entre biomassa simulada e do índice de colheita ajustado (HI<sub>adj</sub>). O modelo necessita de variáveis de entrada relacionadas ao clima (temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação), cultura (fases fenológicas em graus.dias ou em dia), solo (capacidade de campo, ponto de murcha permanente, saturação e classe de textura) e práticas de manejo (uso de cobertura morta e manejo de irrigação). Retornando as variáveis de crescimento e produtividade da cultura, balanço de água no solo, conteúdo de água no solo e irrigação requerida, se for o caso (RAES et al., 2009).

No Brasil, diferentes trabalhos têm sido desenvolvidos avaliando-se o modelo *AquaCrop*. Foi avaliado o desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil utilizam o modelo (MINUZZI; LOPES, 2015). SILVA et al., (2018a). Utilizou o modelo para calibrar e validar os dados de produtividade da soja sob diferentes lâminas de irrigação na região de Matopiba, Brasil. As análises estatísticas apresentaram erros aceitáveis na produtividade da cultura da soja em condições climáticas tropicais. Logo, indicando que o modelo pode ser utilizado para simulações em condições de irrigação, dispensando experimento a campo (SILVA et al., 2018)

O modelo *AquaCrop* foi calibrado para irrigação por déficit para a cultura do trigo e mostrou se confiável de precisão sob estresse hídrico. Sendo assim, se torna uma ferramenta muito útil para a avaliação de cenários futuros para avaliar a irrigação e a eficiência do uso da

água. A característica particular que distingue o modelo de outros modelos de cultura é o seu foco na água, especialmente em condições de limitação de água. Examinar a resposta do rendimento a diferentes aplicações de água em experimentos de campo e / ou controlados é trabalhoso e caro. Considerando tais limitações, a modelagem pode ser uma ferramenta útil para estudar e desenvolver estratégias promissoras de irrigação deficitária (ANDARZIAN et al., 2011; IQBAL et al., 2014).

De Souza et al.(2020) propuseram a calibração e validação do modelo para a cultura do trigo na região dos Campos Gerais no Sul do Brasil. O experimento avaliou cinco diferentes cultivares no período de 2007 a 2017. Os dados de entrada no *AquaCrop* – referentes a clima, cultura, solo e manejo do solo. A calibração apresentou bons resultados para todas as cultivares e locais avaliados para a cultura do trigo.

#### 4.6 A CULTURA DO TRIGO

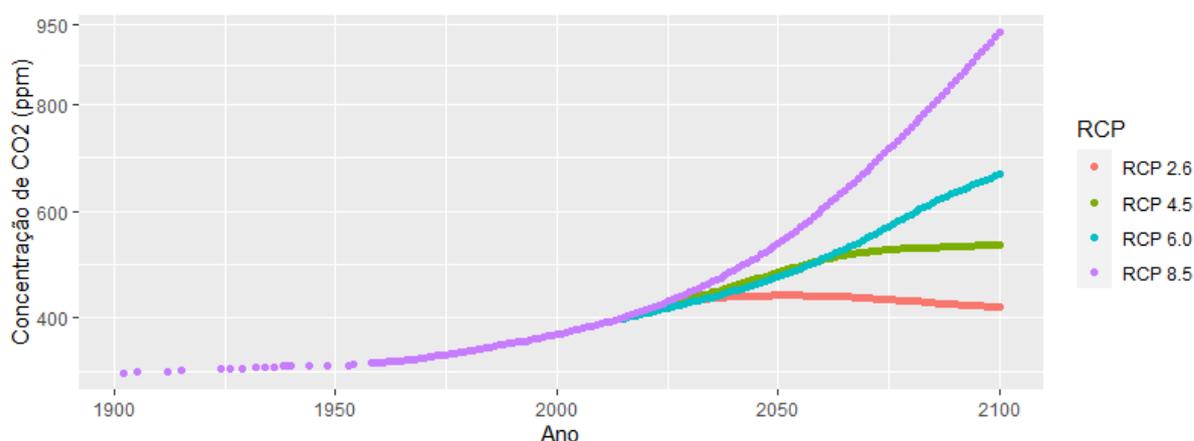
As tendências climáticas em todo o mundo revelam que a produção agrícola pode estar sobre estresse, apesar dos avanços tecnológicos (AHMED et al., 2019). A fenologia das plantas é alterada com o aumento da temperatura, ocasionando um menor tempo da cultura a campo para a interceptação de luz e fotossíntese e, por conseguinte, menor biomassa e rendimento (ASSENG, 2013).

As culturas que possuem a via fotossintética C<sub>3</sub>, atualmente possuem CO<sub>2</sub> abaixo do ideal, mas sob níveis ideais de CO<sub>2</sub> o processo de fotossíntese pode ser estimulado. Isso ocorre devido a níveis ideais de um dos principais reagentes, e ao aumento da fotossíntese líquida e diminuição da transpiração (LONG et al., 2004). Todavia, cada planta tolera concentrações ótimas de CO<sub>2</sub>. Entender esses mecanismos é de suma importância para avaliar os impactos das mudanças climáticas no mundo e, principalmente, na produção agrícola. Uma vez que plantas com adaptadas a altas concentrações ideais de CO<sub>2</sub> podem sofrer menos com as mudanças climáticas devido a maior eficiência do uso da água (XU, 2015).

A cultura do trigo tem necessidades de temperaturas amenas no ciclo vegetativo e temperaturas um pouco mais elevadas em torno de 21°C no ciclo reprodutivo. A ocorrência de temperaturas elevadas na fase vegetativa leva a planta a emitir um número reduzido de perfilho, o que reduzi o número de espiguetas iniciadas e o peso de grão. Já na fase de enchimento de grão, temperaturas elevadas têm a redução de peso do grão e o aumento no teor de proteínas. A

ocorrência de temperaturas baixas nesta mesma fase reduz a qualidade da farinha, ou seja, os extremos de temperaturas são prejudiciais à cultura levando a danos econômicos. Contudo, o aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera pode aumentar a eficiência do uso da água e luz nas plantas de trigo (VARGA et al., 2015), uma vez que nos diferentes cenários projetados se tem o aumento dos níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera (IPCC, 2014) (Figura 3).

Figura 3. Níveis de CO<sub>2</sub> para os diferentes cenários de mudanças climáticas.



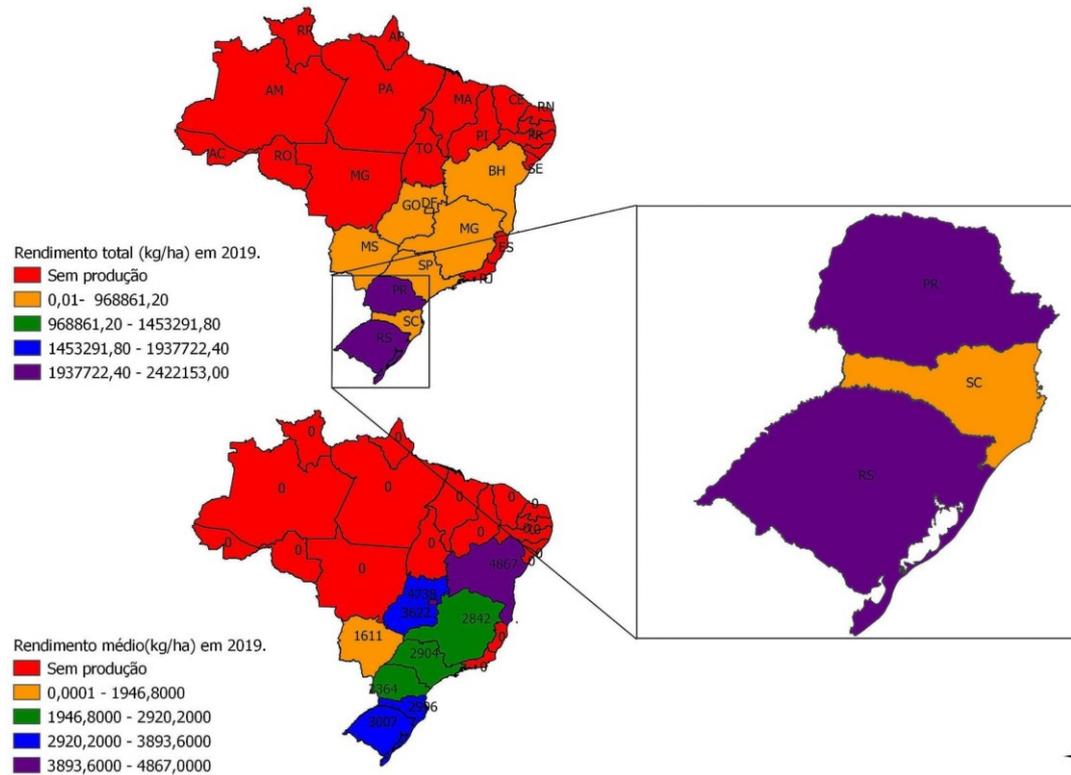
Fonte: Adaptado IPCC,2014.

No Brasil, o trigo é o segundo cereal mais consumido. Seu destino principal é a produção de pães e massas diversas. Além disso, o subproduto da moagem do trigo constitui-se em ingredientes para a alimentação animal. A cultura representa uma importância socioeconômica na região Sul (Figura 4 e 5), sendo a maior produtora, seguida, da região Sudeste (CONAB, 2019).

A produção de trigo no Brasil se concentra essencialmente nos estados do Paraná e Rio Grande do Sul, que constitui 87% da produção nacional. Santa Catarina é o quinto estado maior em produção. Sendo assim, não deixa dúvidas sobre a importância dessa região no abastecimento de trigo no país.

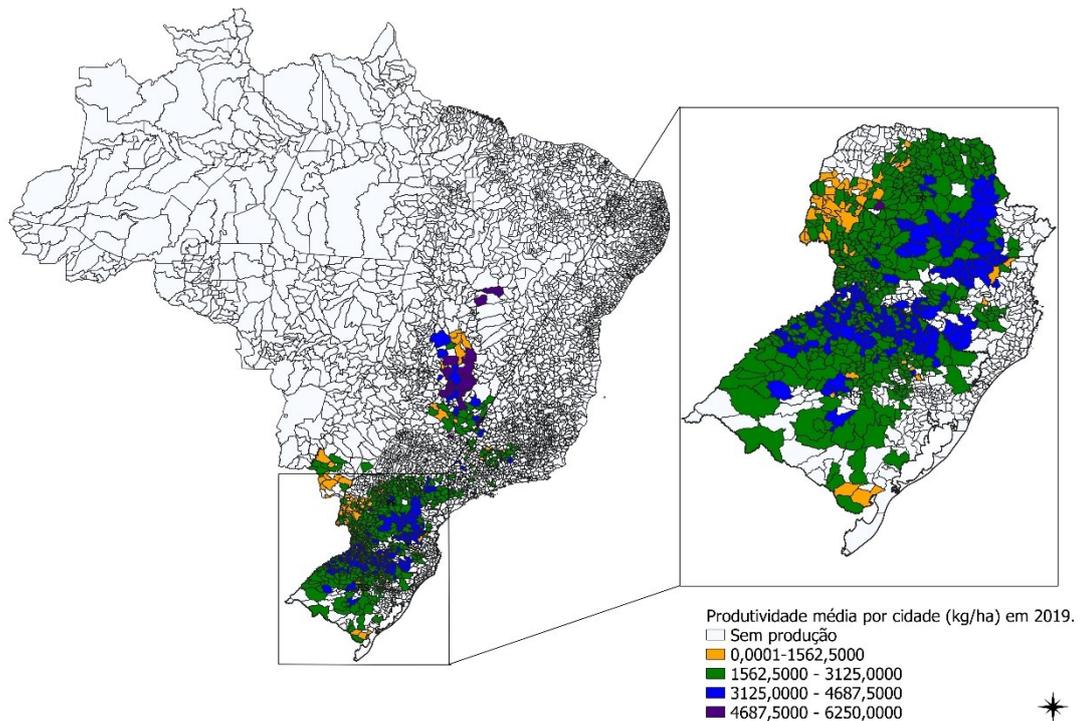
A lavoura de trigo no Brasil é implantada no sistema de plantio direto em mais de 90% das áreas cultivadas. Nos estados de Minas Gerais e Goiás, as lavouras, geralmente são irrigadas. A cultura apresenta distinção em condições climáticas da maioria das culturas de grãos. A cultura tem exigência de temperaturas amenas no início do ciclo, e na fase de floração e granação a preferência é por baixa umidade e temperaturas mais elevadas, de forma a minimizar a disseminação de doenças e proporcionar uma boa qualidade do grão. Fatores ambientais e climáticos impõem dificuldades no planejamento da produção (CONAB, 2018).

Figura 4. Rendimento total e produtividade média do trigo por estado no Brasil em 2019.



Fonte: Adaptado IBGE, 2020.

Figura 5. Produtividade médio do trigo ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) por municípios brasileiros em 2019.



Fonte: Adaptado IBGE, 2020.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A modelagem da cultura do Trigo abrangeu a região Sul do Brasil, compostos pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (Figura 6). Segundo o sistema de Köppen, a área de estudo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina se enquadra na zona fundamental temperada ou C e no tipo fundamental Cf, conhecido como temperado úmido. Visto que a área de estudo este tipo Cf se subdivide em duas variedades específicas, ou seja, Cfa e Cfb (MORENO, 1961).

A variedade Cfa se caracteriza por ter ocorrência de precipitação em todos os meses do ano, inexistente de uma estação seca definida. A temperatura média do ar no mês mais quente de acima de 22°C, e a do mês mais frio superior a 3°C. A variedade Cfb também apresenta precipitação durante todos os meses do ano, tendo a temperatura do mês mais quente inferior a 22°C e temperatura média do ar nos 4 meses mais quente ficam acima de 10°C. Desta forma, de acordo com a classificação de Köppen (1918), o local de estudo fica dividido em duas áreas climáticas, Cfa e Cfb.

No Paraná, além do Cfa e Cfb ocorre o Cwa, se caracteriza por possui clima subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C) ( IAT, 2021).

No estado de Santa Catarina o solo que predomina é o Cambissolo Háptico (31,73%), para o estado do Rio Grande do Sul é o Neossolo Litólico (18,86%) e no Paraná se tem a predominância do solo do Latossolo vermelho (27,31%) (IBGE, 2021).

### 5.2 DADOS CLIMÁTICOS PARA COMPOR O CENÁRIO ATUAL

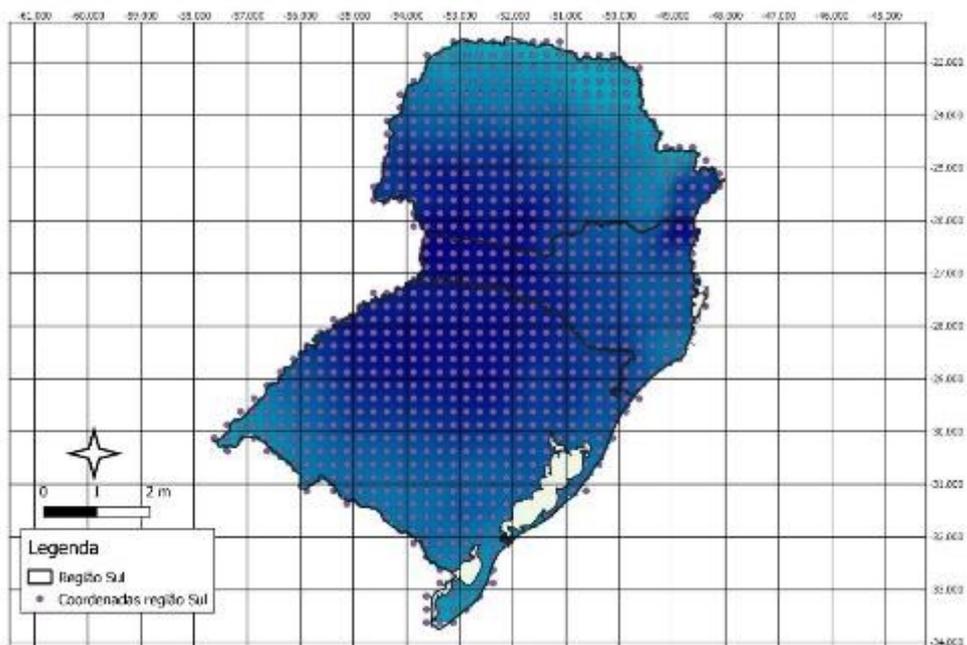
A região de estudo foi o Sul do Brasil, composto pelos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Os dados climáticos de temperatura, precipitação e evapotranspiração de referência utilizados neste trabalho para compor o cenário atual foram do estudo de Xavier, King & Scanlon (2016) a partir das médias de 1985 – 2014.

Aplicou-se um gride composto de 914 pontos para a região em estudo (Figura 6), constituído de latitude, longitude e o número do ponto, subsequentemente, para ser aplicado na

extração das variáveis climáticas de temperatura e precipitação dos dados de Xavier, King & Scanlon (2016).

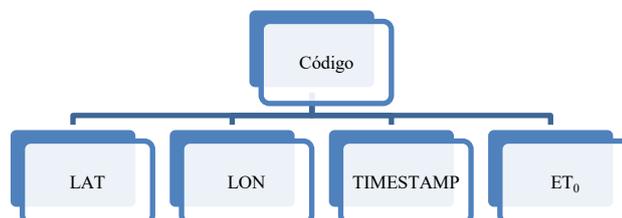
Com a finalidade de automatizar a extração dos dados climático, foi desenvolvido um script no R para extrair as variáveis de cada ponto - composta por coordenadas geográficas de latitude e longitude: latitude (LAT), longitude (LON), data (TIMESTAMP), evapotranspiração ( $ET_0$ ), precipitação (pre), média radiação solar (RH), radiação solar ( $R_s$ ), temperatura máxima ( $T_{ma}$ ), temperatura mínima ( $T_{mi}$ ) e umidade relativa do ar (u2). Em um primeiro momento, foi extraído as variáveis separadas a partir dos dados de Xavier, King & Scanlon (2016) (Figura 7):

Figura 6. Pontos com as coordenadas da região Sul que foi utilizada para obter os dados climáticos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

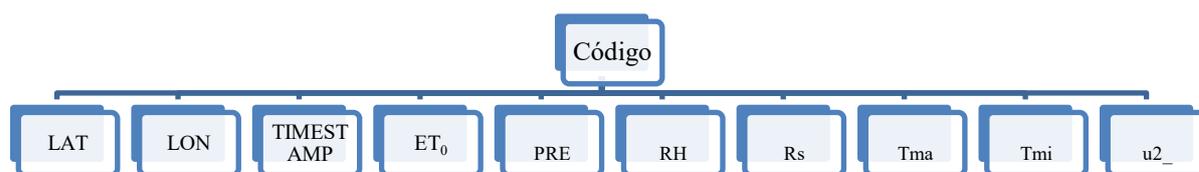
Figura 7. Extração dados climáticos evapotranspiração.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Em seguida, foi criado um script para unir todas as variáveis climáticas, gerado um arquivo de cada ponto com as variáveis para o estudo (Figura 8).

Figura 8. União dos dados climáticos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

## 5.3 DADOS DA CULTURA DO TRIGO

### 5.3.1 Data de semeadura do trigo

Com objetivo de determinar a melhor data de semeadura para a cultura do trigo, foram simuladas vinte e duas datas diferentes de semeaduras (Tabela 2), baseadas no zoneamento agrícola do trigo para a região Sul do Brasil. A primeira data é referente ao início do plantio do trigo no Sul do Brasil até o limite da data de semeadura, com um intervalo entre si de sete dias. Foram simuladas datas mais abrangentes, pois com as mudanças climáticas é possível que haja mudança nas datas de semeaduras. Assim, foram simuladas datas que hoje não são indicadas para a semeadura do trigo conforme o zoneamento climático da cultura.

Tabela 2. Data de semeadura do trigo simuladas para a região Sul do Brasil.

Data de semeadura	
Data semeadura 1	11/03
Data semeadura 2	18/03
Data semeadura 3	25/03
Data semeadura 4	01/04
Data semeadura 5	08/04
Data semeadura 6	15/04
Data semeadura 7	22/04
Data semeadura 8	29/04
Data semeadura 9	06/05
Data semeadura 10	13/05
Data semeadura 11	20/05
Data semeadura 12	27/05
Data semeadura 13	03/06
Data semeadura 14	10/06
Data semeadura 15	17/06
Data semeadura 16	24/06
Data semeadura 17	01/07
Data semeadura 18	08/07
Data semeadura 19	15/07
Data semeadura 20	22/07
Data semeadura 21	29/07
Data semeadura 22	05/08

Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

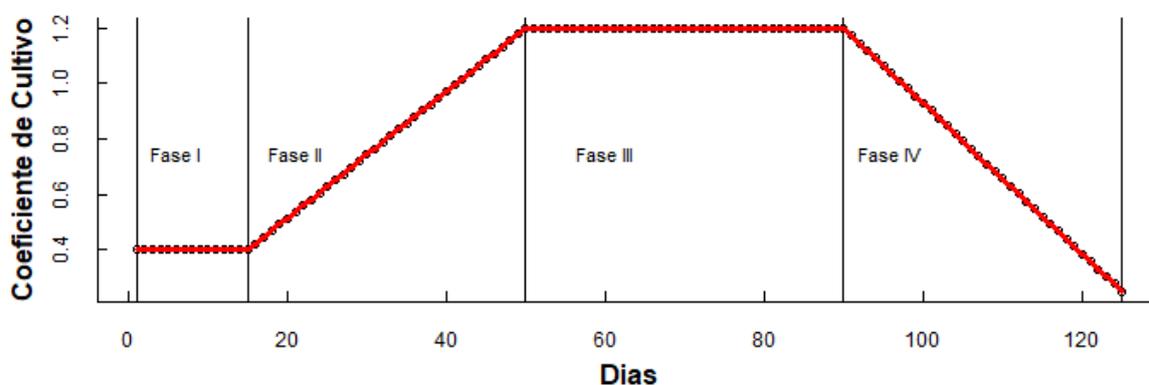
### 5.3.2 Coeficiente de Cultivo

Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) é determinado por: área foliar, características do dossel, albedo e rugosidade. Para cada cultura é determinado um  $K_c$  inicial,  $K_c$  médio e  $K_c$  final, que podem variar dentro de uma cultura e/ou região. Para este estudo foram utilizados os dados que estão disponíveis na FAO 56 (ALLEN et al., 2006)

A curva do  $K_c$  é caracterizada por possuir 4 fases distintas:

- Fase I : Emergência
- Fase II : Crescimento
- Fase III: Pleno crescimento/ reprodutivo
- Fase IV: Maturidade

Figura 9. Fases da curva do Coeficiente de Cultivo para a cultura do trigo precoce.



Fonte: Adaptado ALLEN et al. (2006)

Fase I e Fase III são caracterizadas por ser constantes, e depender exclusivamente do  $K_c$  inicial e  $K_c$  médio (Equações 4 e 6), já a fase II e IV são determinadas pelas equações 5 e 7:

$$Fase I = K_{C_{inicial}} \quad (4)$$

$$Fase II = \frac{K_{C_{médio}} - K_{C_{inicial}}}{F_{II+1}} \quad (5)$$

$$Fase III = K_{C_{médio}} \quad (6)$$

$$Fase IV = \frac{K_{C_{final}} - K_{C_{médio}}}{F_{IV}} \quad (7)$$

### 5.3.3 Determinação do Balanço Hídrico

Para determinar o balanço hídrico da cultura do trigo do período de 1985 – 2014, aplicou-se os dados obtidos na secção 5.1. e foi desenvolvido um script no software R.

Os dados de solos são essenciais para a determinação do Balanço Hídrico, sendo assim, definiu-se a capacidade de armazenamento de água no solo de 9 mm. Após designou-se o primeiro dia do ciclo da cultura separado dos outros dias, uma vez que é necessário ter o parâmetro *DEP<sub>fim</sub>* para determinar o dia seguinte, sendo assim, o primeiro dia da cultura de trigo foi determinado pelas equações 8 a 11:

$$DEP_{ini} [1] = CRA \quad (8)$$

$$irriga [1] = 0 \quad (9)$$

$$Etc [1] = ks.kc [1].Eto [1] \quad (10)$$

$$DEP_{fim} [1] = DEP_{ini} [1] - precipitação [1] + Etc [1] \quad (11)$$

Em que:

DEP<sub>ini</sub> [1] – Retirada de água no início do dia, mm;

Irriga [1] – irrigação no primeiro dia do ciclo do trigo, mm;

Etc [1] – evapotranspiração da cultura no primeiro dia do ciclo, mm;

Kc [1] – Coeficiente de Cultivo da cultura no primeiro dia do ciclo, adimensional;

Eto [1] – Evapotranspiração de referência no dia primeiro dia do ciclo, mm;

DEP<sub>fim</sub> [1] - Retirada de água no final do dia, mm;

Precipitação [1] – Precipitação no primeiro dia do ciclo, mm.

Criado o primeiro dia, foi desenvolvido um loop para determinar do dia dois ao último dia do ciclo da cultura em estudo por meio das equações 12 a 15:

$$DEP_{ini} [i] = DEP_{fim} [i - 1] \quad (12)$$

$$Etc [i] = ks.kc [i] * Eto [i] \quad (13)$$

$$DEP_{fim} [i] = DEP_{ini} [i] - precipitação [i] + Etc [i] \quad (14)$$

$$irriga [i] = DEP_{fim} [i] \quad (15)$$

Em que:

DEP<sub>ini</sub> [i] – Retirada de água no início do dia [i], mm;

DEP<sub>fim</sub> [i-1] – Retirada de água no final do dia anterior [i - 1], mm;

Etc [i] – Evapotranspiração da cultura do dia [i], mm;

Eto [i] – Evapotranspiração de referência do dia [i], mm;

Precipitação [i] - Precipitação no dia [i] do ciclo, mm.

Irriga [i] - irrigação no dia [i] do ciclo do trigo, mm;

No script foram implementadas diversas condições para atender os critérios do cálculo do Balanço Hídricos. Em situações que o *DEP<sub>fim</sub>* foi menor que zero, ou seja, negativo, retorna igual a zero no dia seguinte na variável *DEP<sub>ini</sub>*. A irrigação quando for maior que o CRA ocorre a irrigação, com uma laminada de água igual a *DEP<sub>fim</sub>* e no dia seguinte *DEP<sub>ini</sub>* inicia com valor de zero, caso não ocorra essa condição, não ocorre a irrigação no dia.

#### 5.4 DADOS CLIMÁTICOS PARA COMPOR OS CENÁRIOS FUTUROS

Os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2050 (médias para 2041 -2060) e 2070 (médias para 2061 – 2080) foram projetados utilizando os dados disponíveis pelo WorldClim 1.4 (WORDCLIM, 2021).

Neste estudo, considerou-se os Modelos globais de circulação (GCM) do CMIP5 (Tabela 3) para as variáveis de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação total mensal.

Tabela 3. Modelos globais de circulação do CMIP5 considerados neste estudo para cenário RCP 4.5 e RCP 8.5 – 2050 e 2070.

MODELO (GCM)	RCP 4.5 - 2050	RCP 8.5 - 2050	RCP 4.5 - 2070	RCP8.5 - 2070
ACCESS1-0	x	x	x	x
BCC-CSM1-1	x	x	x	x
CCSM4	x	x	x	x
CESM1-CAM5-1-FV2	x		x	
CNRM-CM5	x	x	x	x
GFDL-CM3	x	x	x	x
GFDL-ESM2G	x		x	
GISS-E2-R	x	x	x	x
HADGEM2-AO	x	x	x	x
HADGEM2-CC	x	x	x	x
HADGEM2-ES	x	x	x	x
INMCM4	x	x	x	x
MIROC-ESM-CHEM	x	x	x	x
IPSL-CM5A-LR	x	x	x	x
MIROC-ESM	x	x	x	x
MIROC5	x	x	x	x
MPI-ESM-LR	x	x	x	x
MRI-CGCM3	x	x	x	x
NORESM1-M	x	x	x	x

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Os modelos globais de clima foram utilizados na projeção de 5 minutos e no formato raster (Tiff). De cada imagem foi extraído as variáveis de: temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação de cada mês, ou seja, cada modelo contém 12 arquivos que correspondem

aos diferentes meses do ano. No software *QGIS* com auxílio do plugin *Point Sampling Tool* foi extraído a temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação total de cada ponto vetorial referente ao grid (Figura 6), para os produtos gerados nos diferentes modelos (Figura 10), subsequentemente, sucedeu-se a criação de um arquivo *.csv* composto pelas coordenadas, número do ponto e a variável de interesses.

Figura 10. Imagem Qgis com grid de pontos para extração das variáveis de interesse.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Para cada modelo foi aplicada a equação 16 para se obter o aumento da temperatura, posteriormente, foi obtido a média para se obter o aumento da temperatura máxima nos diferentes modelos globais de clima, essa metodologia foi aplicada aos RCP 4.5 e 8.5 para cenários 2050 e 2070. Visto que foi aplicado para cada mês do ano, uma vez que a temperatura vai variar em longitude e latitude e em diferentes meses. O método citado anteriormente foi replicado para os dados de temperatura mínima (equação 17) e precipitação total mensal (equação 18).

$$CF_{TMax} = TMax_{futura} - TMax_{atual} \quad (16)$$

$$CF_{TMin} = TMin_{futura} - TMin_{atual} \quad (17)$$

$$CF_{Pre} = Pre_{futura} - Pre_{atual} \quad (18)$$

Em que:

$CF_{TMax}$  – Cenário futuro para a temperatura máxima, °C;

$CF_{TMin}$  - Cenário futuro para a temperatura mínima, °C;

$CF_{Pre}$  – Cenário futuro para precipitação, mm;

$TMax_{futuro}$  – Temperatura máxima do GCMs, °C;

$TMax_{atual}$  – Temperatura máxima atual, °C;

$TMin_{futuro}$  – Temperatura mínima do GCMs, °C;

$TMin_{atual}$  – Temperatura mínima atual, °C;

$Pre_{futuro}$  – Precipitação do GCMs, mm;

$Pre_{atual}$  – Precipitação atual, mm;

Desta forma, obteve-se a variação na temperatura e precipitação em cada ponto nos diferentes cenários. Para criar os cenários foi utilizado o cenário atual (item 5.1) somado à variação da temperatura e precipitação obtidas por meio dos modelos globais de clima. Foi utilizada a equação proposta por McClooud (1955) (equação 19), baseada em temperatura para determinar a evapotranspiração de referência dos diferentes cenários.

$$ET = 0,254 * 1,07^{1,8 * Tmean} \quad (19)$$

Em que:

ET – evapotranspiração de referência, mm;

Tmean – Temperatura média diária, °C.

### 5.5 AQUACROPR

A eficiência do uso da água foi simulada por meio do pacote *AquaCropR* que determina a produtividade, irrigação, evapotranspiração de referência entre outros fatores. Todavia, deve-se informar variáveis para o banco de dados para simulação, onde se destaca uma série temporal de concentração de CO<sub>2</sub>, temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação, evapotranspiração de referência para o cenário atual (1985 - 2014) e cenários futuros (RCP4.5 e RCP4.8, 2050 e 2070) que foi descrita no idem anterior.

O pacote utiliza as mesmas equações que o modelo proposto pela FAO *AquaCrop*, todavia, em linguagem *R*. O benefício do modelo em linguagem *R* usuário é a possibilidade de automatizar os códigos, o que permitiu que os 914 pontos fossem calculados com um único algoritmo. Foi desenvolvido um script que automatiza a geração dos dados de da água para cada ponto do grid, subsequentemente, os dados gerados foram salvos em arquivos .csv.

As características físico-hídricas do solo consideradas foram: capacidade de campo (cc) de 39%, ponto de murcha permanente (PMP) de 23%, saturação de 50% e condutividade hidráulica saturada (Ksat) de 125 mm/dia<sup>-1</sup>. Ainda foi considerada uma cobertura vegetal de 50% para o solo, já que mais de 90% do trigo no Brasil utiliza o plantio direto. Neste contexto, optou-se por trabalhar com um solo classificado como *Clay Roam* (Franco-argiloso), que é representado pela composição de 34% de argila, 33% de argila, 33% de silte e com matéria orgânica de 2,50%.

Para a simulação da cultura do trigo foram utilizados os dados em graus - dias (Tabela 4), o que permite uma fenologia mais precisa. Os dados conservacionistas da cultura e manejo são descritos na Tabela 5.

Tabela 4. Duração das fases fenológicas em graus-dias utilizados no *AquaCrop*.

Dados do Cultivo (DAS*)	°C - dias
Emergência	150
Máxima Cobertura	864
Florescimento	1300
Duração do Florescimento	200
Senescência	1700
Maturidade	2400

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Legenda: \*DAS – Dias Após Semeadura.

Tabela 5. Dados de entrada da cultura e manejo conservacionistas utilizados para os parâmetros do modelo *AquaCrop*.

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
<b>CC<sub>o</sub></b>	Cobertura inicial do solo com 90% de emergência de plântulas (%)	1,50
<b>CGC</b>	Coefficiente de crescimento do dossel (% dia <sup>-1</sup> )	0,005
<b>CC<sub>x</sub></b>	Máxima cobertura do dossel (%)	96
<b>CDC</b>	Coefficiente de declínio do dossel (% dia <sup>-1</sup> )	0,004
<b>Z<sub>min</sub></b>	Profundidade mínima efetiva do sistema radicular (m)	0,1
<b>Z<sub>max</sub></b>	Profundidade máxima efetiva do sistema radicular (m)	0,3
<b>fshape<sub>r</sub></b>	Fator descrevendo a expansão da zona radicular	1,5
<b>Kcb</b>	Coefficiente da cultura com completa expansão do dossel	1,10
<b>WP*</b>	Produtividade de água normalizada para ET <sub>0</sub> e CO <sub>2</sub> (g.m <sup>-2</sup> )	15
<b>WP<sub>y</sub></b>	Produtividade de água normalizada para ET <sub>0</sub> e CO <sub>2</sub> durante a formação de rendimento (%)	100
<b>p<sub>up1</sub></b>	Limite superior de depleção da água no solo para expansão do dossel	0,20
<b>p<sub>up1</sub></b>	Limite inferior de depleção da água no solo para expansão do dossel	0,65
<b>Fshape<sub>w1</sub></b>	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	5
<b>Psto</b>	Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático	0,65
<b>Fshape<sub>w2</sub></b>	Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático	2,50
<b>Psen</b>	Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel	0,70
<b>Fshape<sub>w3</sub></b>	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	2,50
<b>Ppol</b>	Limite superior de depleção de água no solo para falhar a polinização	0,85
	Volume (%) no ponto anaerobiótico (com referência para saturação)	5,00
<b>Tmin<sub>up</sub></b>	Mínima temperatura do ar abaixo da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo frio; °C)	5
<b>Tmax<sub>up</sub></b>	Máxima temperatura do ar acima da qual o começo da polinização começa a falhar (estresse pelo calor; °C)	35
<b>GDD<sub>up</sub></b>	Mínimo em graus requerido para completa produção de biomassa (°C dia <sup>-1</sup> )	14

Fonte: Adaptado RAES et al.(2018b).

O manejo da irrigação pelo modelo do *AquaCropR* pode ser realizado com as opções: sem irrigação - levando em consideração apenas a precipitação - ou com base na umidade do solo ou por irrigação em um intervalo fixo. No presente estudo considerou-se a ocorrência de eventos de irrigação controlada pelas condições de umidade do solo. Para simular considerou-se um cenário sem irrigação e com os tratamentos de irrigação com água disponível no solo em condições 50, 75, 95 e 100% .

A eficiência do uso da água é um indicador para quantificar o impacto das decisões de manejo da irrigação no que diz respeito à gestão da água. No sistema de produção agrícola é usado para definir a relação entre produção agrícola por unidade de volume de água. Todavia, pode ser referente ao rendimento final de grão e a evapotranspiração acumulativa da cultura. Neste estudo, a eficiência do uso da água foi determinada das duas formas: considerando a precipitação e irrigação (Equação 17) e somente a evapotranspiração (Equação 18).

$$EUA_{I+P} = \frac{Y}{I+P} \quad (20)$$

$$EUA_{ETc} = \frac{Y}{ETc} \quad (21)$$

Em que:

$EUA_{I+P}$  – eficiência do uso da água,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

$EUA_{ETc}$  – eficiência do uso da água,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

$ET_c$  – Evapotranspiração da cultura, mm;

I – irrigação, mm;

P – precipitação, mm;

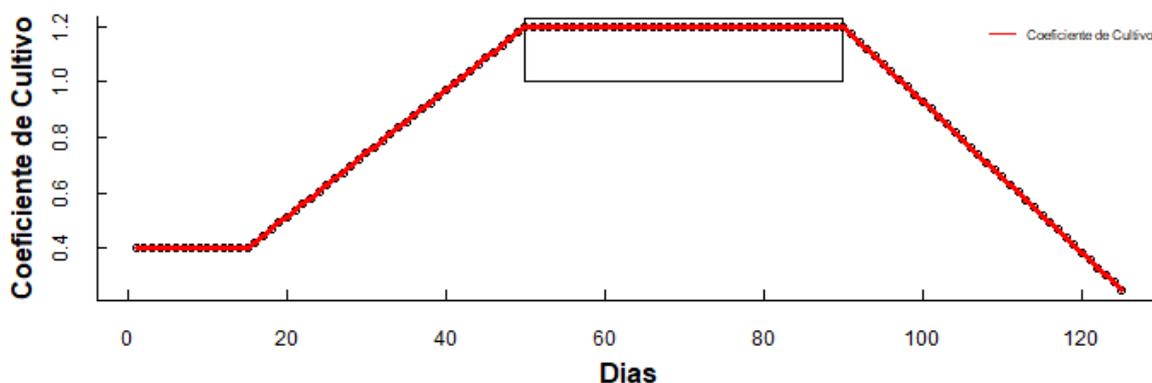
Y – rendimento,  $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

## 6 RESULTADOS

### 6.1 COEFICIENTE DE CULTIVO

A cultura do trigo apresenta diferentes coeficientes de cultivo durante o ciclo (Figura 11), e conhecer como o coeficiente de cultivo se comporta ao longo do ciclo da cultura pode fornecer informações importante sobre o manejo da irrigação. Para esta cultura, a FAO 56 fornece os coeficientes de cultivo para os diferentes estádios do trigo. Conforme a Figura 11, mostra um pico no coeficiente de cultivo quando se tem processos de floração até a maturidade fisiológico, que ocorre o enchimento do grão, a falta de água nestes estádios pode comprometer o desenvolvimento da cultura, que posteriormente a essa fase, tem o declínio da necessidade de água.

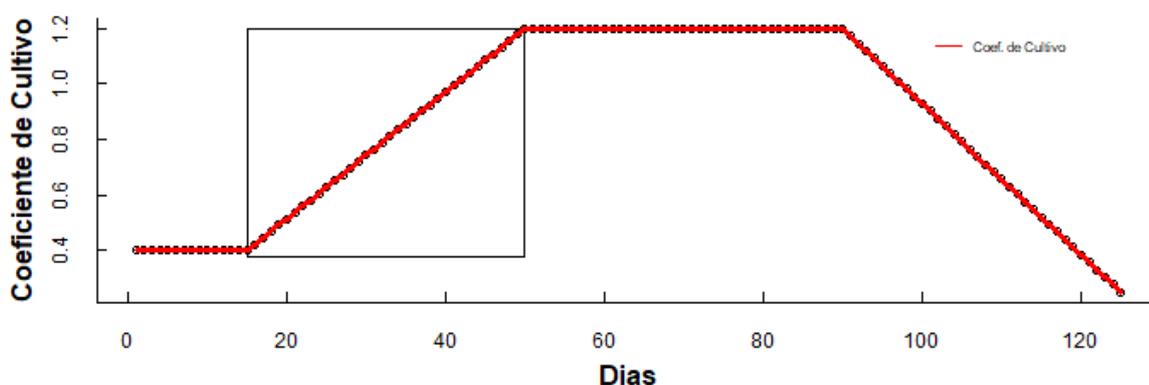
Figura 11. Curva do Coeficiente de Cultivo da cultura do Trigo.



Fonte: Adaptado Allen et al. (2006).

Já o início do pico ocorre após alguns dias da germinação, onde a necessidade de frio para a planta perfilhar se faz necessária, assim, como a necessidade de água aumenta por estar relacionada ao crescimento da planta (Figura 12)

Figura 12. Fase II da curva do Coeficiente de Cultivo.



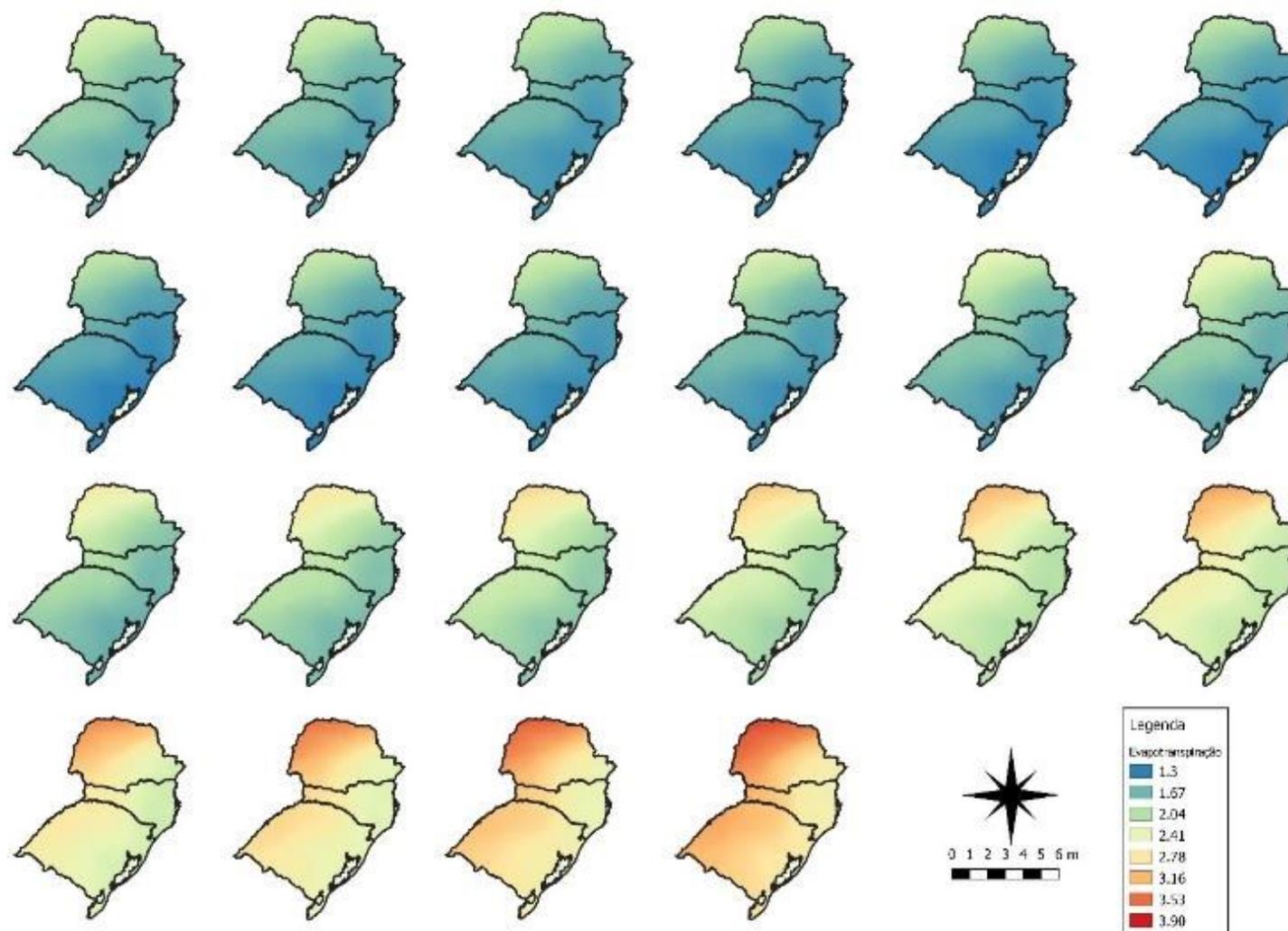
Fonte: Adaptado FAO 56.

## 6.2 BALANÇO HIDRICO

Com os dados climáticos de trinta anos foi determinado o balanço hídrico para as vinte e duas datas de semeaduras diferentes. Utilizou-se as médias de evapotranspiração, irrigação e precipitação (Figuras 13, 14 e 15) para o ciclo da cultura de 125 dias, que é caracterizado por uma variedade precoce.

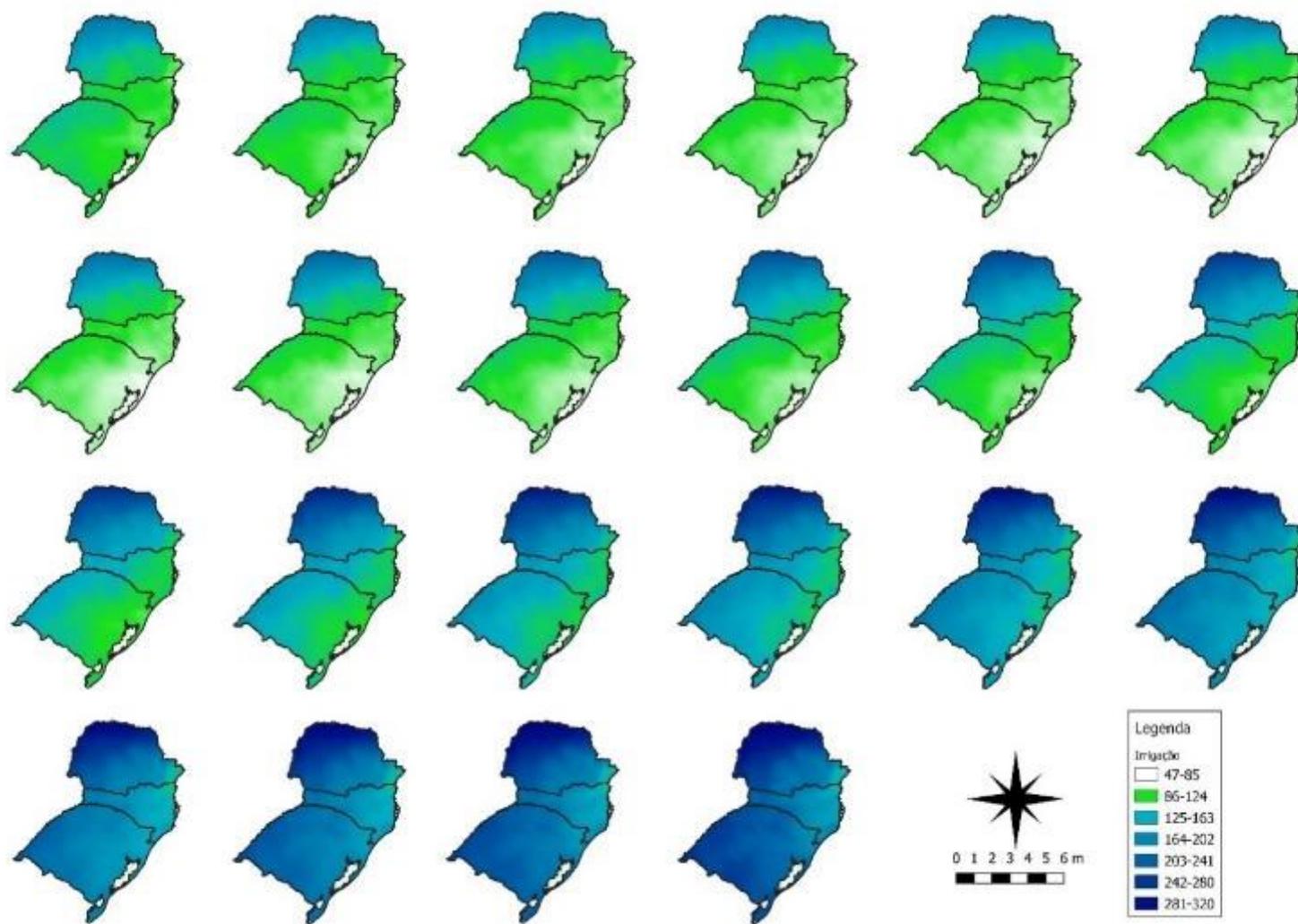
Consequentemente, maior evapotranspiração no ciclo da cultura faz com que a necessidade de irrigação seja maior (Figura 14), uma vez que para não ocorrer o fechamento estomático em elevadas evapotranspirações da cultura e necessário ter disponível para a planta água facilmente disponível no solo. O estado do Paraná acaba tendo uma maior necessidade de irrigação para a cultura, se comparado aos outros dois estados, que pode ser atribuído as baixas precipitações (Figura 15) durante o ciclo da cultura.

Figura 13. Evapotranspiração determinada pelo Balanço Hídrico com 22 datas de semeadura para o ciclo da cultura do trigo com série de dados de 1985 a 2014, para região sul do Brasil.



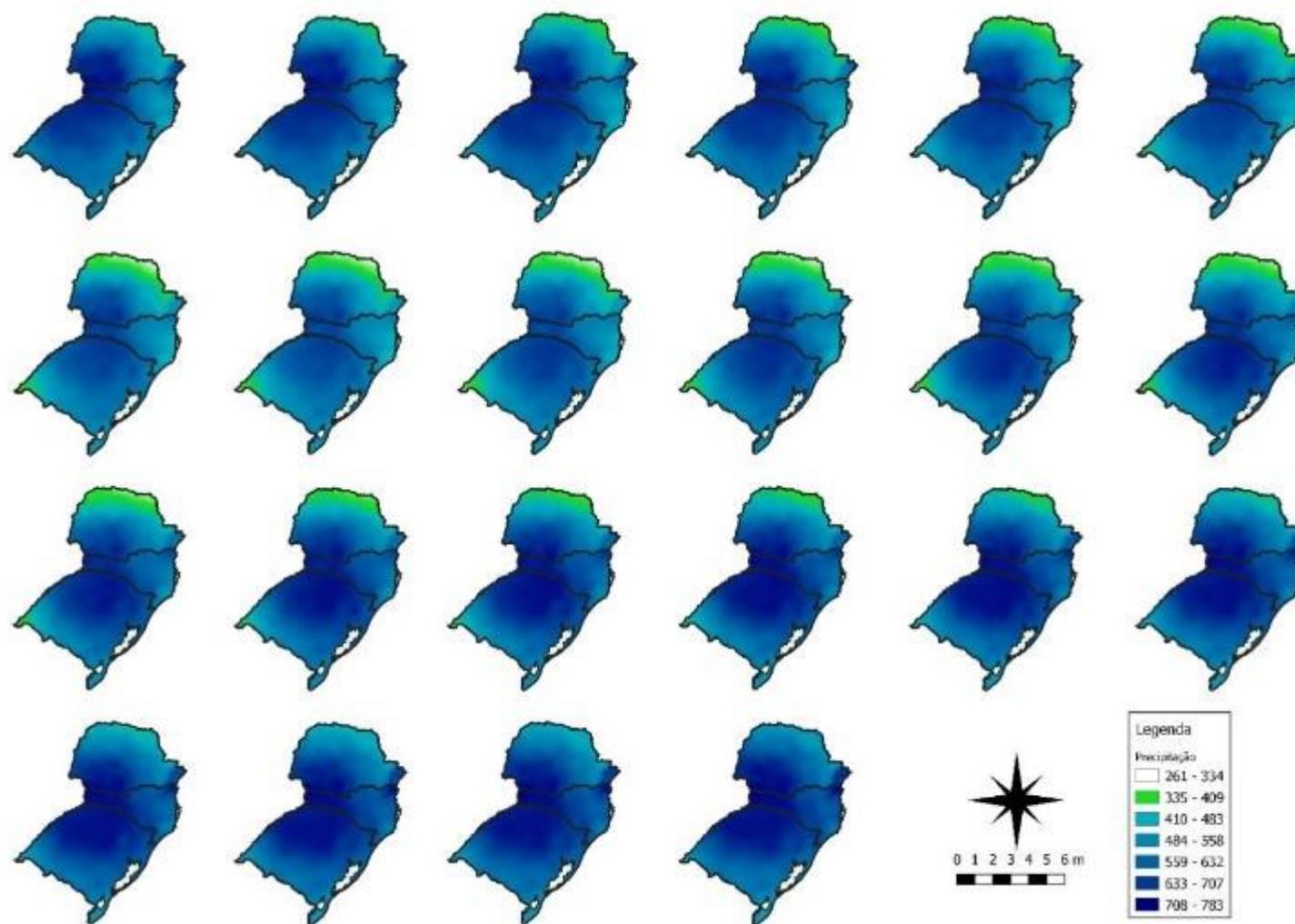
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 14. Irrigação determinada pelo Balanço Hídrico com 22 datas de semeadura para o ciclo da cultura do trigo de 1985- 2014.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 15. Precipitação para diferentes datas de semeadura para o ciclo da cultura do trigo de 1985- 2014.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

## 7 DADOS AQUACROP

### 7.1 CENÁRIOS MODELADOS PELO *AQUACROP*

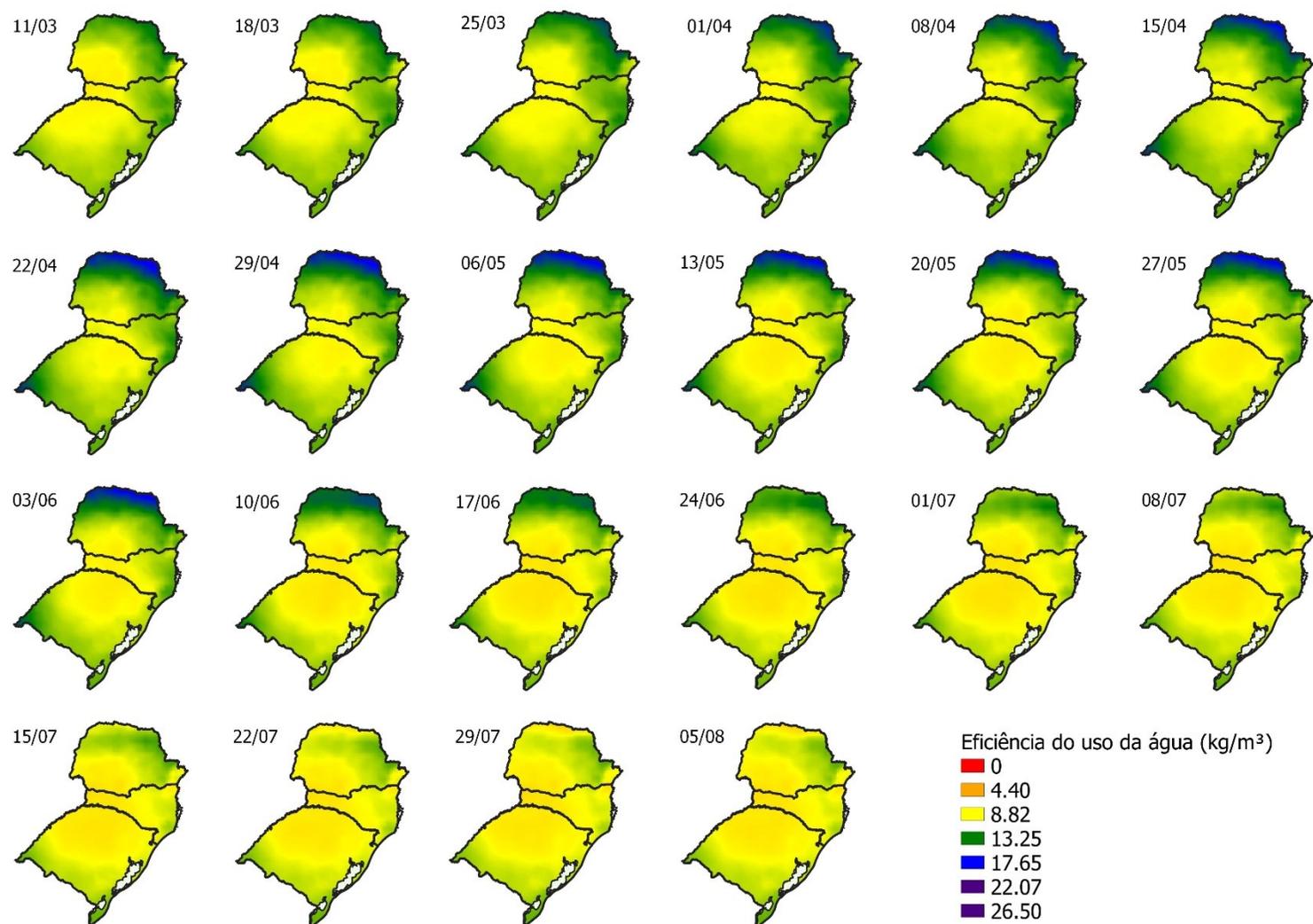
Com intuito de entender como a eficiência do uso da água será afetado em um contexto de mudanças climáticas, se faz necessário entender como a cultura do trigo reagiu ao clima em um período de trinta anos (1984 – 2014). No cenário atual para as diferentes datas de semeadura a cultura respondeu muito bem ao cultivo não irrigado (Figura 16). Sendo observado as maiores eficiências de uso da água no modelo de agricultura sequeira, todavia, deve se ter um cuidado, pois no modelo foi determinado uma cobertura vegetal de 50%. Segundo Bragagnolo & Mielniczuk a utilização de cobertura morta reduz a evaporação da água no solo, a água fica mais disponível para processos como de transpiração da planta.

As maiores eficiências de uso da água foram observadas no Norte do Paraná (Figura 16) que possui em alguns locais o clima Cwa (IAT, 2020). O clima Cwa tem como característica menores precipitações durante o cultivo do trigo do que o clima Cf. Mesmo as menores precipitações foram suficientes para manter a produtividade do trigo. É fundamental identificar a necessidade hídrica responsável pelas máximas produções.

A distribuição irregular e a redução dos volumes de chuvas durante o crescimento vegetativo da cultura causam prejuízos. Identificar uma ótima data de semeadura e lâmina de irrigação tem como benefício a otimização da eficiência do uso da água. Neste estudo proposto foi observado que uma lâmina de 50% (Figura 17) mantém elevada eficiência do uso da água, se comparado ao cultivo sequeiro (Figura 16). Em contrapartida, neste estudo verificou-se que os tratamentos de 75, 95 e 100% de água disponível no solo (Figura 18, 19, 20) não resultaram em um aumento de eficiência de uso da água. O acréscimo de disponibilidade de água no solo não refletiu em aumento de produção de grãos pela cultura do trigo.

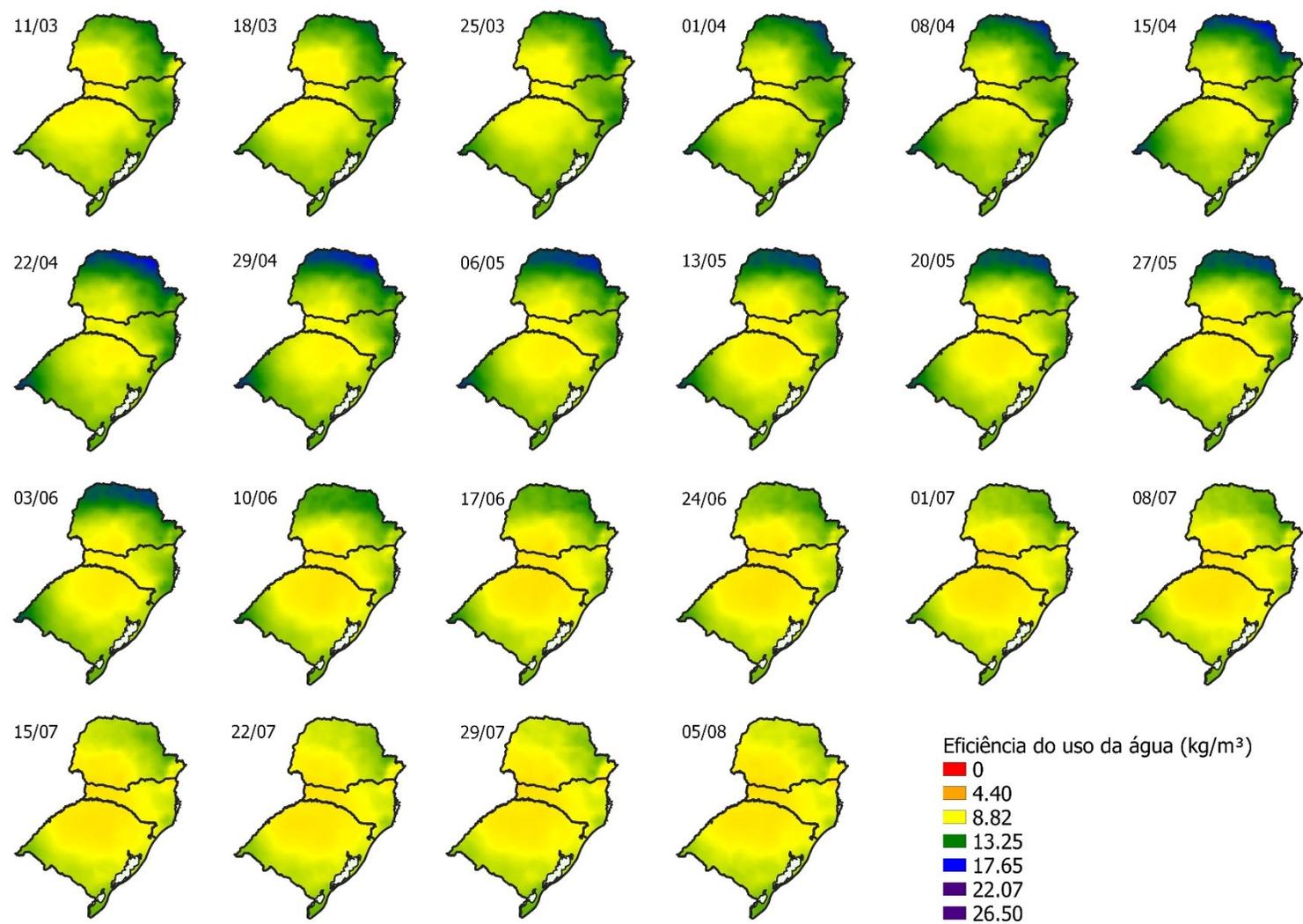
Com o aumento das lâminas de água constatou-se que as datas de plantio 15/07, 22/07, 29/07 e 05/08 tiveram uma menor eficiência do uso da água. Esse efeito pode estar relacionado as altas precipitações mais a irrigação ao longo do ciclo e que a cultura não respondeu em produção de grãos. O efeito do estresse hídrico na cultura do trigo é mais prejudicial na semeadura, a escolha de uma ótima data de semeadura pode resultar em aumento de produtividade, assim como, em eficiência do uso da água. A data de semeadura em períodos que a planta é suprida a necessidade de água por meio da precipitação, apresenta melhor eficiência do uso da água.

Figura 16. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário atual.



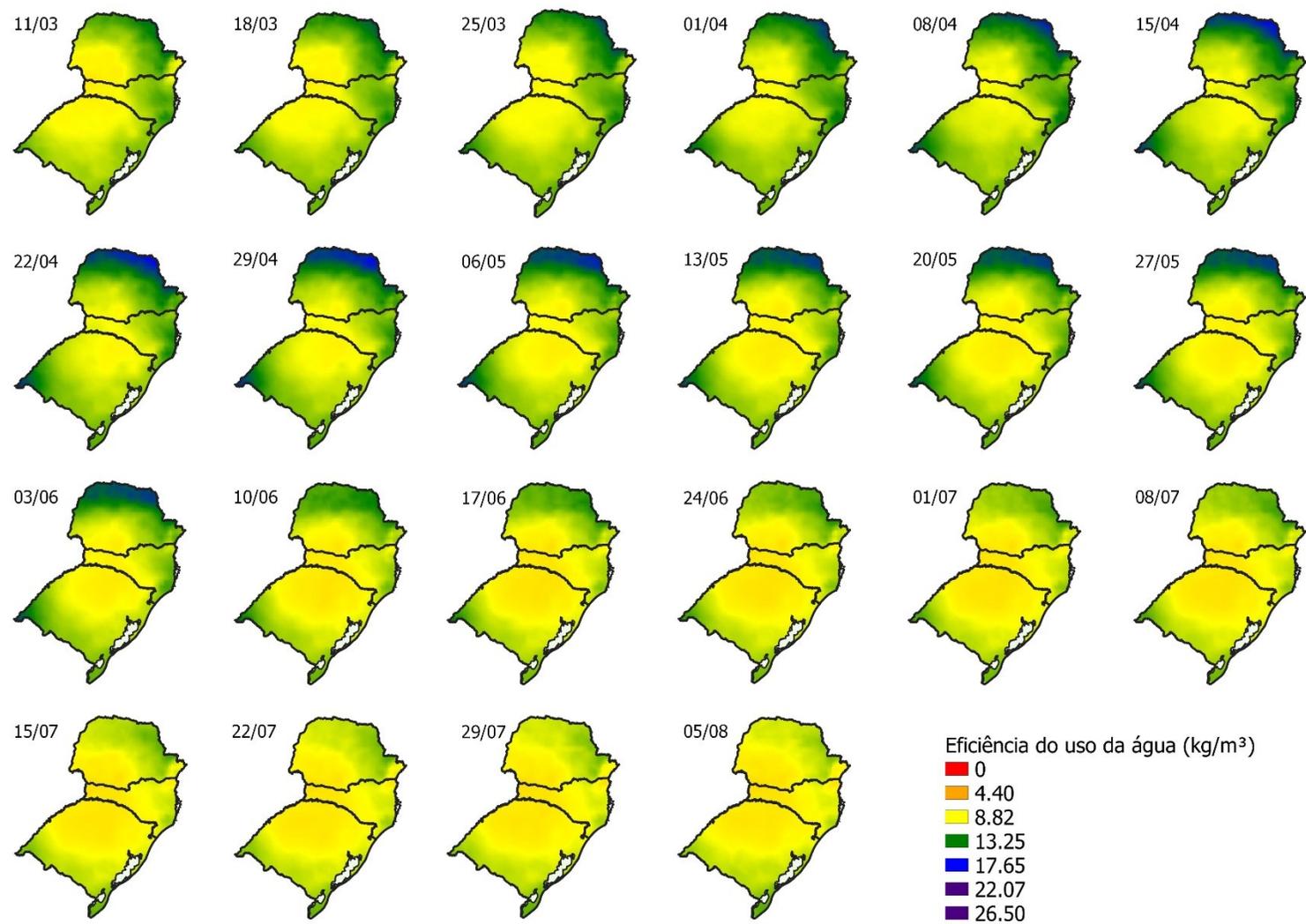
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 17. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário atual.



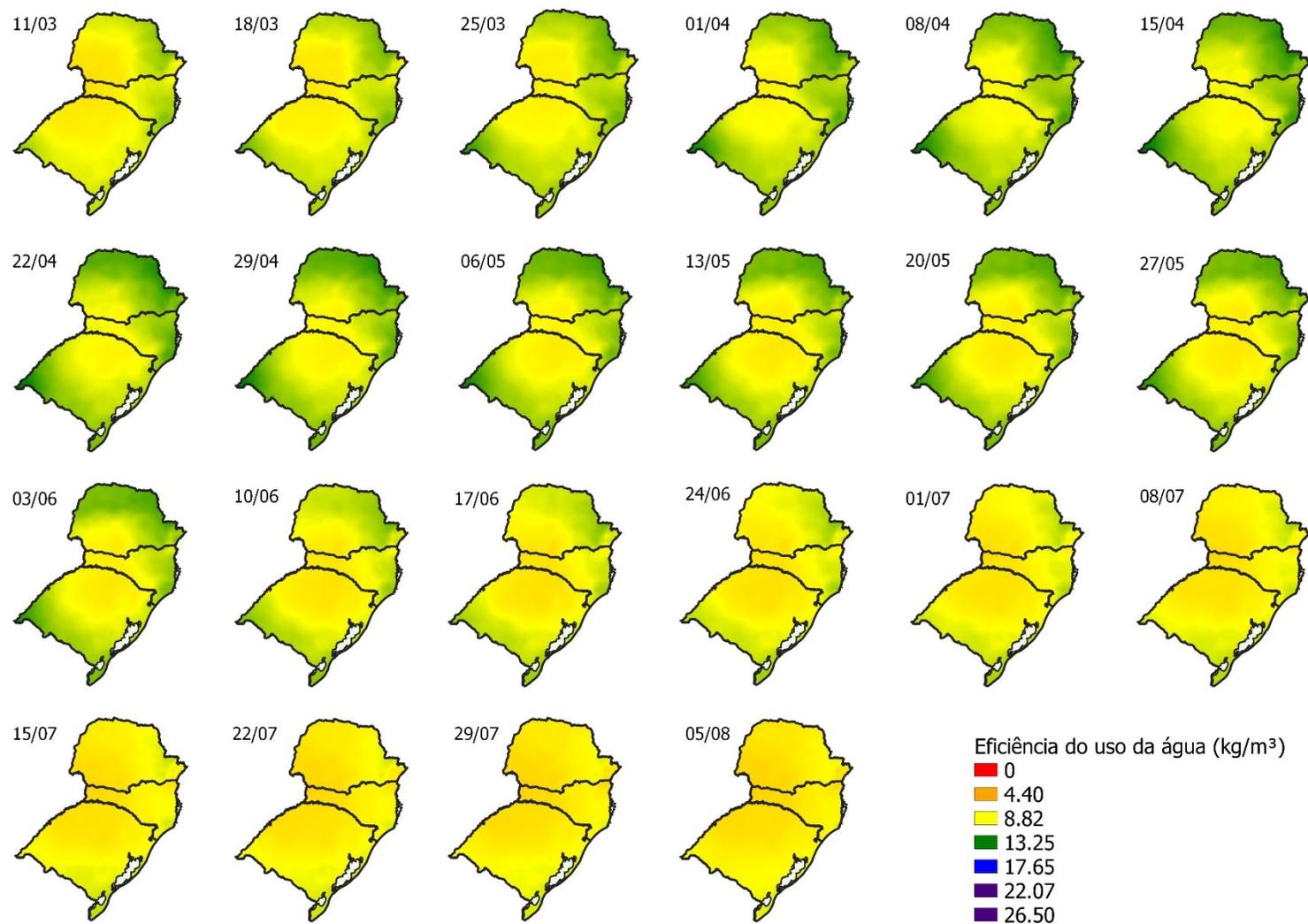
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 18. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário atual.



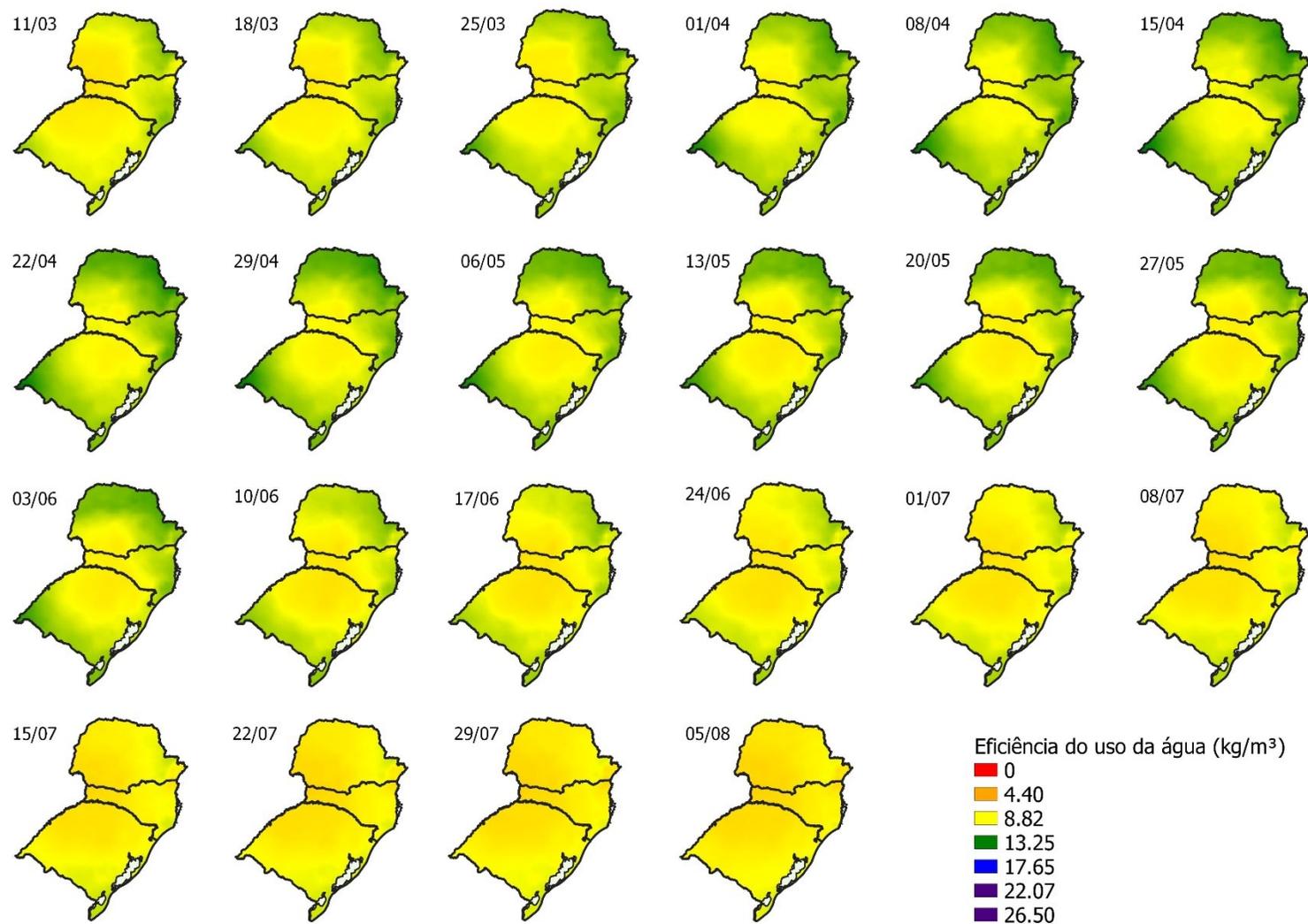
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 19. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário atual.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 20. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário atual.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Os impactos das mudanças climáticas, como aumento de temperatura e mudança na precipitação sobre a eficiência do uso da água são avaliados para a cultura do trigo. Os efeitos da fertilização do CO<sub>2</sub> podem contrabalançar as perdas de rendimentos, as projeções realizadas mostram um aumento máximo de produção na cultura do trigo sequeiro na região Sul de 17,23 e 29,73%, respectivamente em meados do século para o cenário RCP 4.5 e RCP 8.5.

Todavia, as perdas de produção chegam a 98,83 e 99,19%, no cenário RCP 4.5 e 8.5. Uma das causas de perda de produção se justifica pela mudança espacial e temporal da precipitação no Norte do Paraná, a água via precipitação não suprirá as necessidades da planta em nas datas de semeaduras no mês de março e no final de junho início de agosto (Figura 21), sendo necessário a aplicação de água via irrigação. Por meio de uma lâmina de irrigação de 50% as datas de semeaduras simuladas para a região Sul terão uma produção mínima de 4610 kg.ha<sup>-1</sup>(Figura 63), viabilizando a cultura, em virtude do aumento na temperatura máxima que ultrapasse o limite tolerável da cultivar podem impactar em estresse térmico para a cultura. Por exemplo, já se tem o cultivo de trigo no Cerrado, mas são cultivares diferentes que para a região Sul.

No cenário projetado pelo IPCC 4.5 2050 descrito na literatura como mais otimista verificasse que para o trigo sequeiro, a data de semeadura será de suma importância para o sucesso ou o fracasso na cultura no Sul do Brasil (Figura 21). As datas de semeaduras 11/03, 18/03 e 25/03, 24/06, 1/07, 8/07, 15/07, 22/07, 29/07 e 05/08 são as menos indicadas para o plantio de trigo sequeiro no Norte do Paraná em um cenário RCP 4.5 2050. A produção será afetada radicalmente, sendo menor que a média nacional até perda de produção total.

Contudo, a escolha da data de semeadura com base na eficiência do uso da água para a cultura sequeira pode ser uma estratégia em um contexto de mudanças climáticas (Figura 21), utilizando da melhor forma as chuvas para suprir a necessidade de água da planta, conseqüentemente, resultando em melhores produções para a cultura. Neste contexto as datas de semeadura do trigo são indicadas com base na eficiência do uso da água são: 22/04, 29/04, 06/05, 13/05, 20/05, 27/05 e 03/06.

Nos locais com baixa produtividade do trigo sequeiro (Figura 63), em que haverá limitação de disponibilidade de água via precipitação, o trigo irrigado (Figuras 64, 65, 66 e 67) terá uma maior eficiência do uso da água, porquanto que nestes locais a cultura irrigada responde em aumento produtividade (kg.ha<sup>-1</sup>). A irrigação pode ter um potencial de ser uma estratégia adaptativa para os cenários futuros em que a demanda de água via precipitação não suprir as necessidades hídricas da planta.

Definir a lâmina ideal é de suma importância, por exemplo a lâmina de 100% viabiliza o desenvolvimento da cultura no norte do Paraná. Em consequência pode ter uma menor eficiência do uso da água pela cultura não usar toda a água disponível no solo e converter em grão. Sendo assim, uma menor lâmina de irrigação viabiliza o plantio e como resposta tem uma maior eficiência do uso da água como foi observado neste estudo de caso uma lâmina de 75% ( Figura 23).

Ao verificar os cenários RCP 4.5 2050 sem irrigação (Figura 21) e com irrigação (Figura 22, 23, 24, 25) foi observado uma menor eficiência do uso da água principalmente em Santa Catarina e Rio Grande do Sul com irrigação. À medida que aumenta a lâmina de irrigação para os tratamentos definidos foi observado uma redução na eficiência do uso da água. Isso se justifica pela razão de o trigo não responder a água disponível no solo nas fases de enchimento de grão e por ter água disponível na fase de semeadura que é considerada uma das fases mais críticas ao estresse hídrico. Há também a possibilidade de o regime de chuvas nestes locais aumentar com as mudanças climáticas. A cultura não ser submetida ao estresse térmico, conquanto a temperatura aumente nestas localidades permanece na faixa do ótimo para a cultura do trigo, contudo, ocorre o encurtamento do ciclo. O uso de cobertura morta na simulação como um método conservacionista faz com que ocorra menor perda de água no solo por evaporação, mesmo com a elevação da temperatura e melhora a eficiência do uso da água quando considera a precipitação e irrigação.

A eficiência do uso da água está relacionada a data de semeadura. A necessidade de irrigação combinada com a data de semeadura mais propícia pode reduzir a lâmina aplicada na cultura, com base na precipitação. No estudo de caso proposto, estudando especificamente o Norte do Paraná mostra que a escolha da data de semeadura pode definir o sucesso ou fracasso da cultura. Enquanto, as datas 01/04, 08/04, 15/04, 22/04, 06/05, 13/05, 20/05, 27/05, 03/06, 10/06, 17/06 e 24/06 foi observada as maiores eficiência no trigo sequeiro (Figura 21). Em contrapartida nas datas de 11/03, 18/03, 25/03, 01/07, 08/07, 15/07, 22/07, 29/07 e 05/08 foi observado as menores eficiências do uso da água para a mesma região. Destacando que em no norte do Paraná possui valores muito próximo e, ou igual a zero, para produtividade ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) por quantidade de água ( $\text{m}^3$ ).

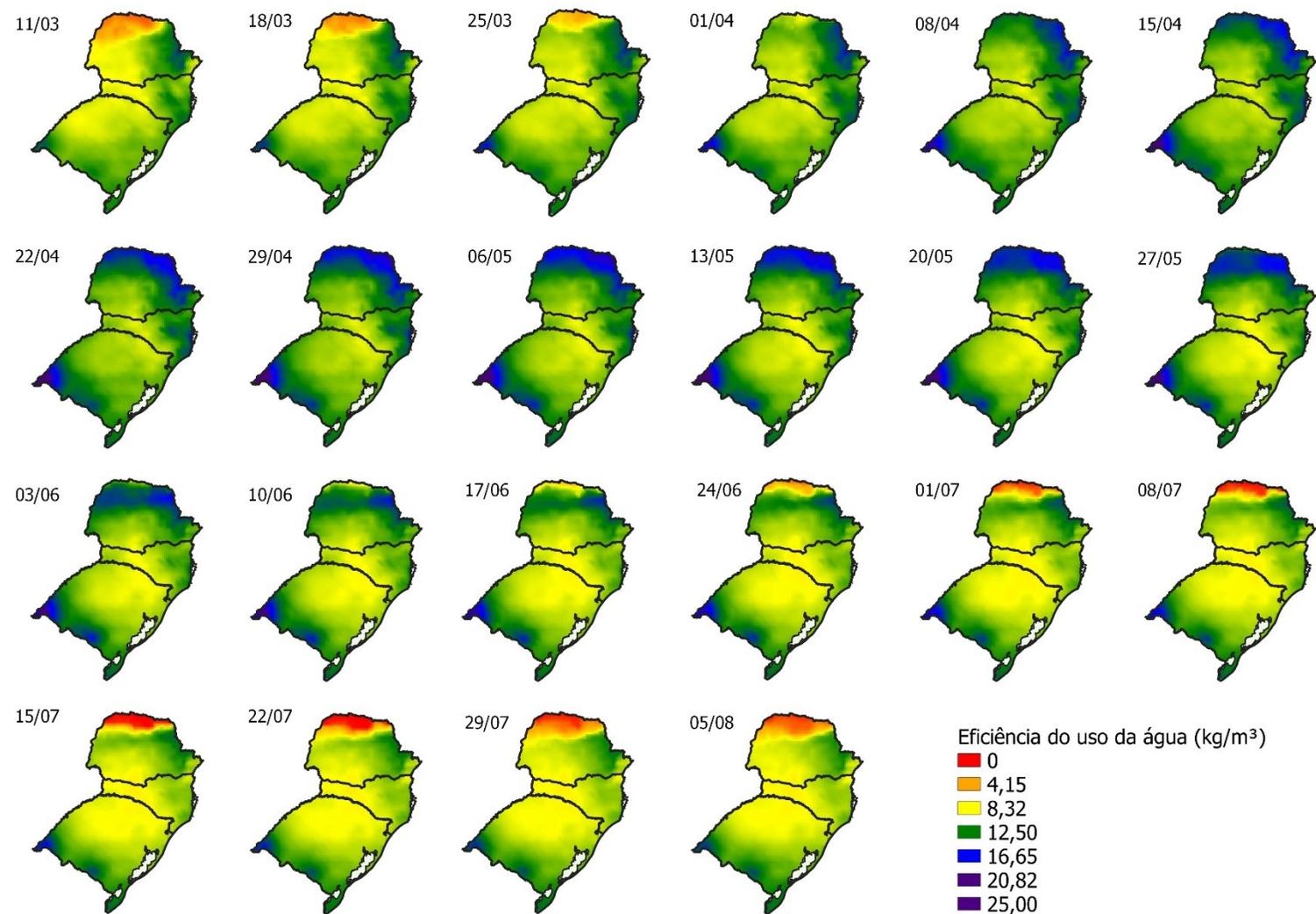
Na região da campanha no Rio grande do Sul que está localizada na fronteira oeste foi observado as maiores eficiências do uso da água (Figura 21). Na forma sequeira da cultura as datas de semeaduras 15/04, 22/04, 29/04, 06/05, 13/05, 20/05, 27/05, 03/06 e 10/04 se observou as maiores eficiências do uso da água para a cultura. Nesta região foi observada com irrigação (Figura 22, 23, 24 e 25) ou sem irrigação (Figura 21) as maiores eficiências do uso da água. Ou

seja, não é porque a irrigação proporciona uma maior abrangência de datas de semeadura que não se deve usar a data de semeadura como parâmetro em um cultivo irrigado. A combinação de data de semeadura com a lâmina de irrigação ideal resulta em um melhor uso da água.

Na modelagem proposta as lâminas de 50% e 75% tiveram os melhores resultados em eficiência do uso da água, dependendo da região (Figura 22 e 23). Enquanto, que as lâminas de 95 e 100% (Figura 24 e 25) mostraram menores eficiências do uso da água. Estratégias de usar uma lâmina menor mostrou-se muito eficiente no consumo racional da água.

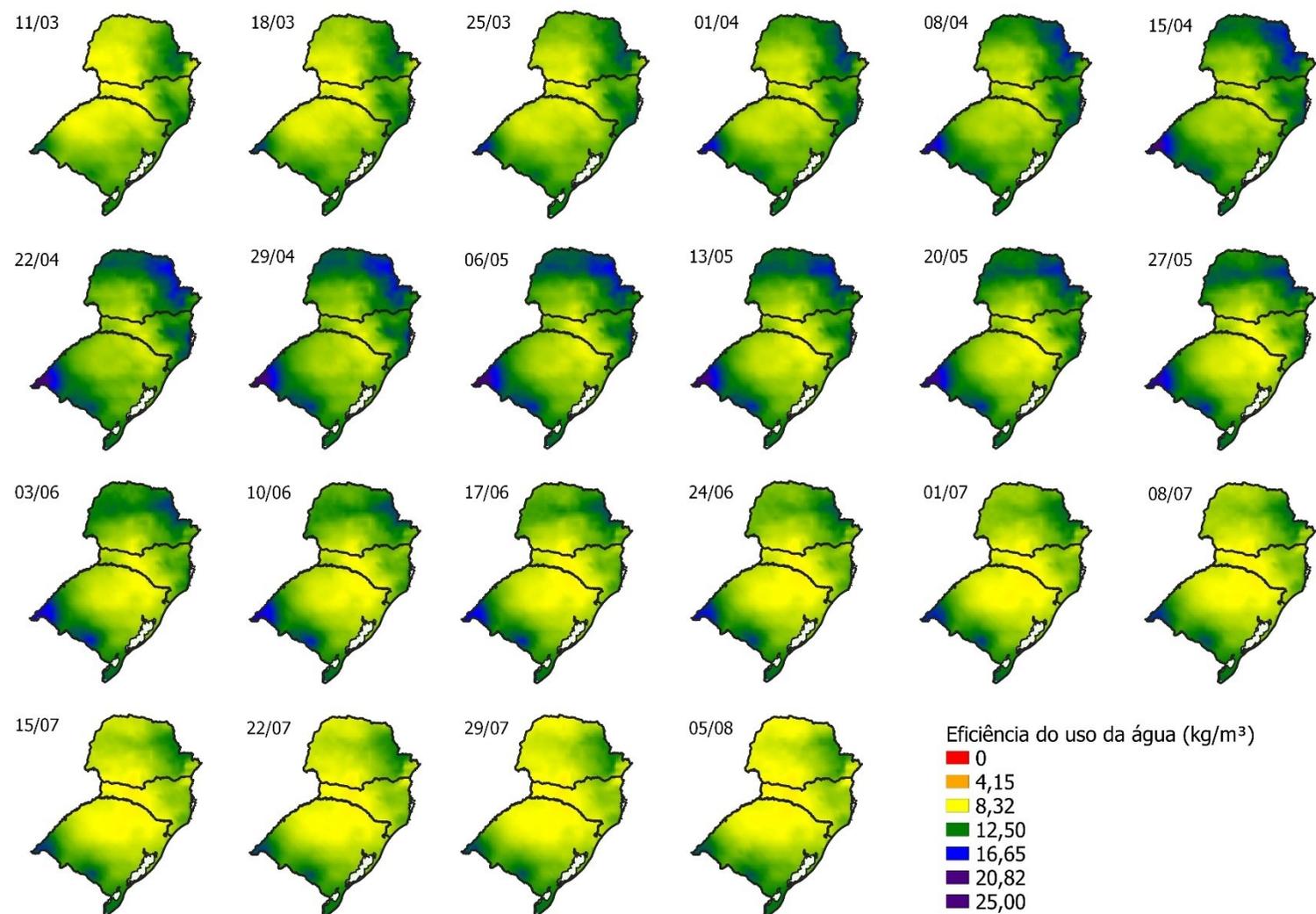
As lâminas de 75, 95 e 100% não refletiram em aumento significativo de produtividade, uma vez que as produtividades foram quase que similares. Porém, ao aumentar a lâmina de água neste estudo, houve uma menor eficiência do uso da água para os tratamentos de 75, 95 e 100% devido ao fato da planta não ter transformado a quantidade disponível de água que foi fornecida via irrigação em produtividade da cultura.

Figura 21. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.



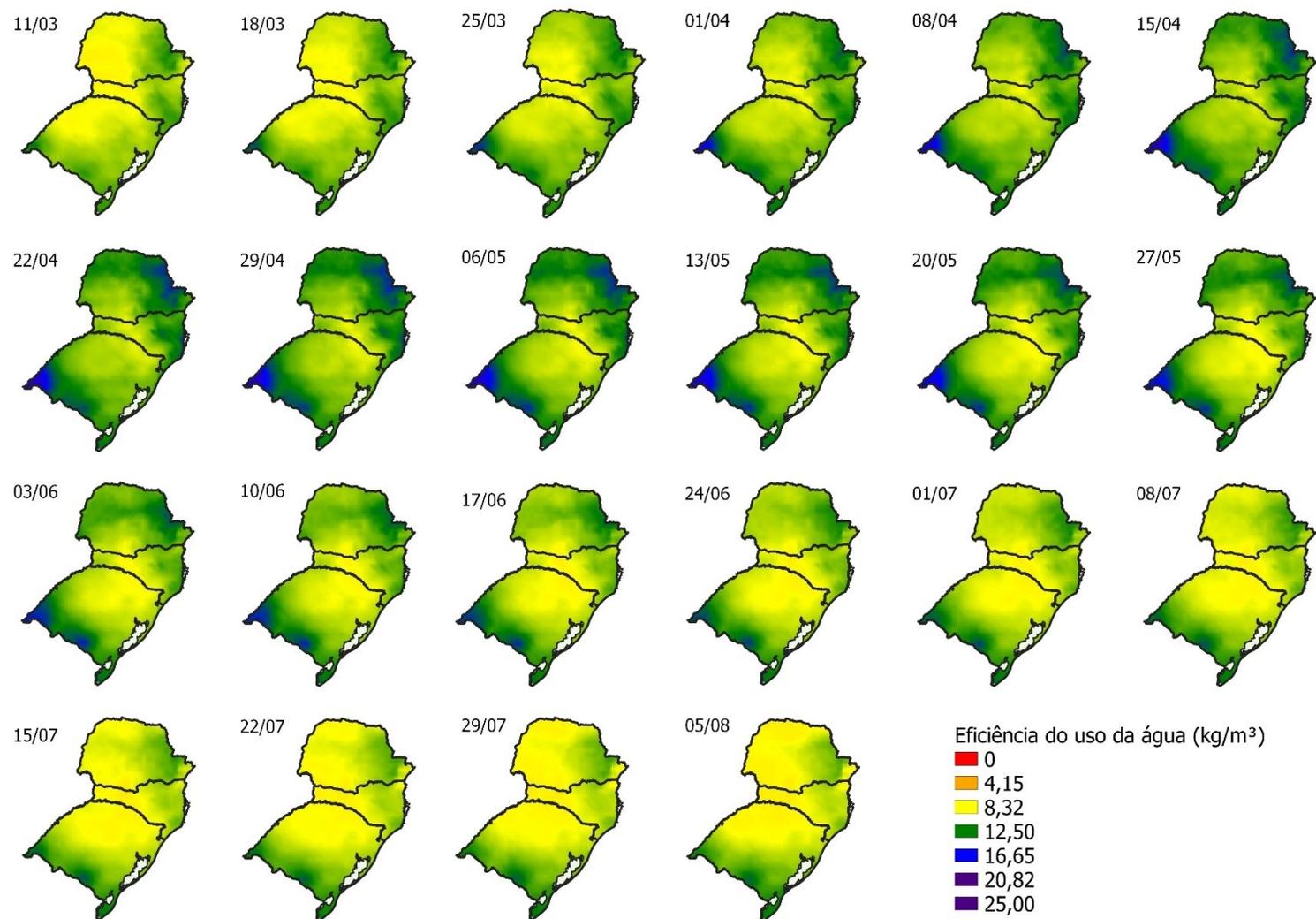
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 22. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.



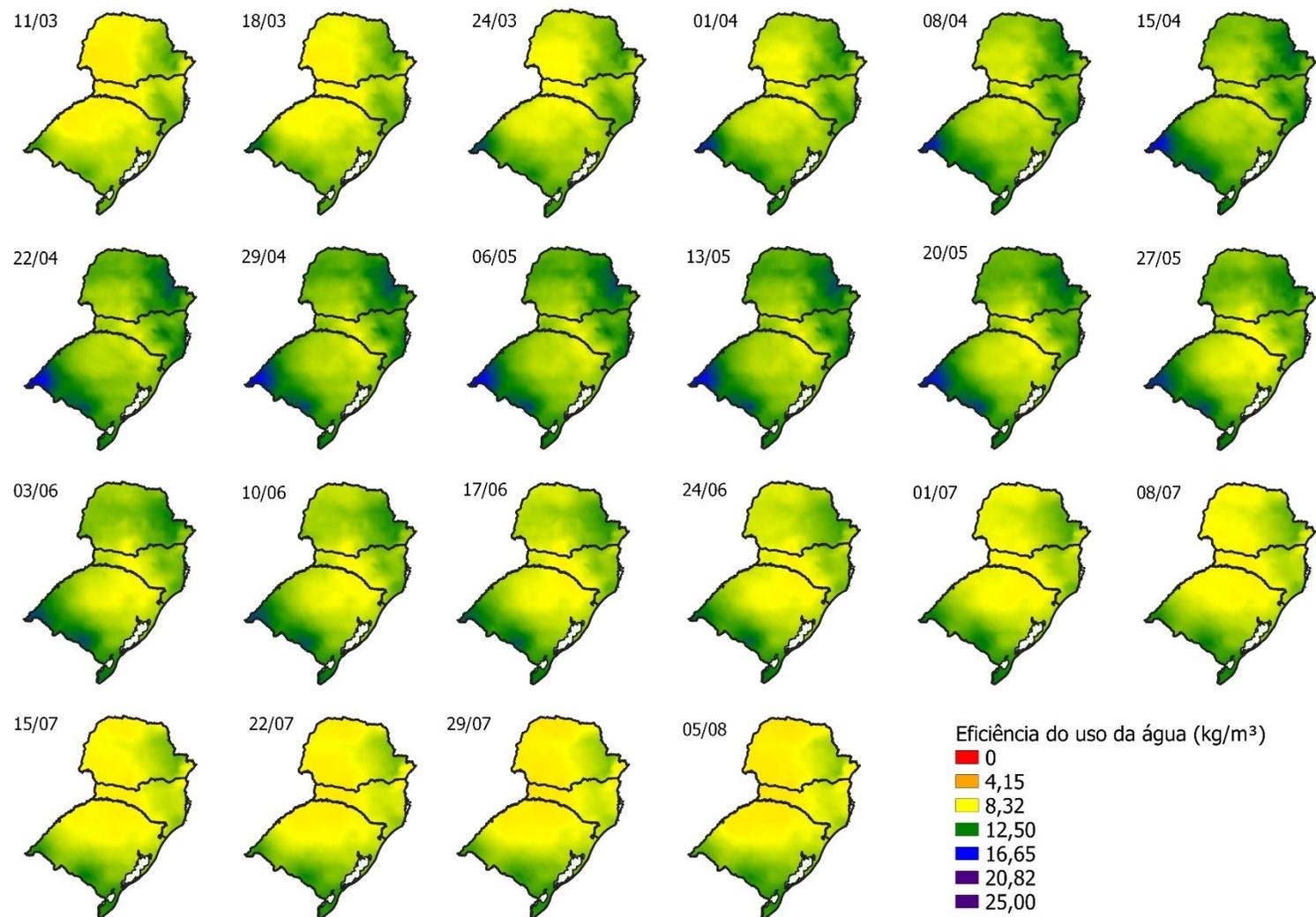
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 23. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050



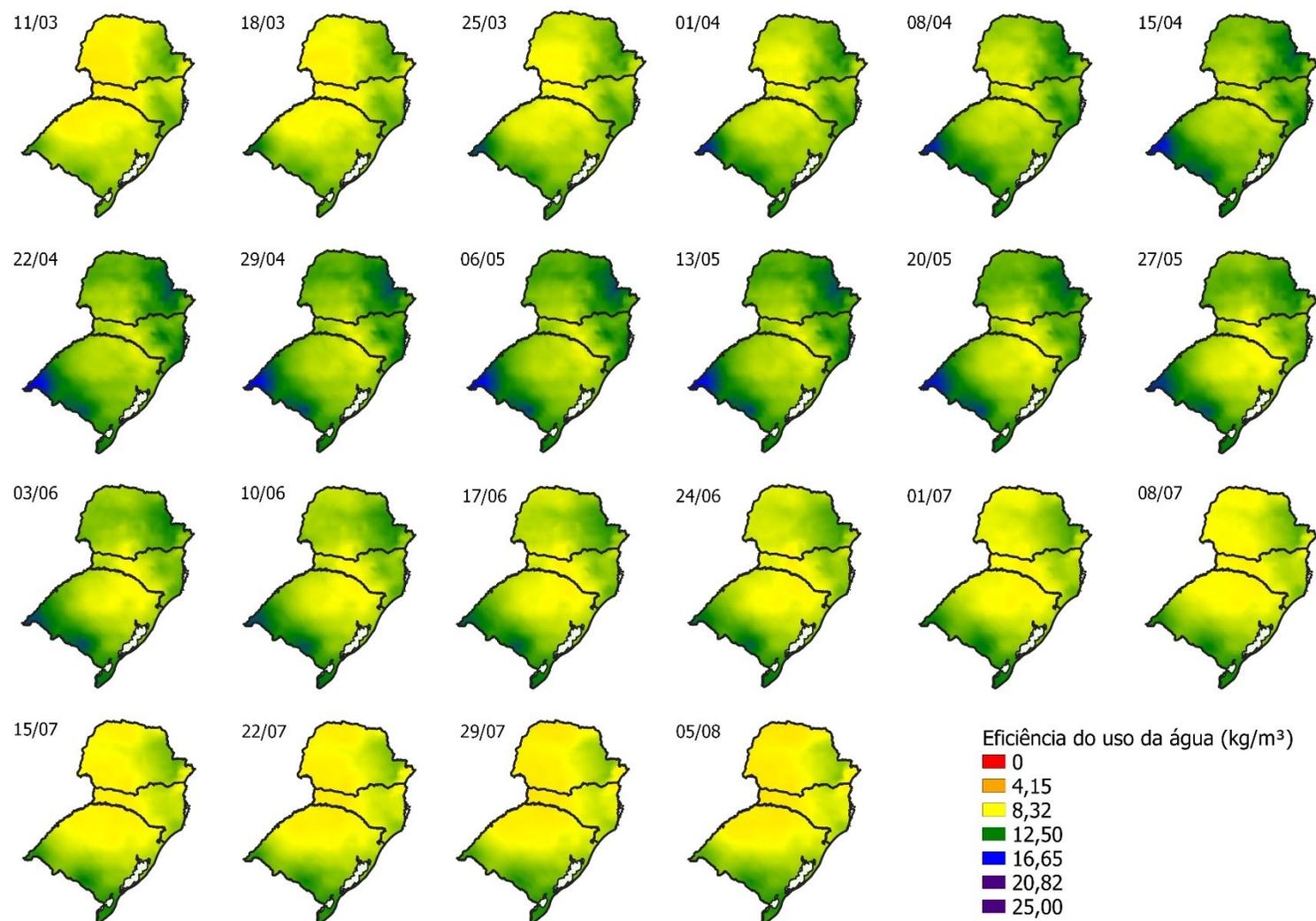
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 24. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 25. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Analisando o cenário proposto para 2070 no RCP 4.5 (Figura 26, 27, 28, 29 e 30) não foram observadas grandes diferenças, quando comparado com 2050 (Figura 21, 22, 23, 24 e 25). O norte do Paraná é o mais afetado nas datas de semeadura simuladas, 11/03, 18/03 e 25/03 não sendo indicado a semeadura. Destacando que o Paraná passou em 2019 por um novo zoneamento climático para o Trigo (MAPA,2019).

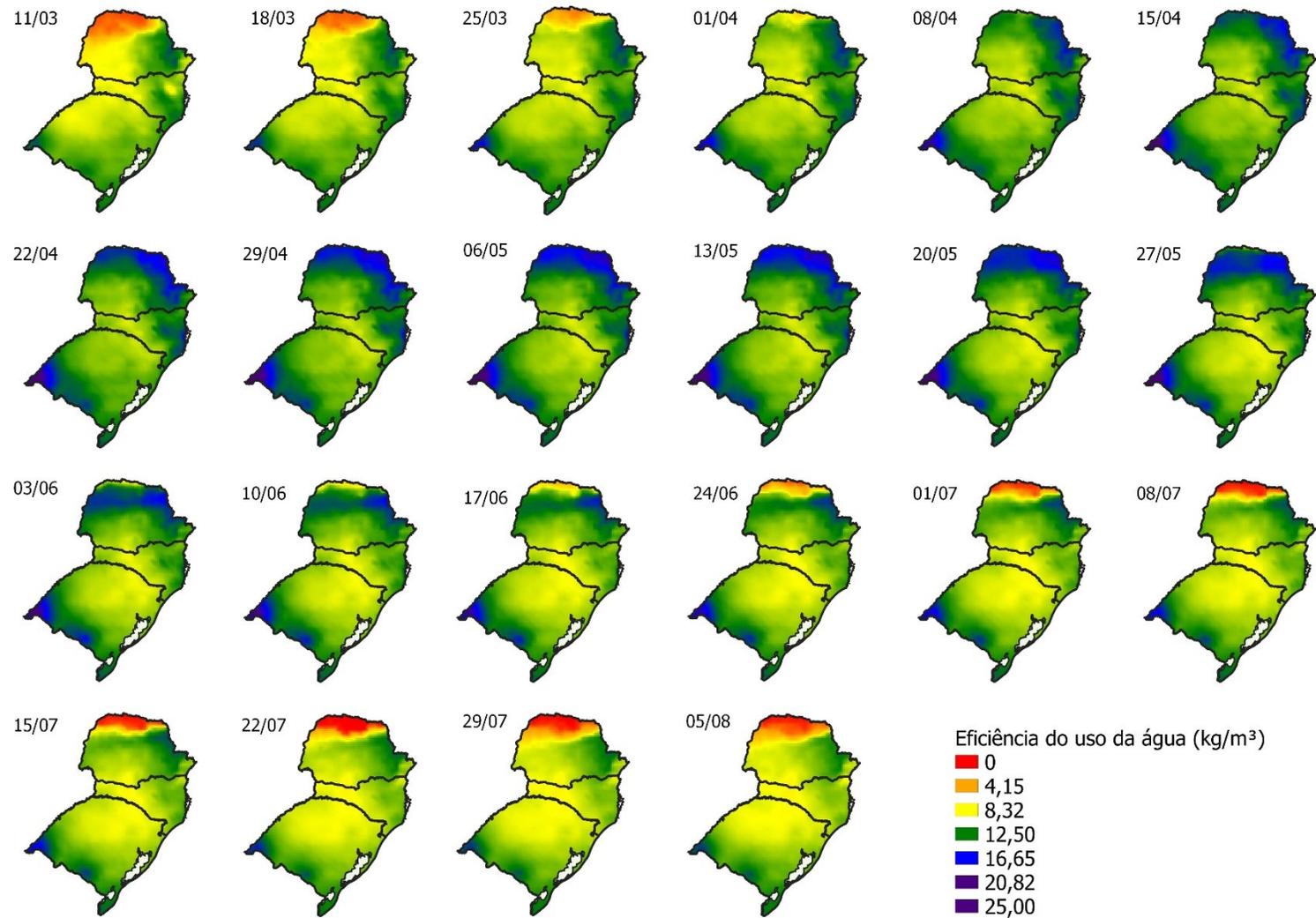
Em um cultivo irrigado, a disponibilidade de água para a cultura acaba não sendo um fator limitante. Contudo, em um cenário que pode ocorrer um conflito de uso da água pelo cultivo irrigado e consumo urbano, utilizando a eficiência do uso da água para definir a escolha da data de semeadura pode contribuir para uma redução do consumo de água no ciclo da cultura. Sendo assim, para a RCP 4.5 2070, as melhores datas de semeaduras para o Sul do Brasil são: 22/04, 29/04, 6/05, 13/05, 20/05, 27/05 e 03/06. As datas de semeaduras mais tardias (24/06, 01/07, 08/07, 15/07, 22/07, 29/07 e 05/08) se mostraram menos eficiente no uso da água, em algumas regiões tendo uma eficiência do uso da água próximo a 0 kg.m<sup>-3</sup>(Figura 26).

Uma das principais limitação no cenário atual para a semeadura muito precoce é que a cultura é muito suscetível a eventos extremos, como geadas e baixas temperaturas (abaixo de -2°C) na fase de espigamento/florescimento, que podem causar danos muitos severos. No cenário futuro estudado não se percebeu grandes perdas de produção por causa de temperaturas mínimas, devido ao fato das temperaturas mínimas aumentar mais que a temperatura máxima para a região em estudo. Em locais em que a geada é um fator limitante, a produção de trigo com as mudanças climáticas será beneficiada, sendo viável o cultivo do trigo nestas regiões.

A lâmina de 50% no cenário RCP 4.5 2070 (Figura 27) respondeu com maior eficiência no uso da água se comparado as lâminas de 75, 95 e 100% (Figura 28, 29 e 30). Esta eficiência maior pode estar relacionada ao aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera, que age como fertilizante. Nestas localidades a irrigação é suplementar. Em casos de veranicos, quando há falta de água no solo para a planta em seus processos metabólicos, a irrigação com 50% (Figura 27) faz com que não ocorra estresse hídrico em fases que são menos suscetíveis a falta de água.

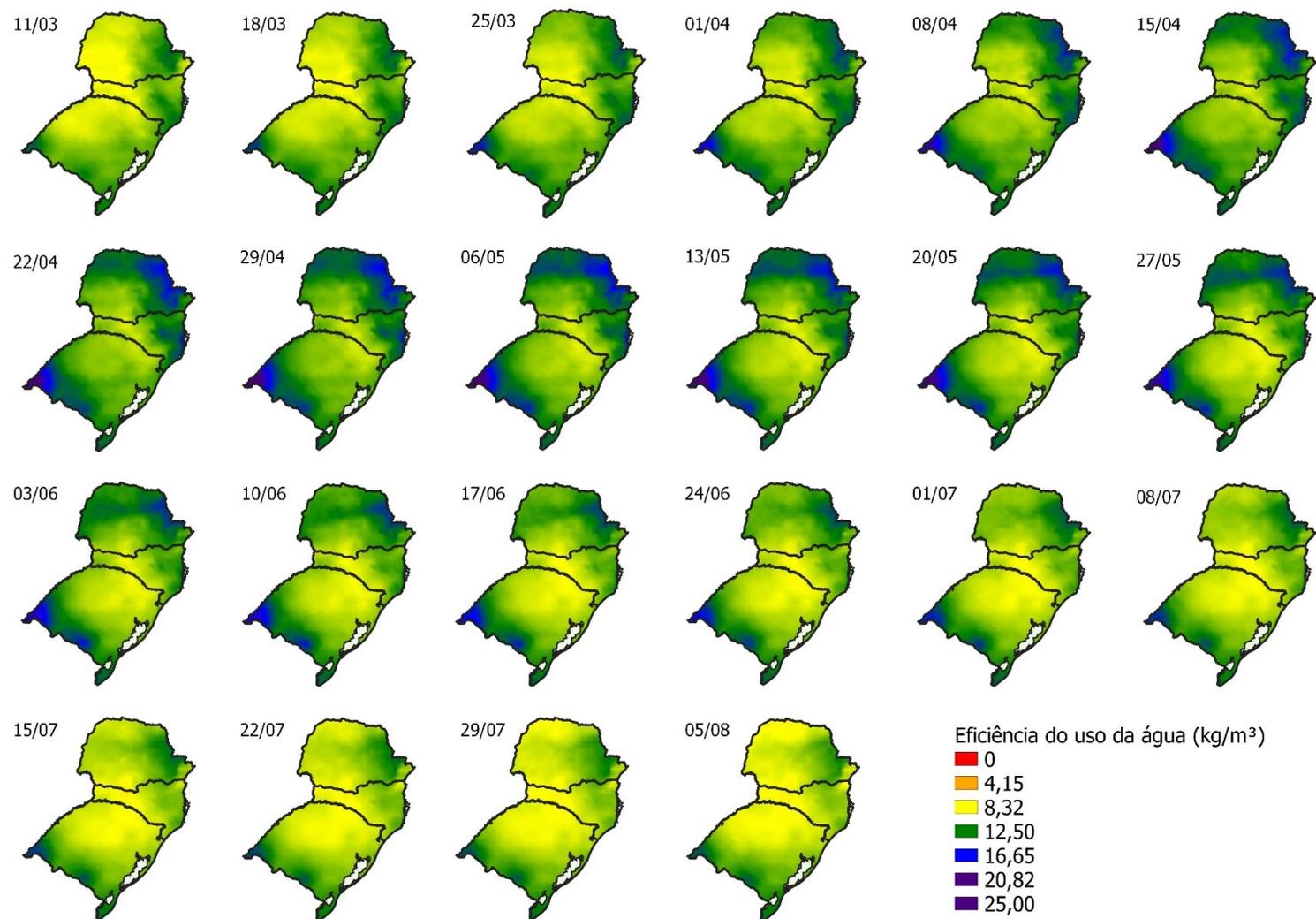
O Rio Grande do Sul se mostrou, mesmo em um cenário de mudanças climáticas, apto para o plantio sequeiro do trigo com uso de cobertura morta (Figura 26). Na região da campanha gaúcha determinados locais pelo modelo tiveram para o trigo sequeiro as maiores eficiências do uso da água. Sem irrigação as datas mais propícias a semeadura foram 01/04 a 03/06, tendo uma menor eficiência do uso da água no planalto meridional do estado. As menores eficiência do uso da água aconteceram a partir da data de semeadura do dia 10/06.

Figura 26. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



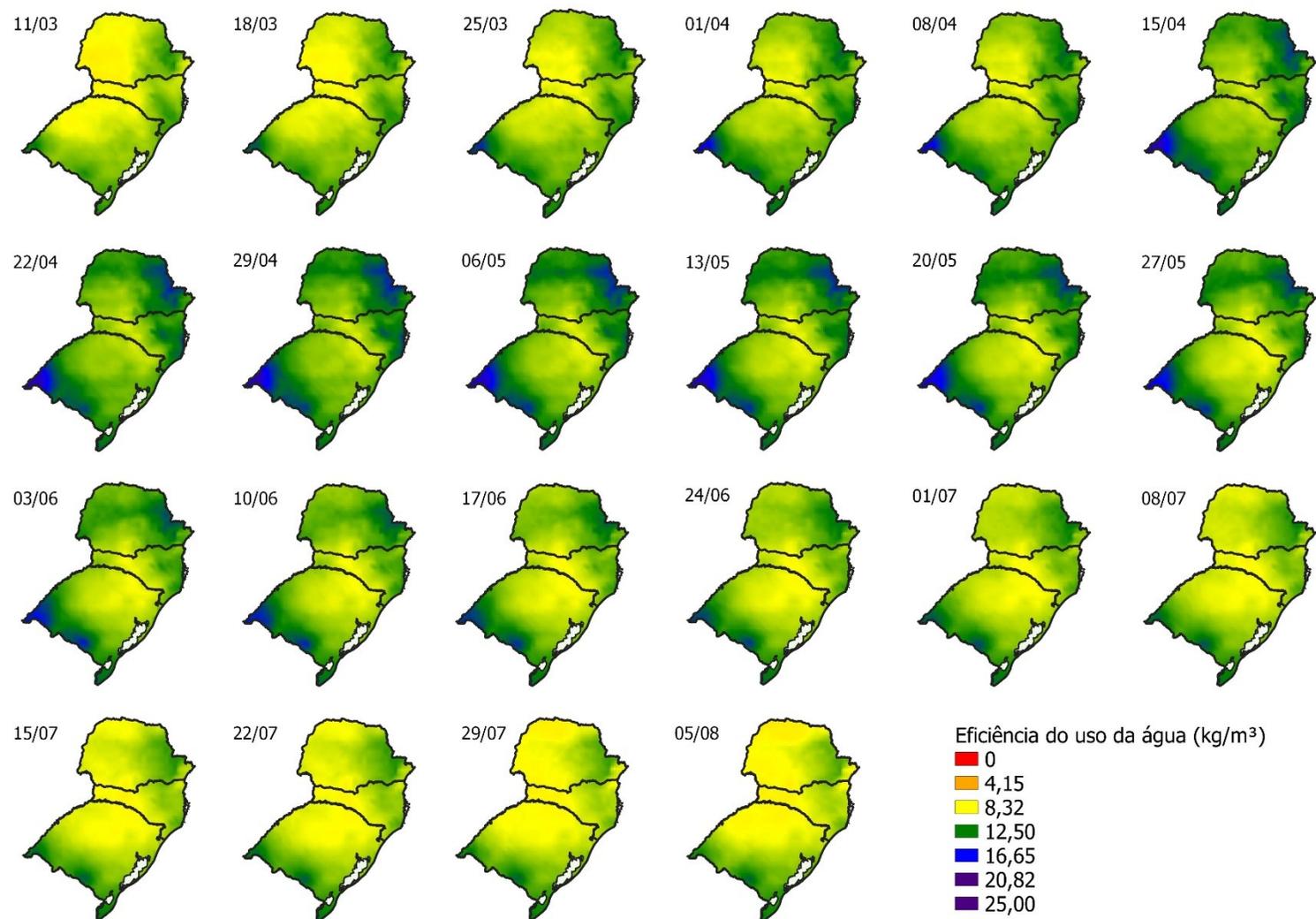
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 27. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



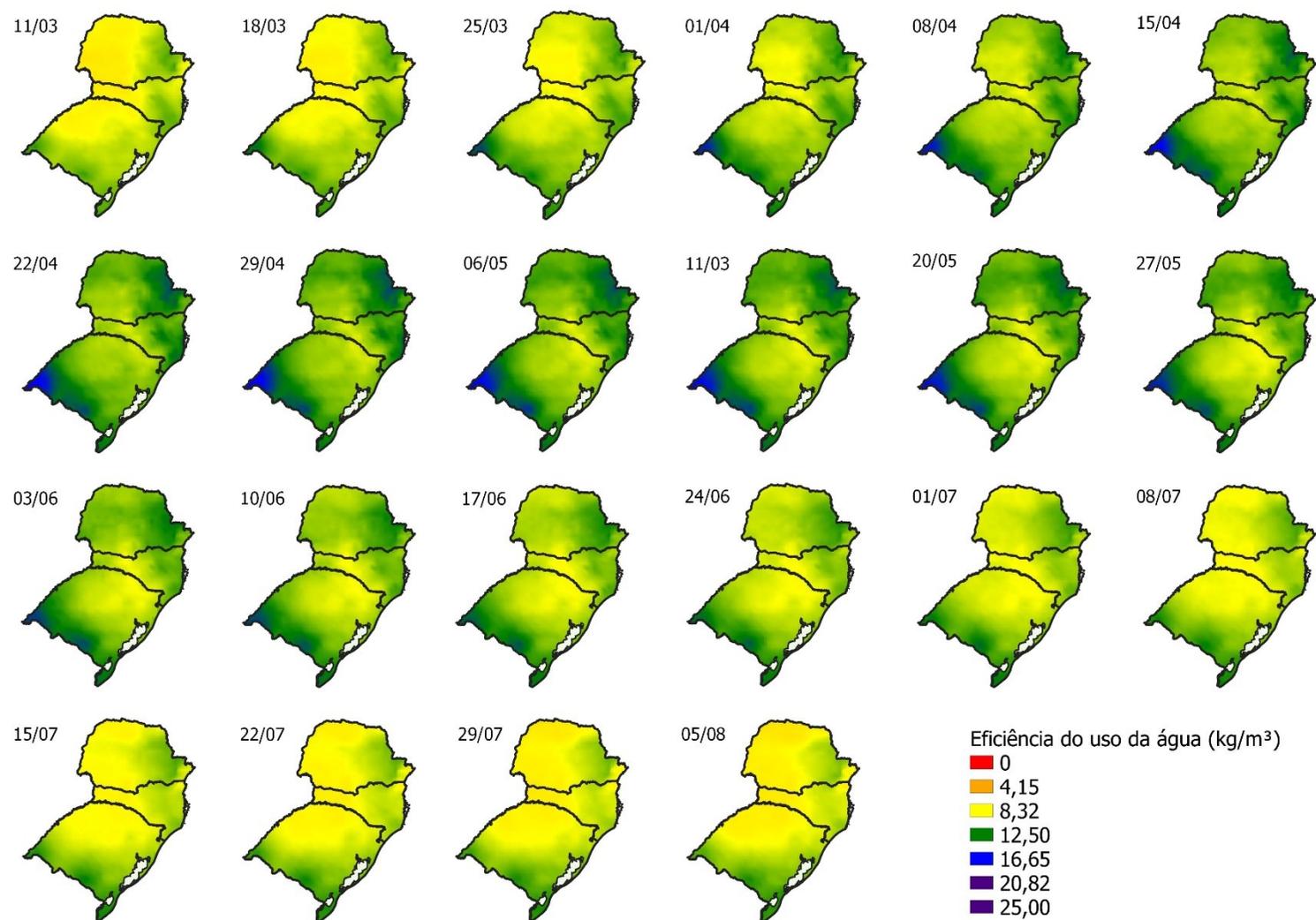
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 28. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



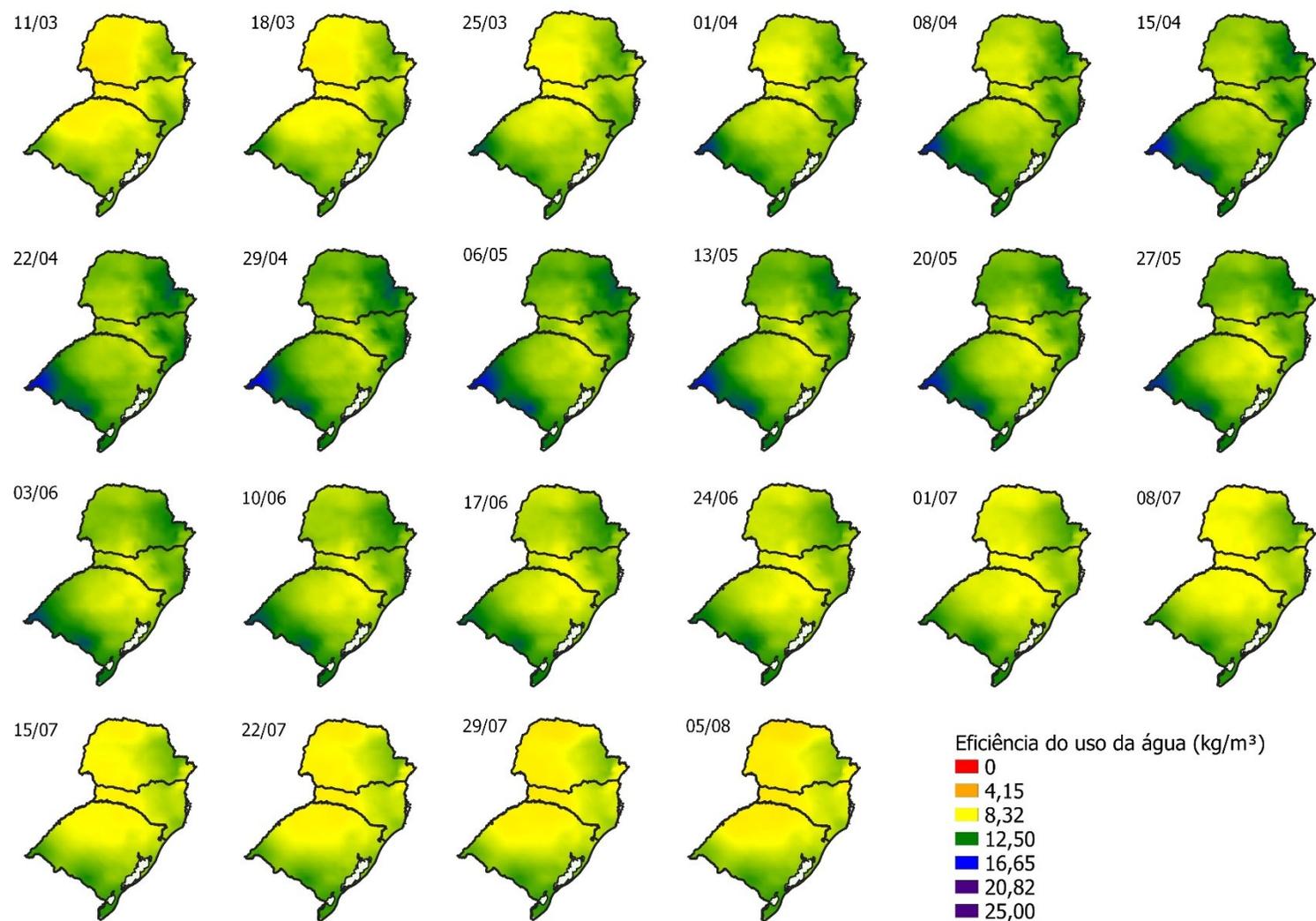
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 29 Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 30. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



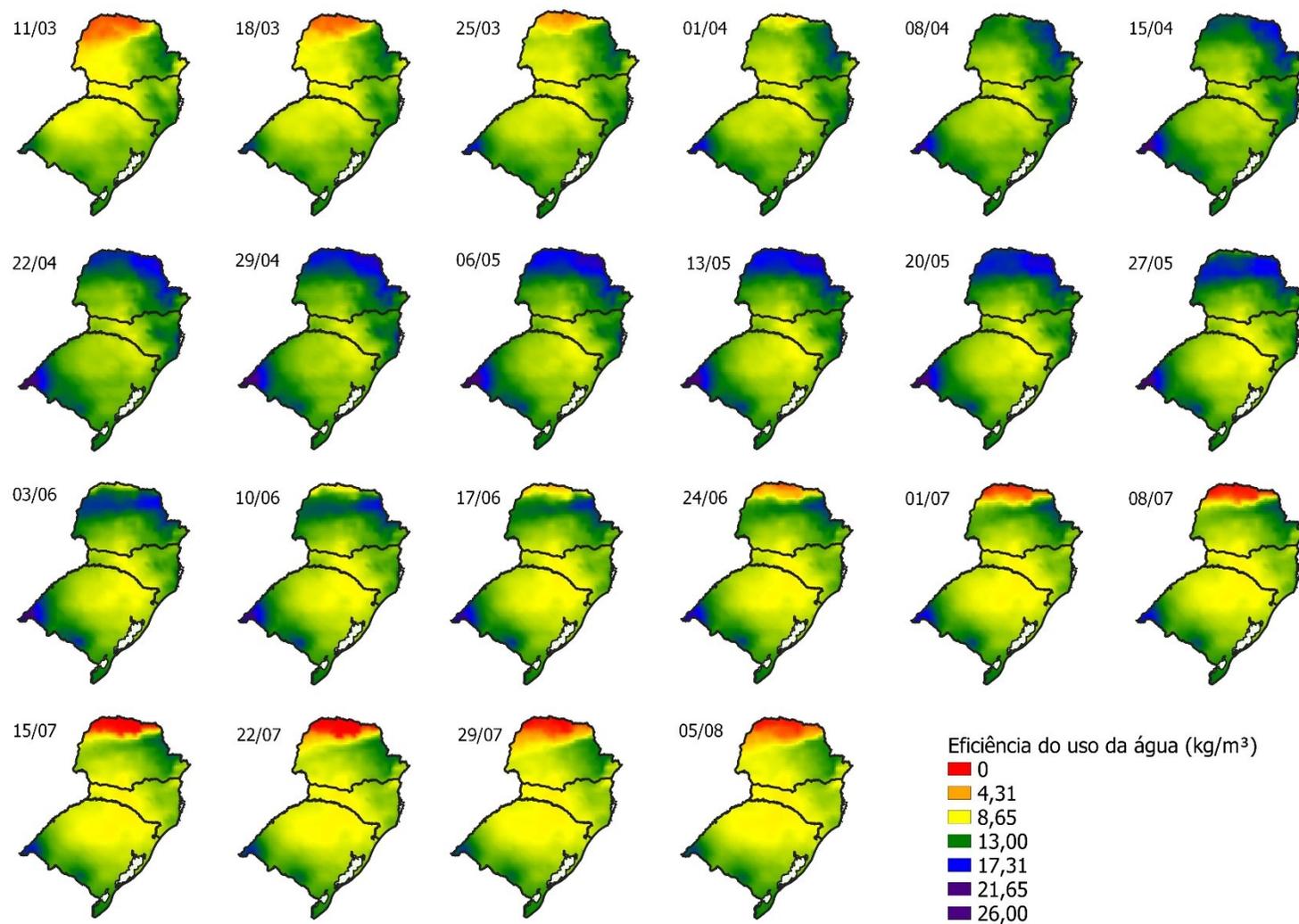
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

No cenário mais pessimista descrito na literatura, a cultura de trigo nos anos de 2050 (Figura 31, 32, 33, 34 e 35) e 2070 (Figura 36, 37, 38, 39 e 40) mostrou as melhores eficiências do uso da água e de produtividade. Fatores como aumento de temperatura, precipitação e CO<sub>2</sub> na atmosfera combinados, contribuíram para o melhor desempenho da cultura nas condições simuladas. Enquanto no cenário RCP 8.5 2070 se teve uma eficiência de 26,50 kg.m<sup>-3</sup> para o ano de 2050 a simulação mostrou a máxima eficiência de 26 kg.m<sup>-3</sup>. O cenário RCP 4.5 2050 teve uma máxima eficiência do uso da água de 25 kg.m<sup>-3</sup>.

No cenário RCP 8.5 2050 e 2070 no Paraná foi observado as maiores eficiências do uso da água nas datas de semeadura entre 08/04 a 03/06, enquanto para o estado de Santa Catarina as melhores data de semeadura baseada em eficiência do uso da água são as datas de 22/04 a 27/05. No leste para Nordeste e oeste se observa uma menor eficiência do uso da água, comparado ao meio oeste, Sul e planalto serrano de Santa Catarina. No Rio Grande do Sul as melhores eficiências se encontram na Campanha e na Serra do Sudeste que se localiza próximo ao Uruguai.

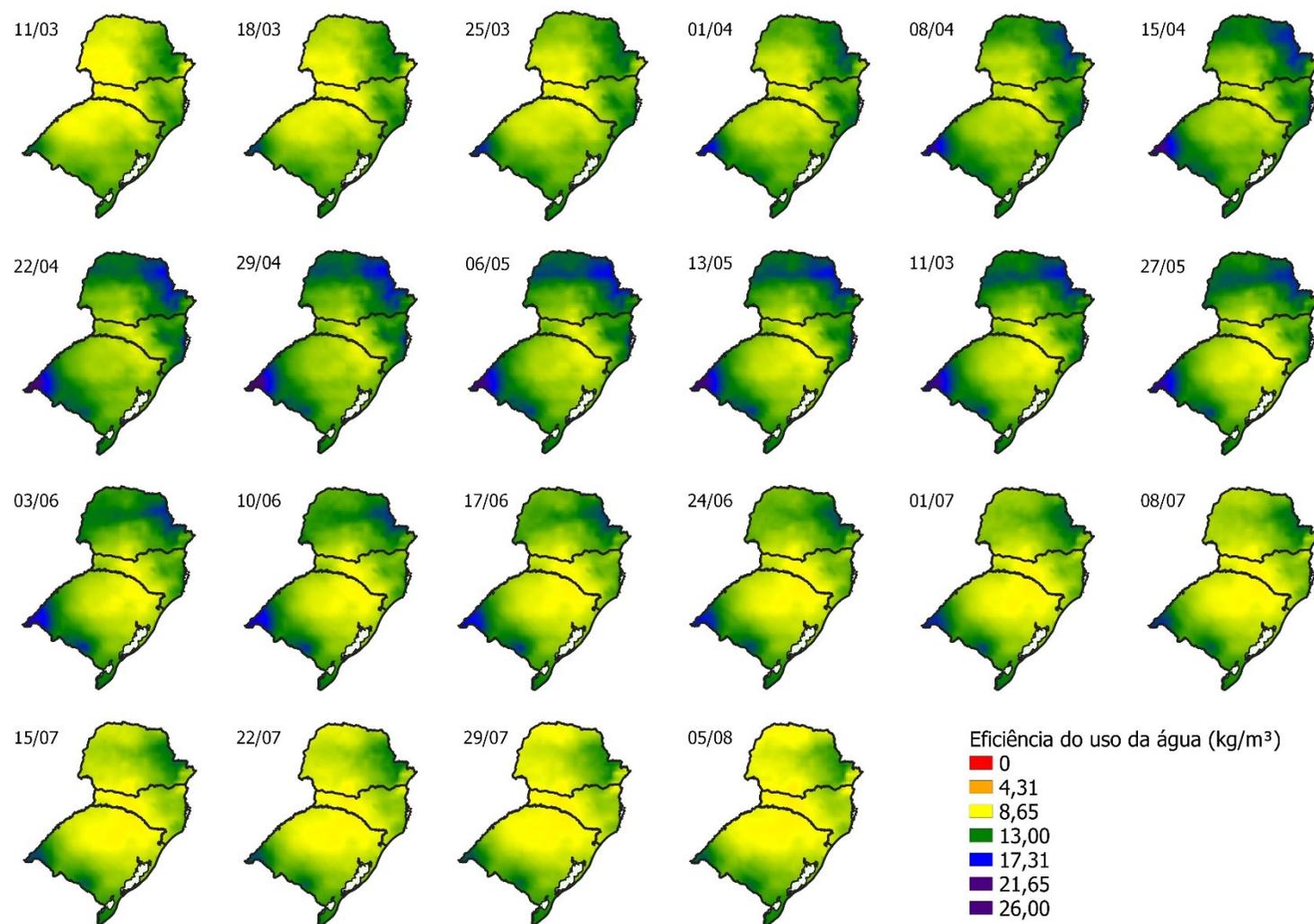
No cenário RCP 8.5 verifica-se uma tendência similar observada do cenário RCP 4.5, em que a lâmina de 50% respondeu como a melhor em eficiência do uso da água para os tratamentos de irrigação.

Figura 31. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



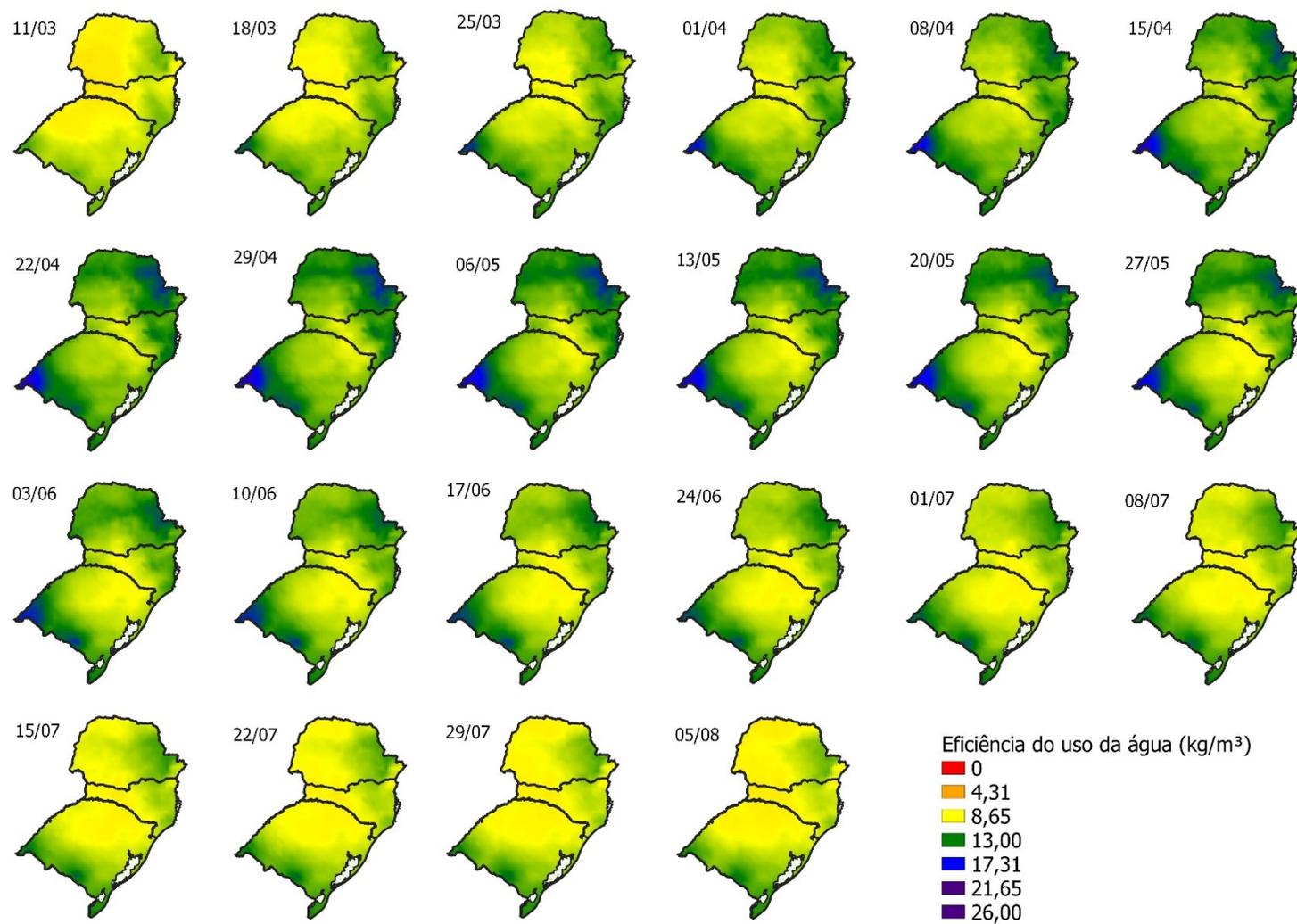
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 32. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



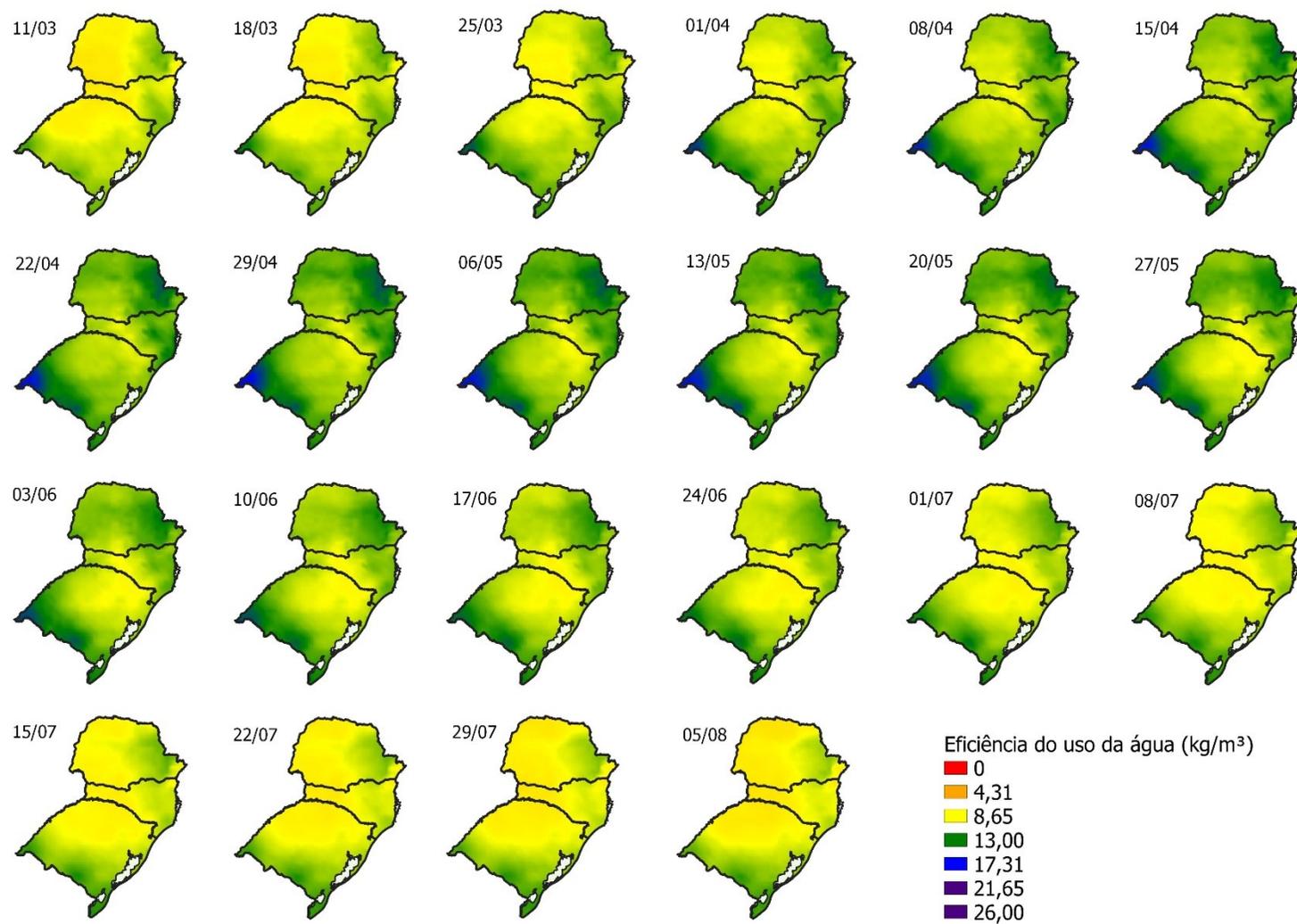
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 33. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



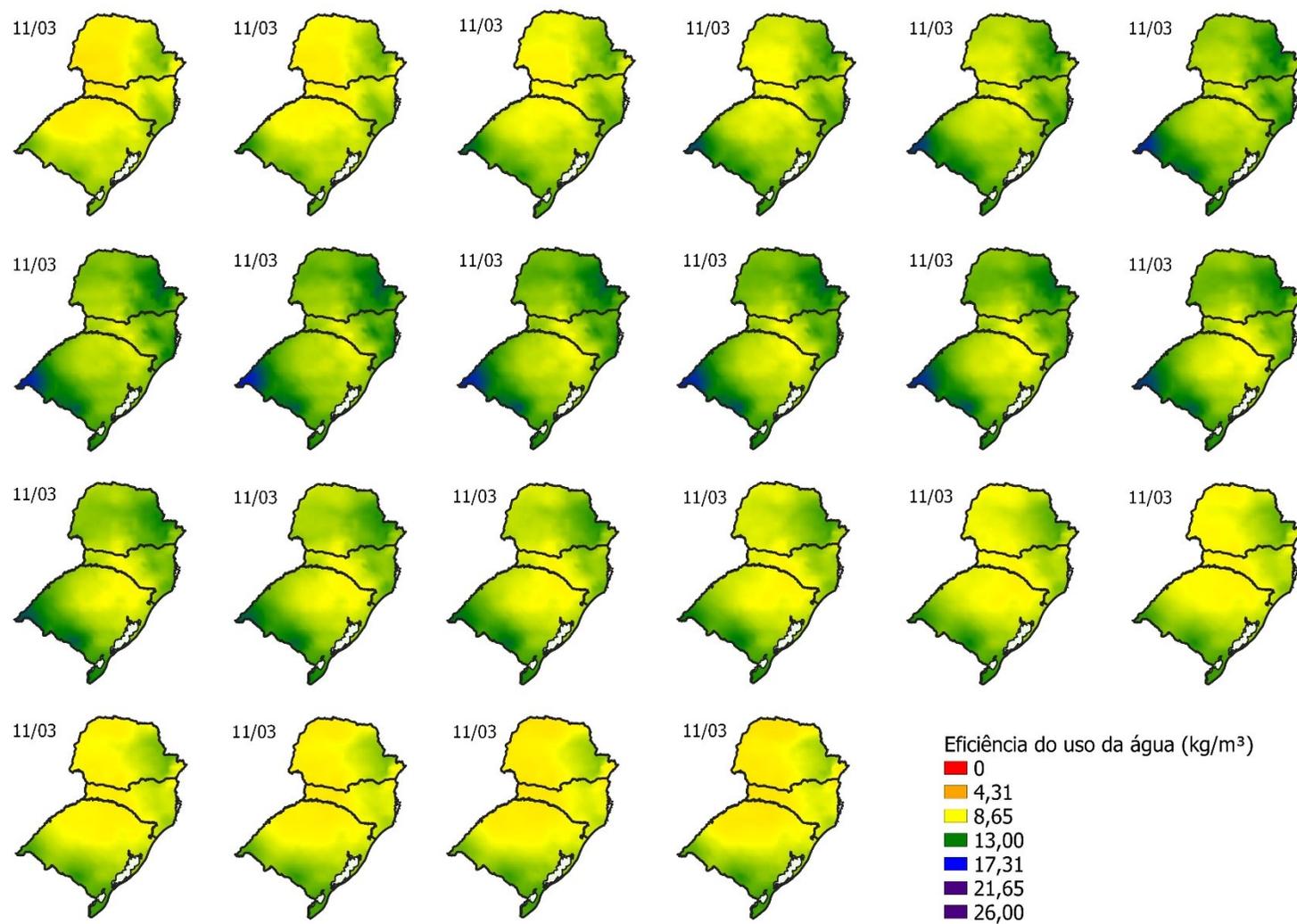
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 34. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



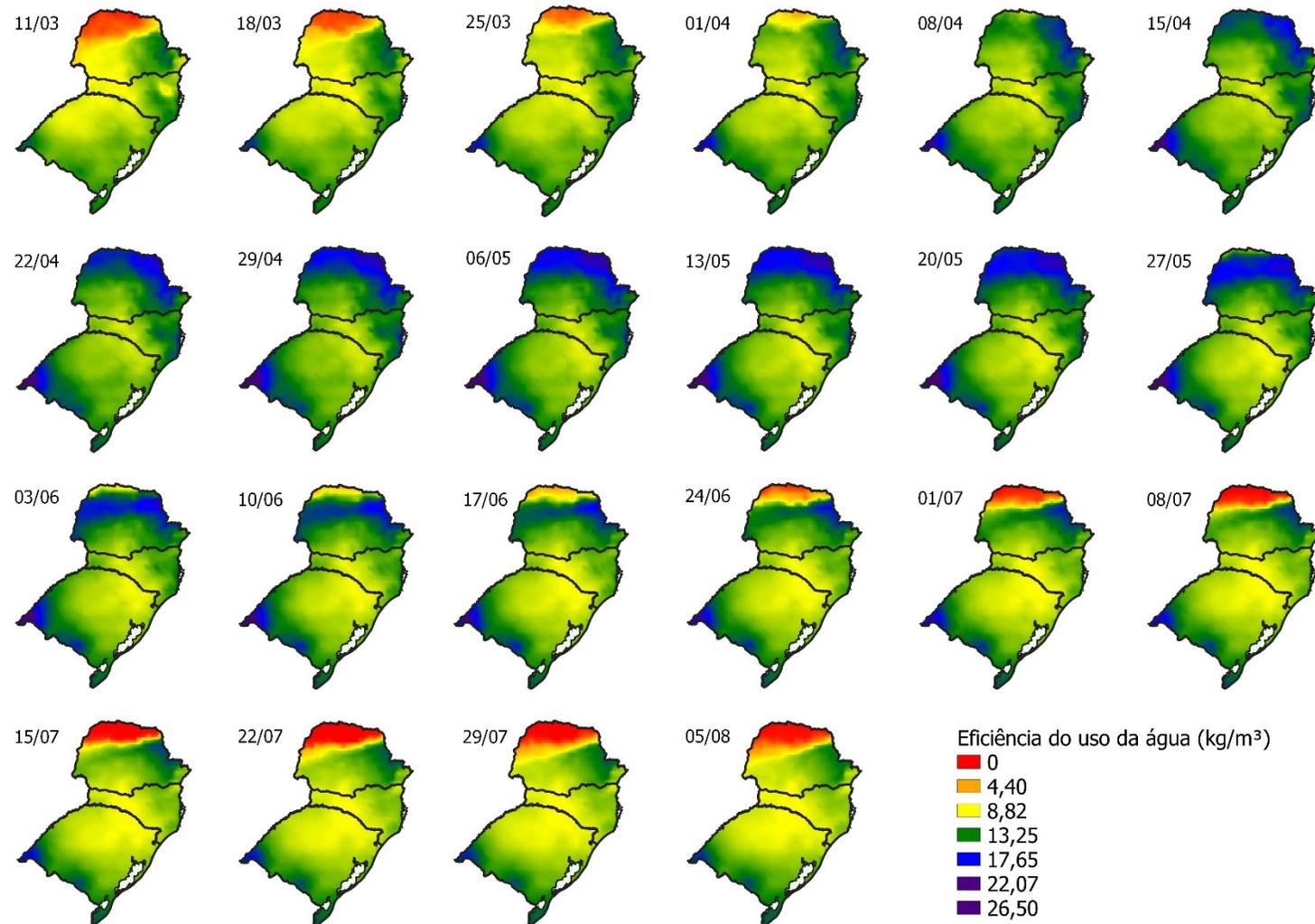
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 35. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



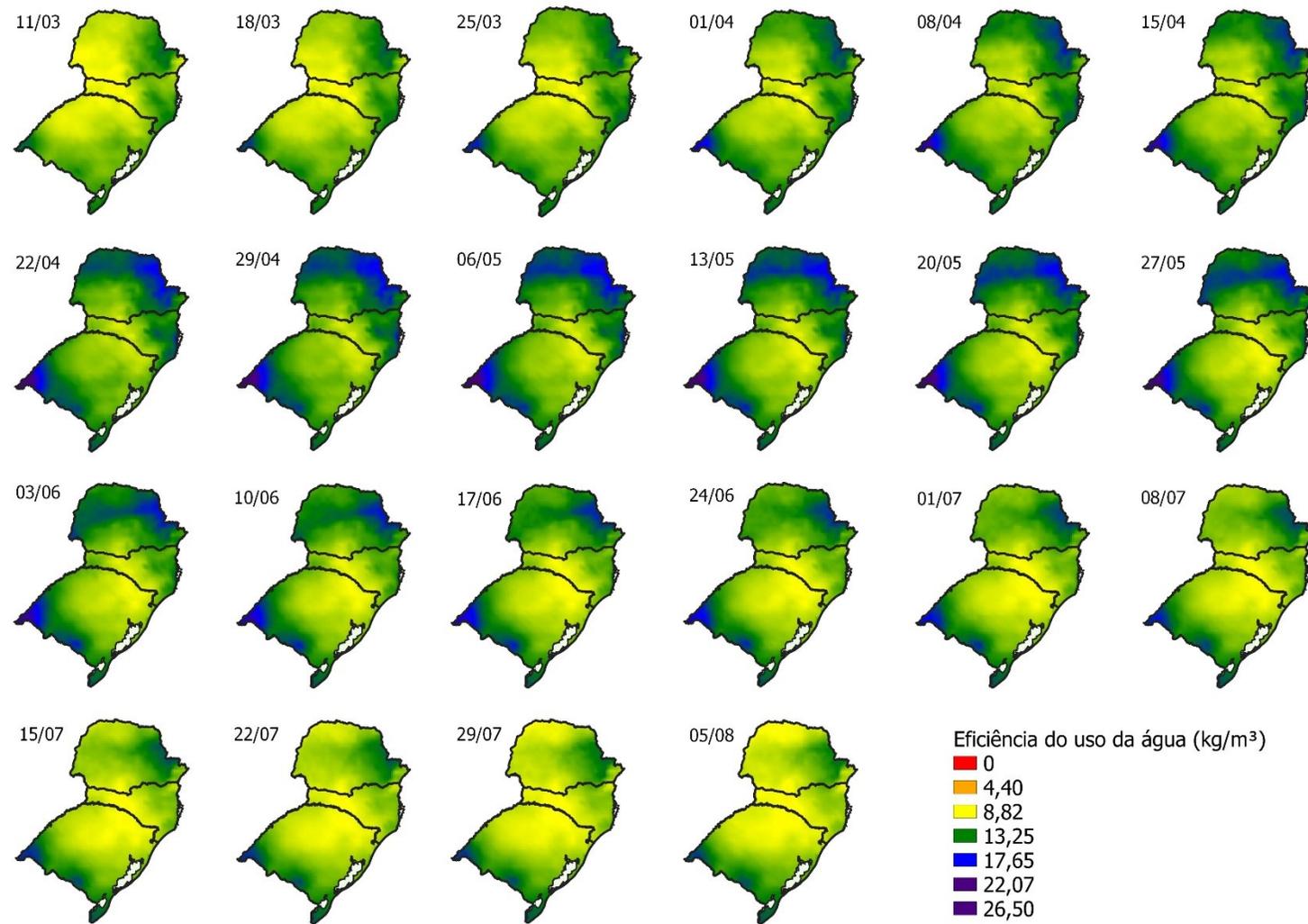
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 36. Eficiência do uso da água considerando a precipitação em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



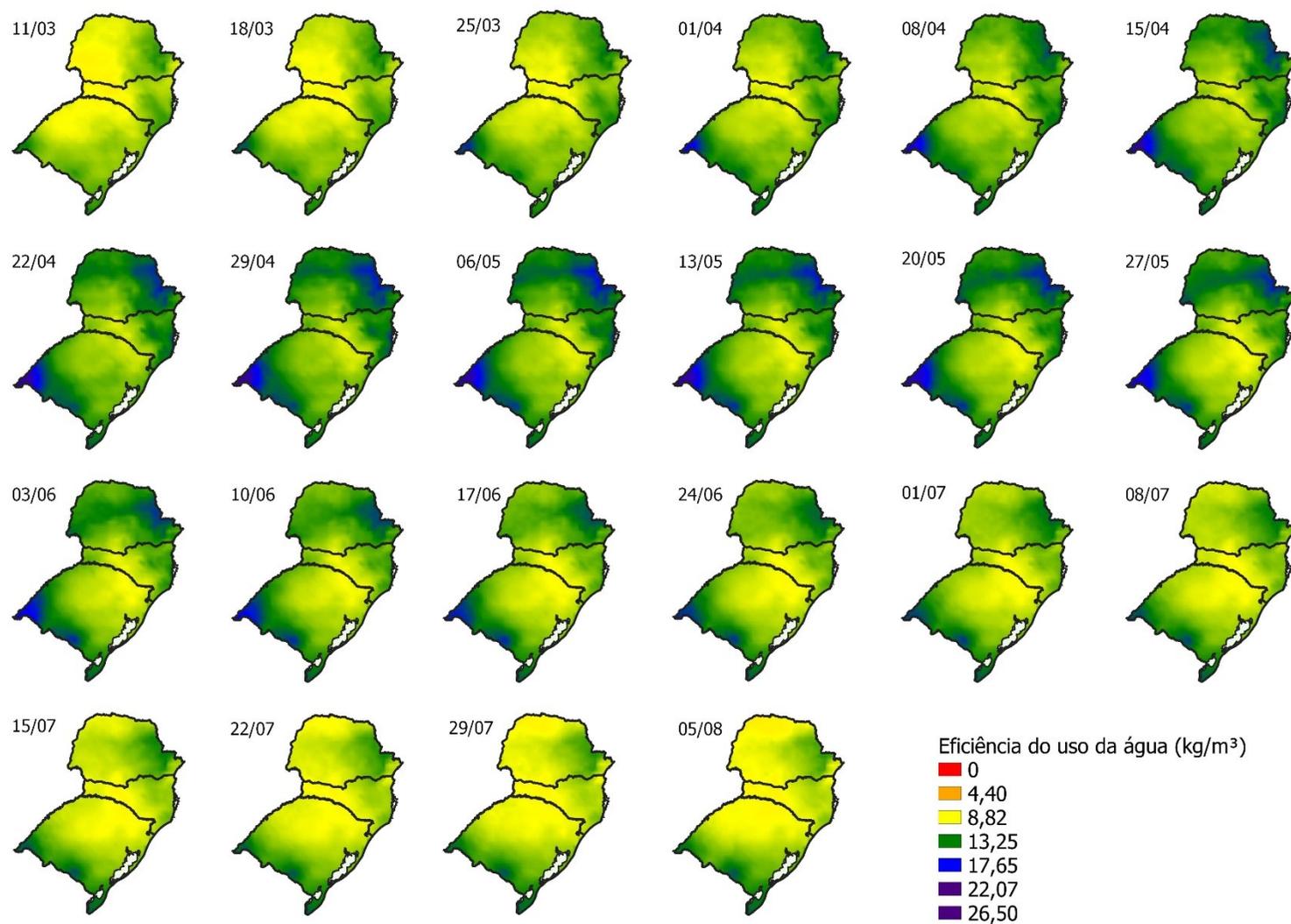
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 37. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



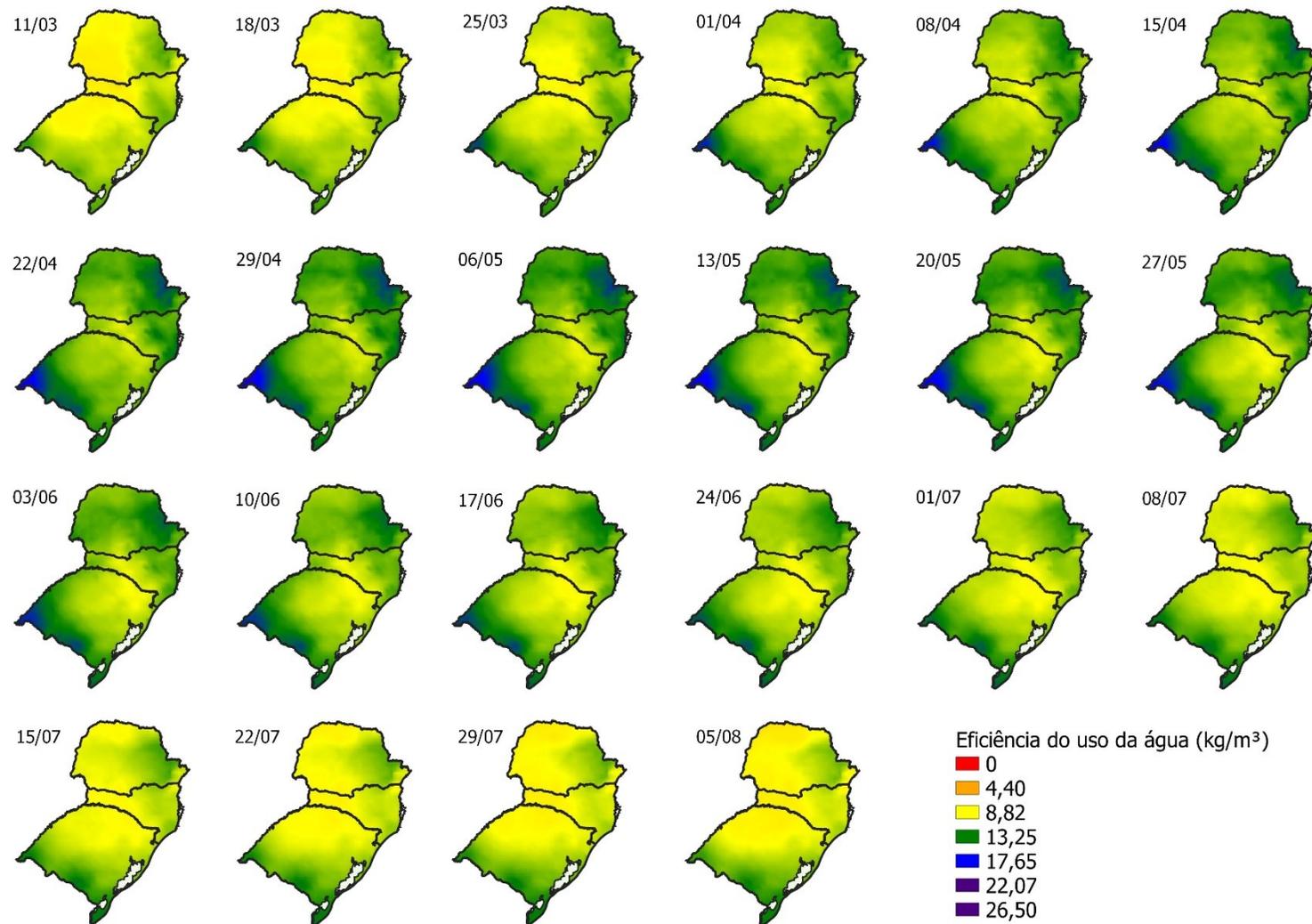
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 38. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



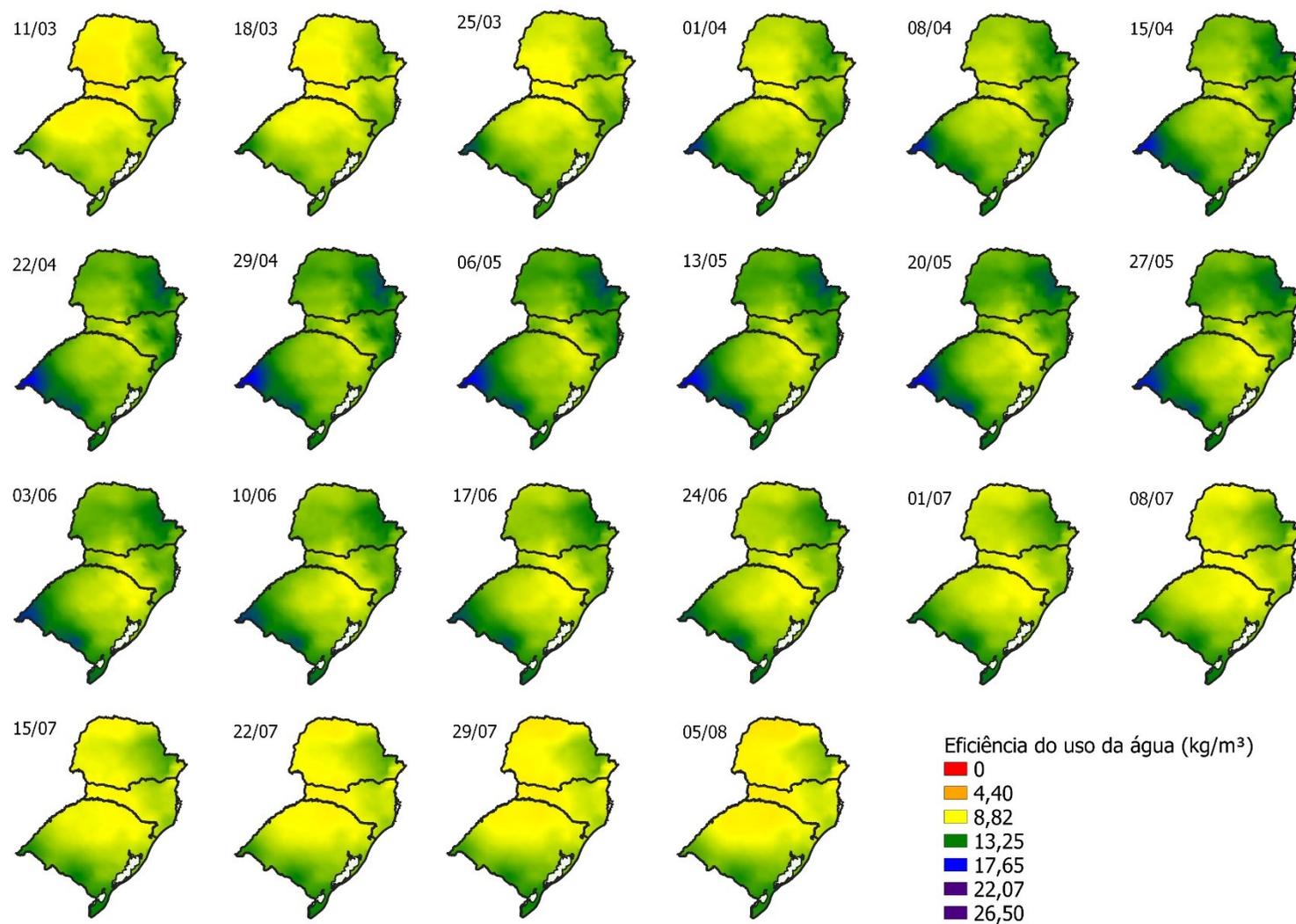
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 39. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 40. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



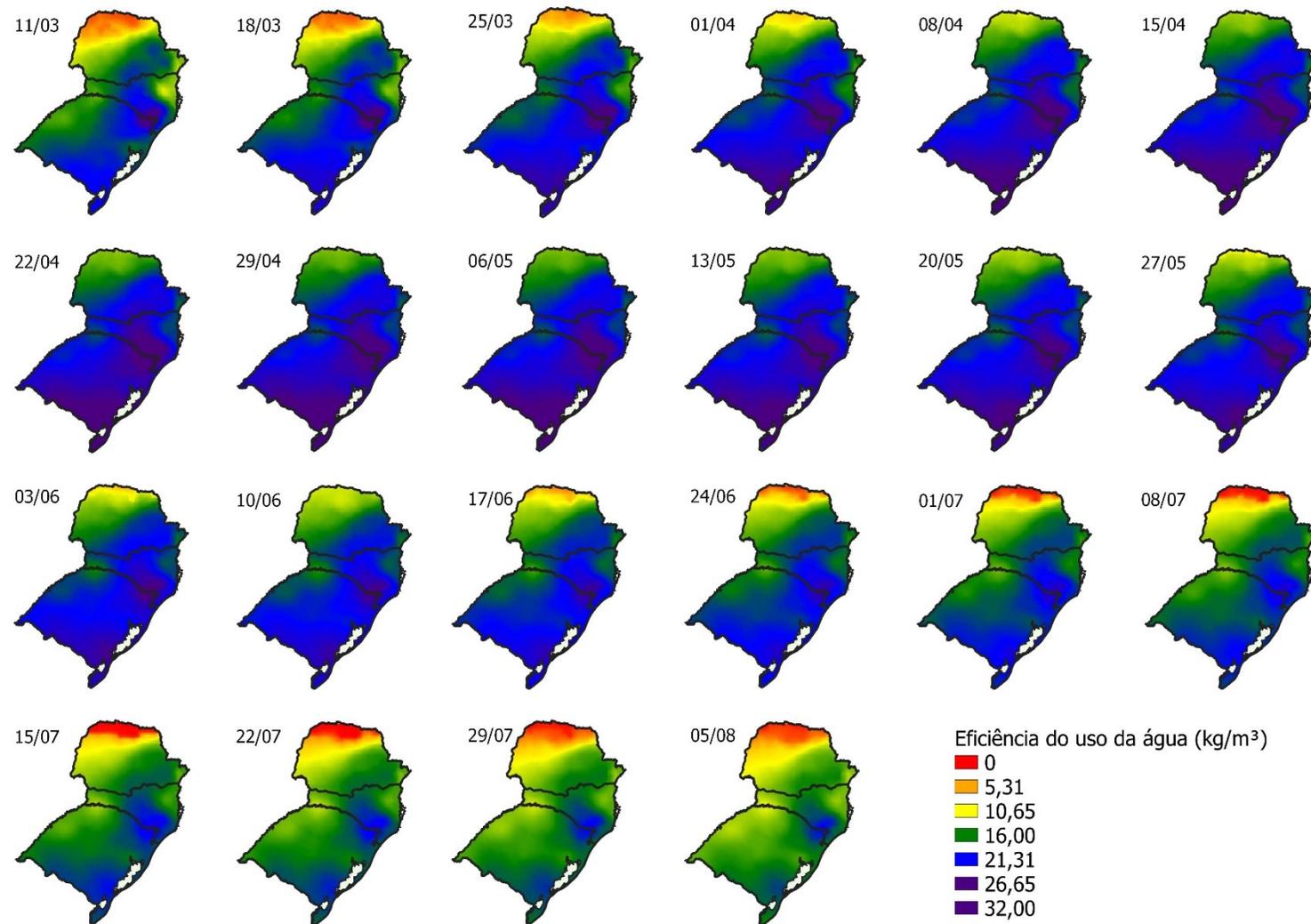
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Nos cenários projetados RCP 4.5 e 8.5 2050 e 2070 sem irrigação (Figuras 41,46, 51 e 56) foi observado as menores eficiência do uso da água (I+P) nas datas 11/03, 18/03, 25/03, 03/06, 10/06, 17/06, 24/06, 01/07, 08/07, 15/07, 22/07, 29/07 e 05/08 tem uma limitação para o norte do Paraná, mas no cenário pessimista a área limitada de cultivo de trigo para as datas citadas aumenta. As mesmas datas para os outros estados apresentam uma menor eficiência do uso da água que podem estar relacionadas ao aumento da temperatura que reflete na planta ter que manter energia para manter o sistema e não destinar ao enchimento de grão.

A irrigação pode viabilizar o cultivo de trigo no norte do Paraná para as datas de semeaduras que se mostraram inviável na cultura sequeira (Figuras 41,46, 51 e 56). A irrigação pode ser uma estratégia adaptativa para manter uma maior variedade de datas de semeadura e melhorar desempenho da cultura em produção. Na metodologia utilizada, os valores da lâmina de 75, 95 e 100% tiveram eficiência de uso da água muito similares, ou seja, a água disponibilizada a mais foi perdida por evaporação ou percolação, devido a planta não ter usado no seu metabolismo em conversão de grãos. Já para a lâmina de 50%, observou-se uma elevação de eficiência do uso da água se comparado ao tratamento de irrigação, pois a água disponibilizada por essa lâmina supriu as necessidades da planta e usou para a conversão de produtividade da cultura .

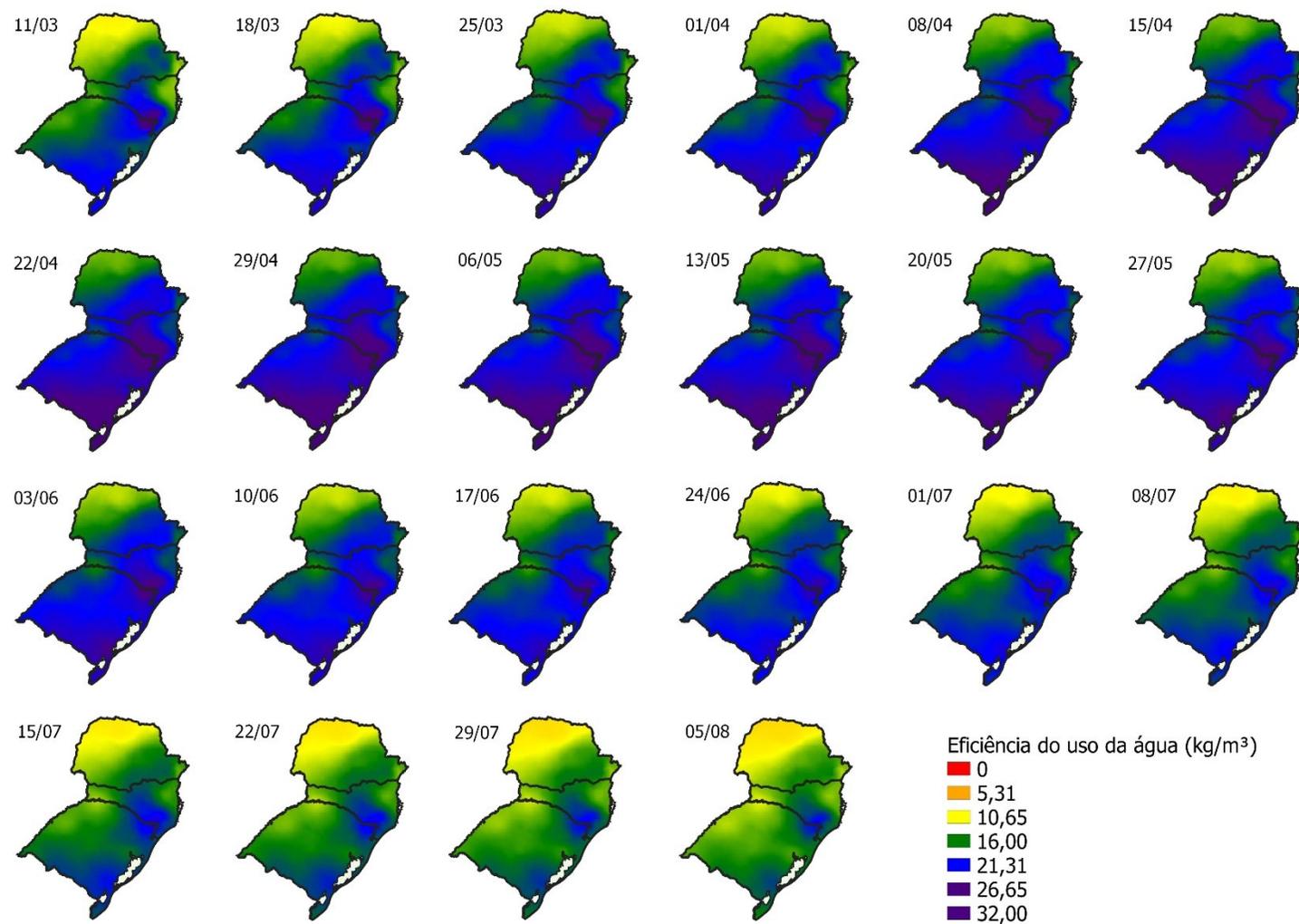
Na metodologia com irrigação mais precipitação, as maiores eficiências do uso da água foram observadas na campanha gaúcha. Já levando em conta apenas a evapotranspiração, a mais alta eficiência do uso da água foi observada na região Sul do Rio Grande do Sul. A água pode ter ficado mais disponível para a planta pelo simples fato da presença da cobertura morta, todavia, se faz necessário fazer simulações entre diferentes porcentagens de cobertura morta para ver quanto esse tratamento influencia no manejo da irrigação em um cenário de mudanças climáticas pode ter o potencial de reduzir a lâmina de água aplicado via irrigação por uso de cobertura morta.

Figura 41. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.



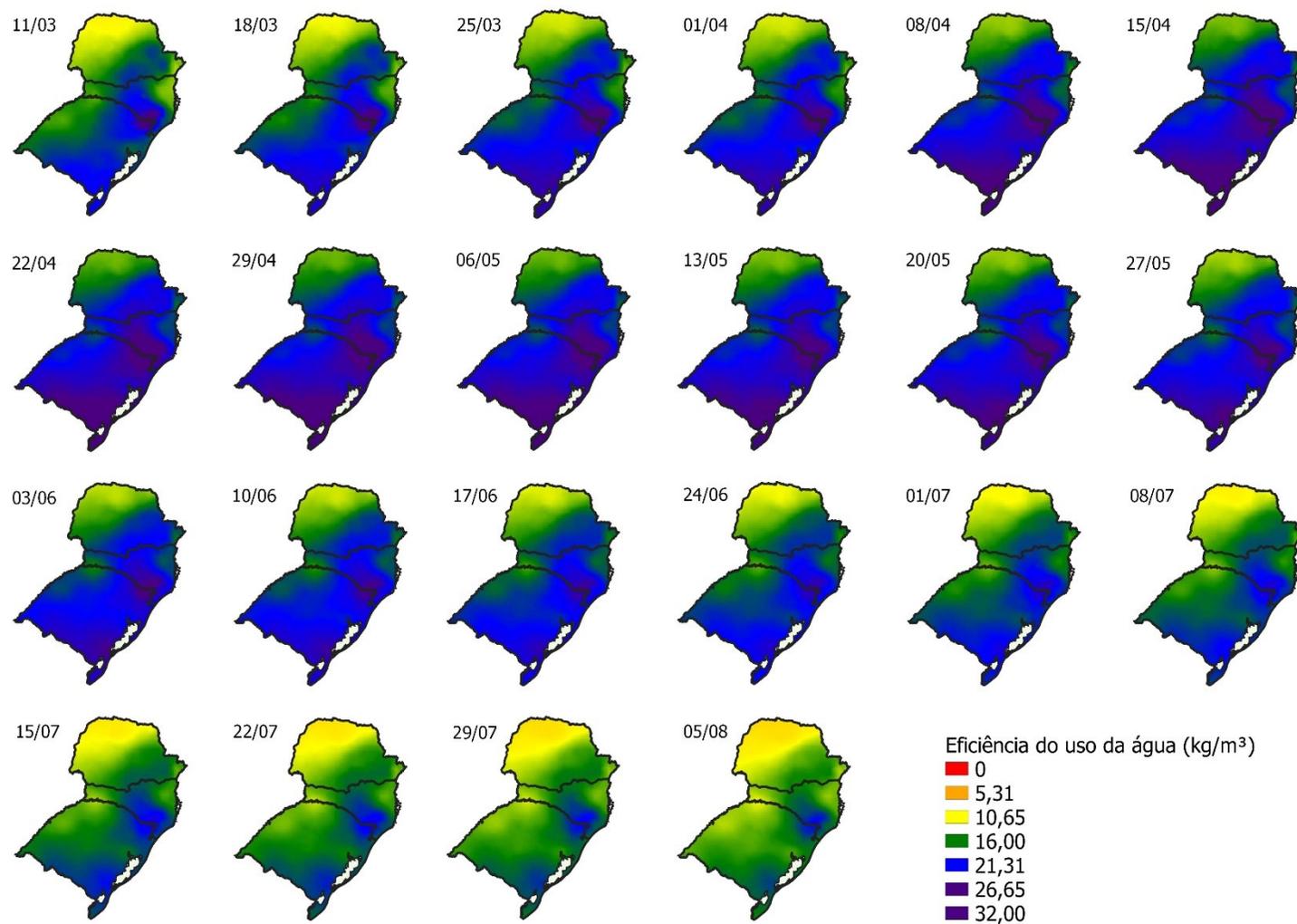
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 42. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.



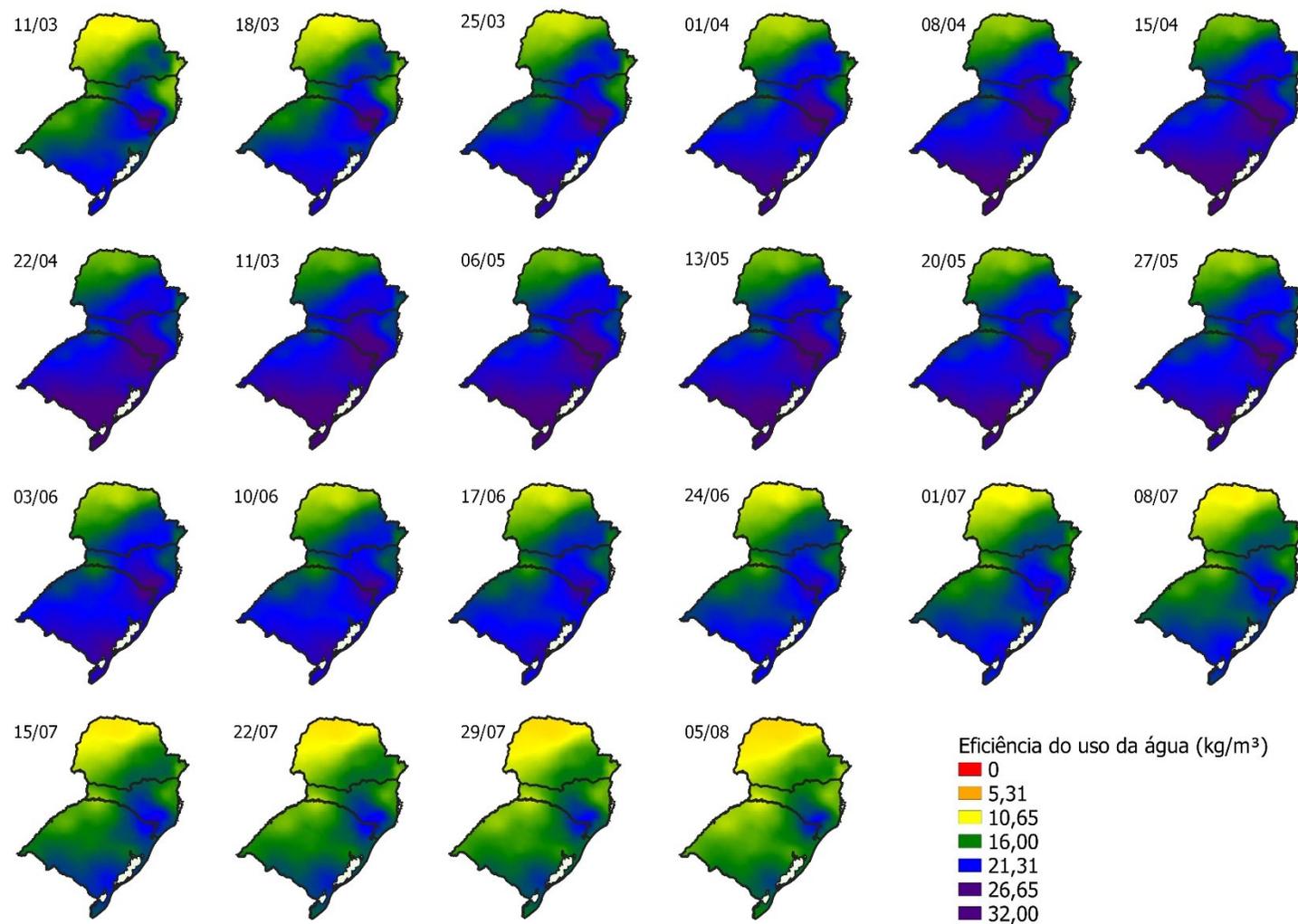
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 43. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.



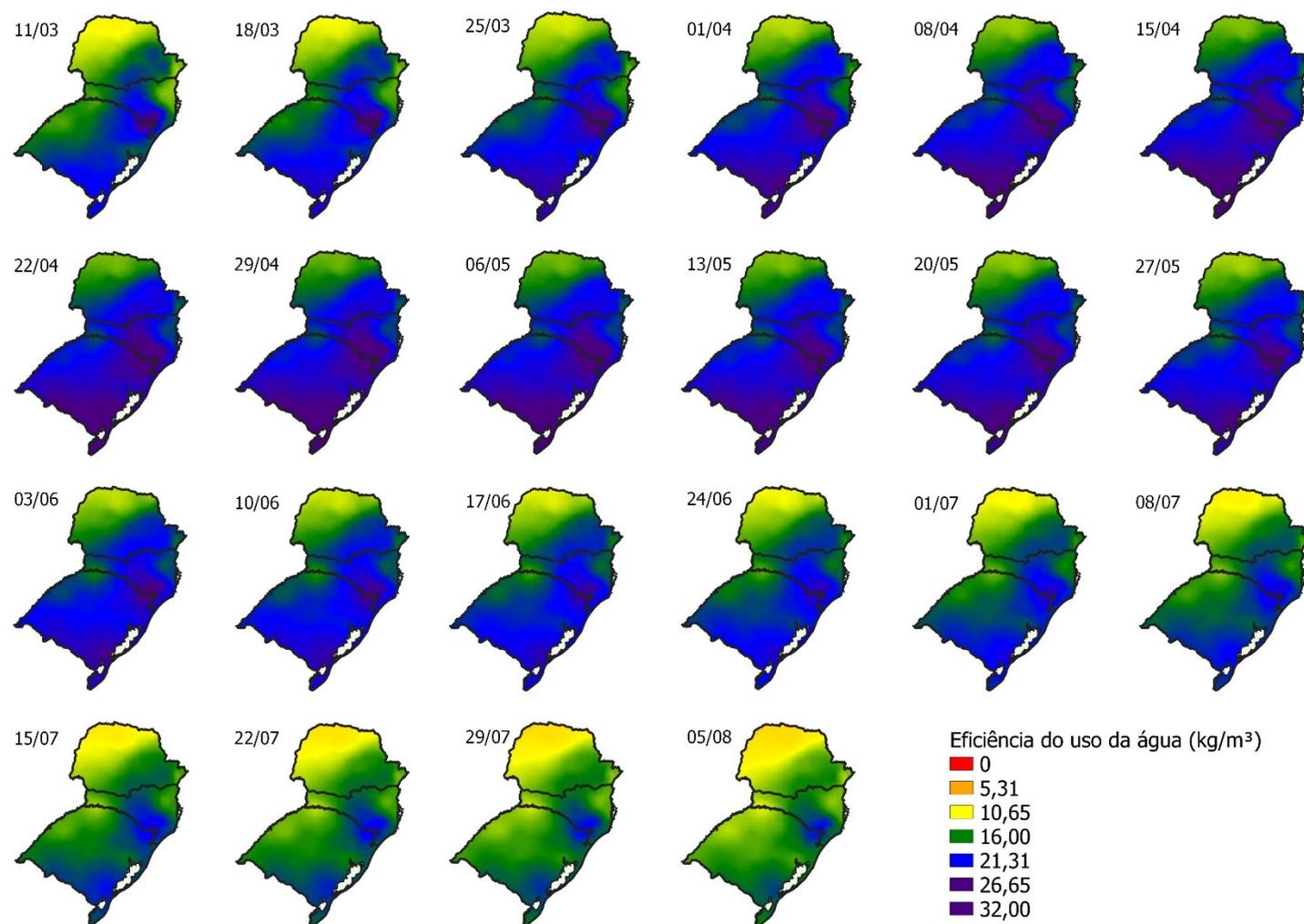
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 44. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.



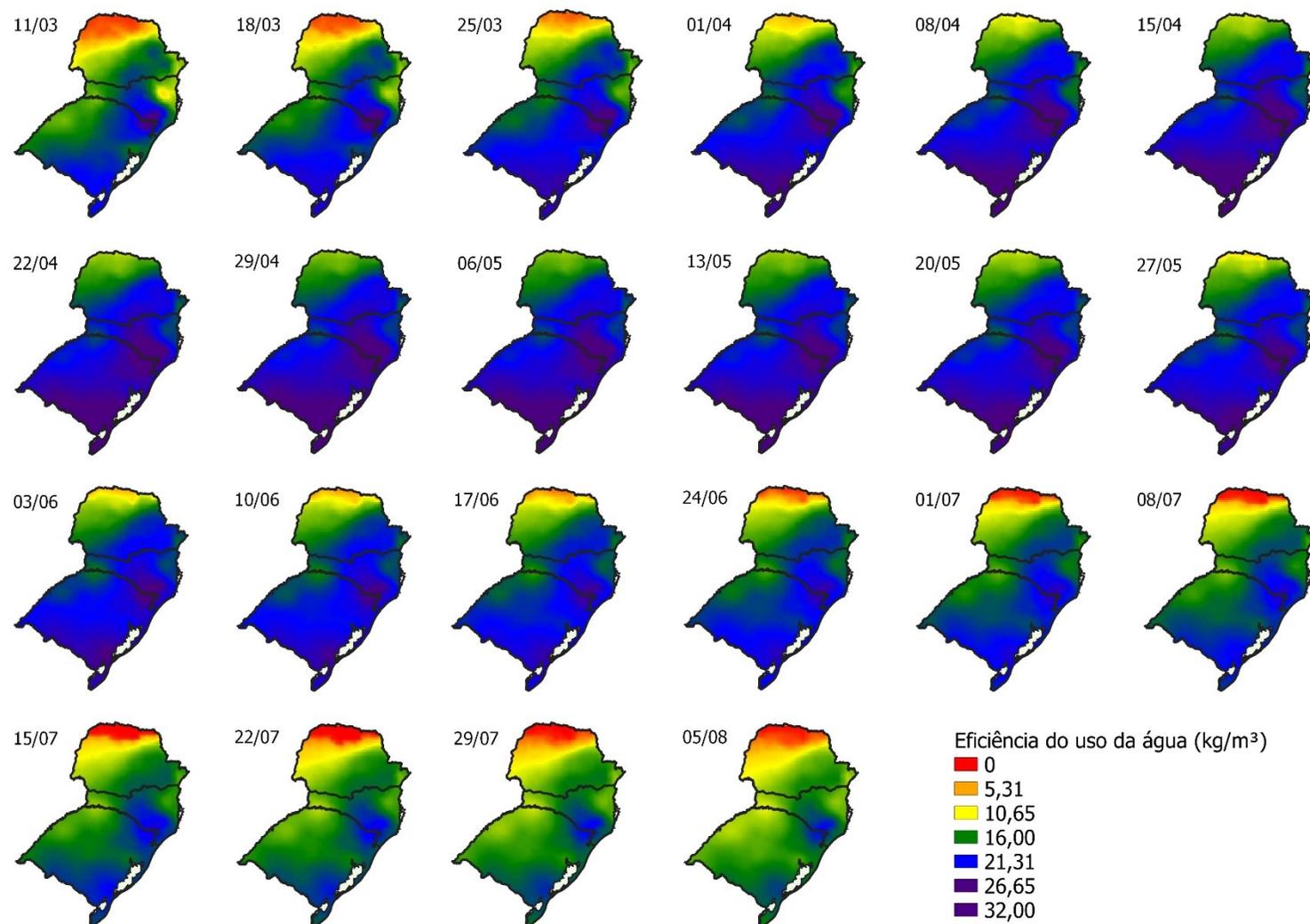
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 45. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2050.



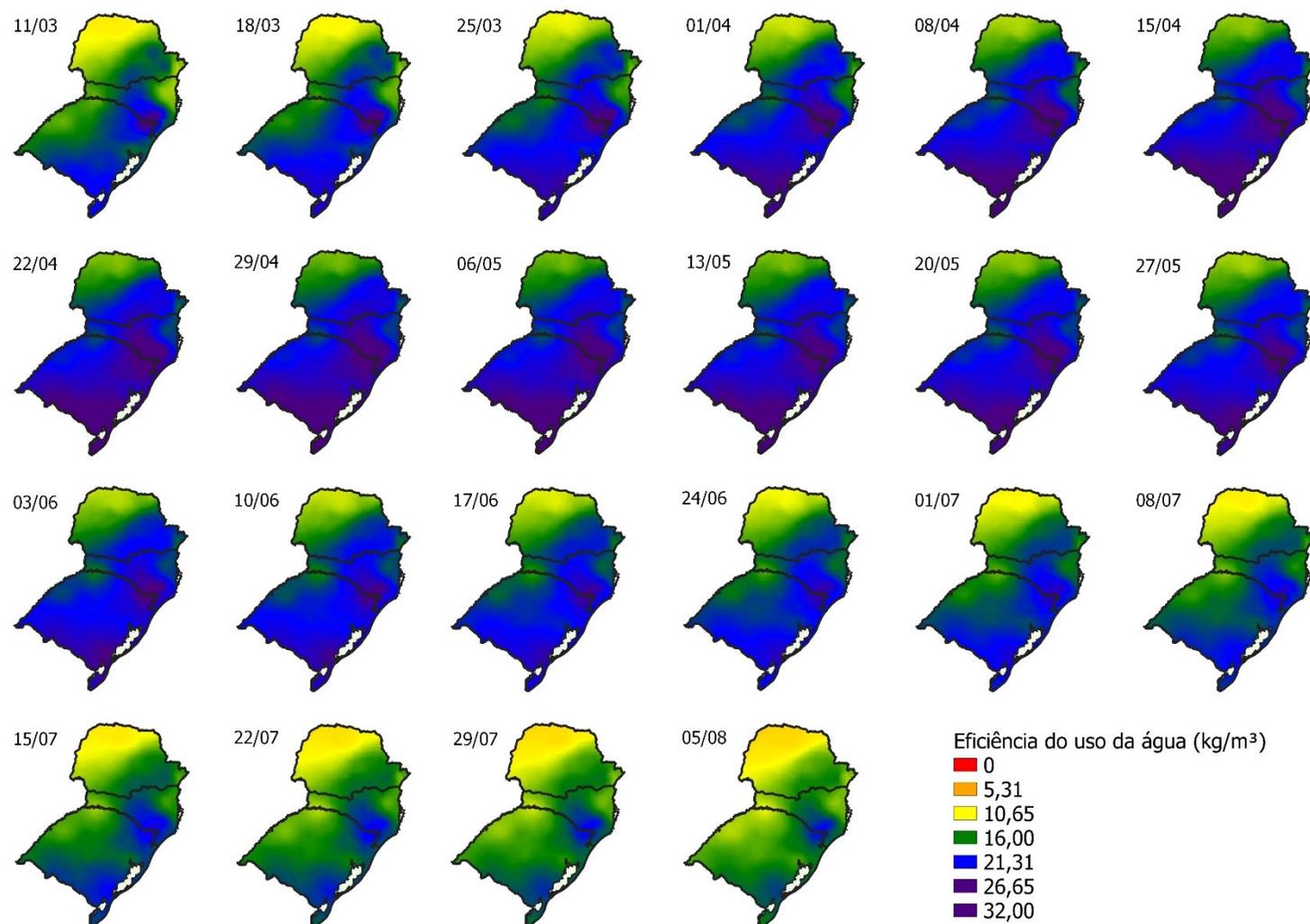
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 46. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



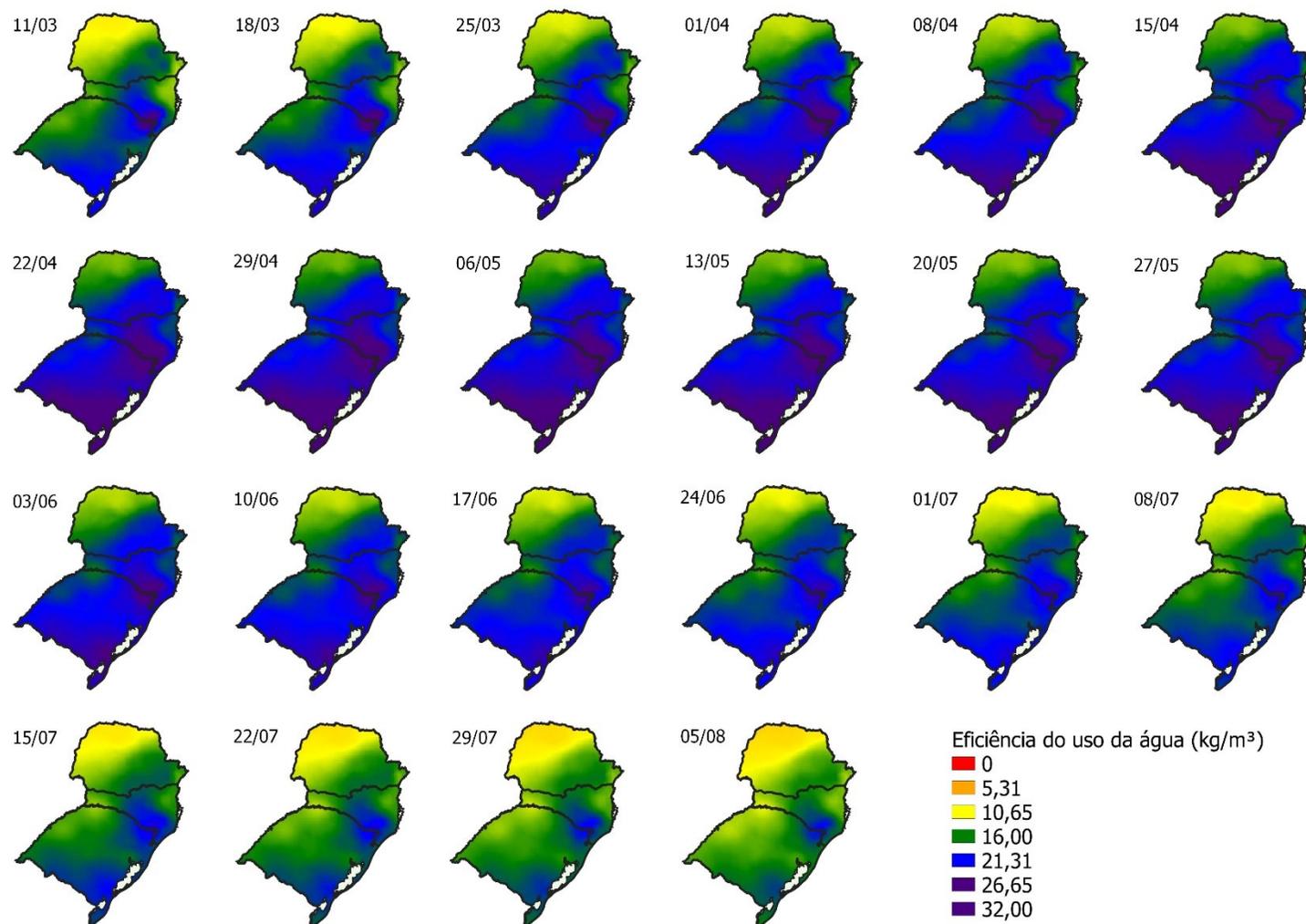
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 47. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



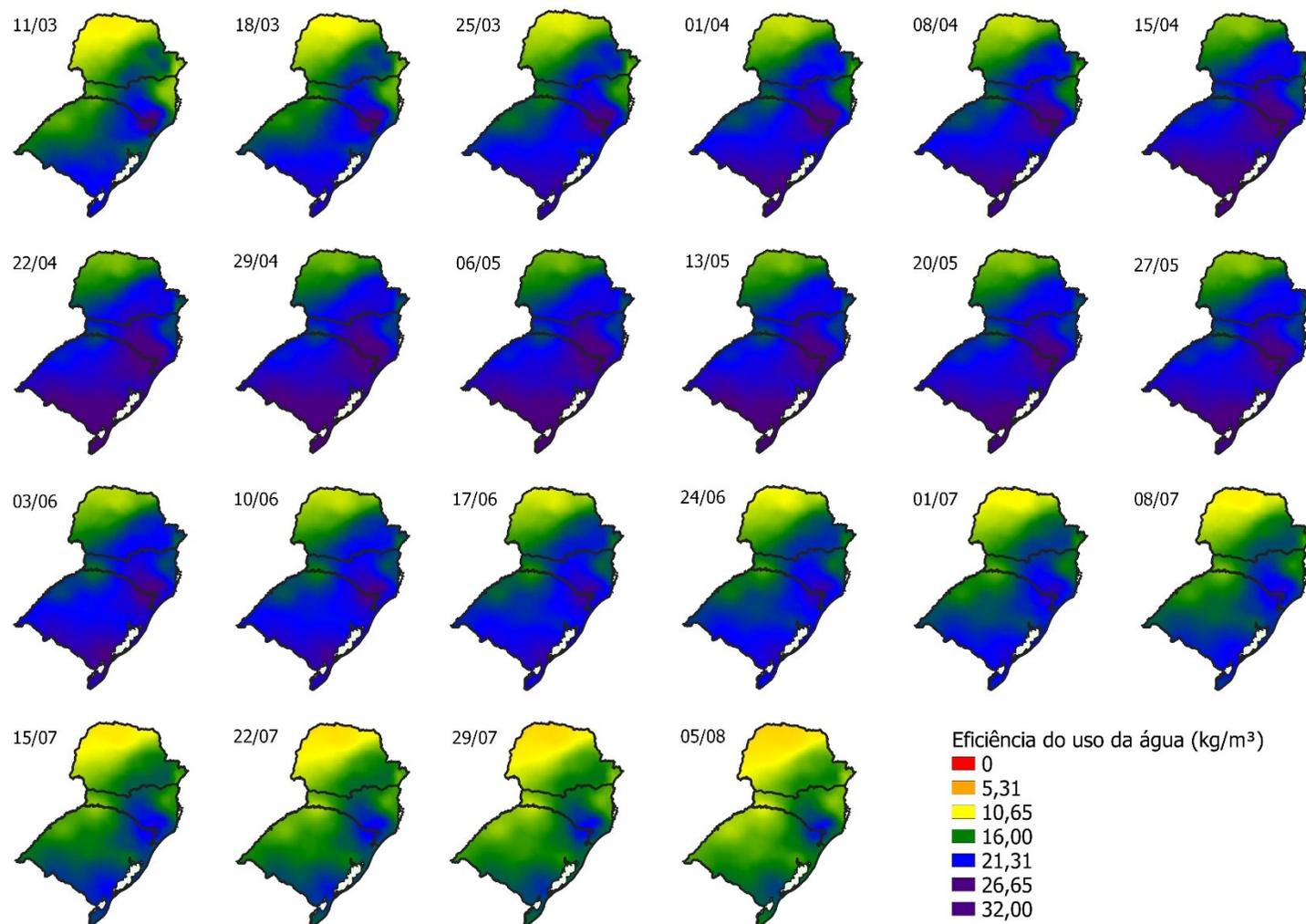
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 48. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



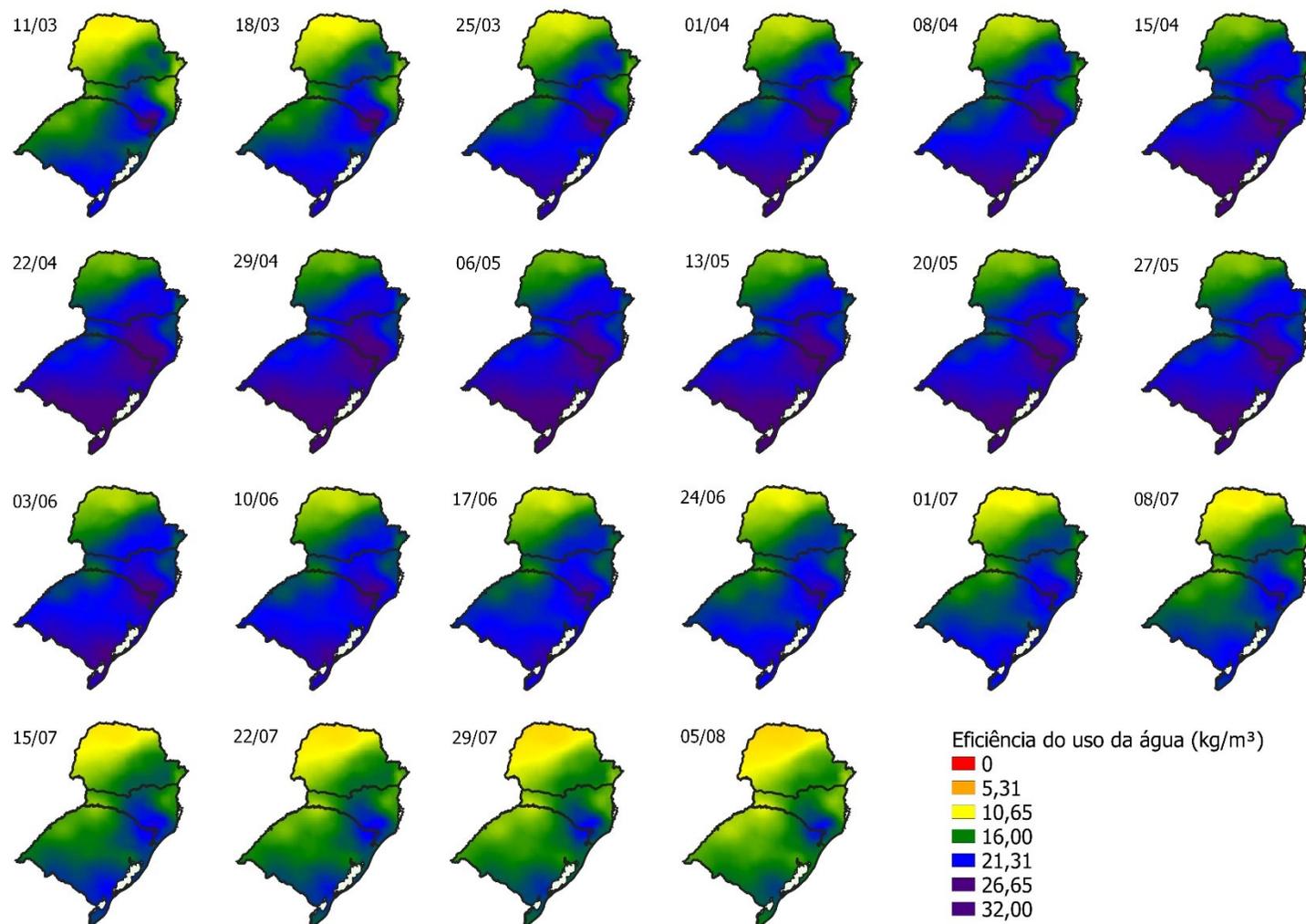
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 49. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



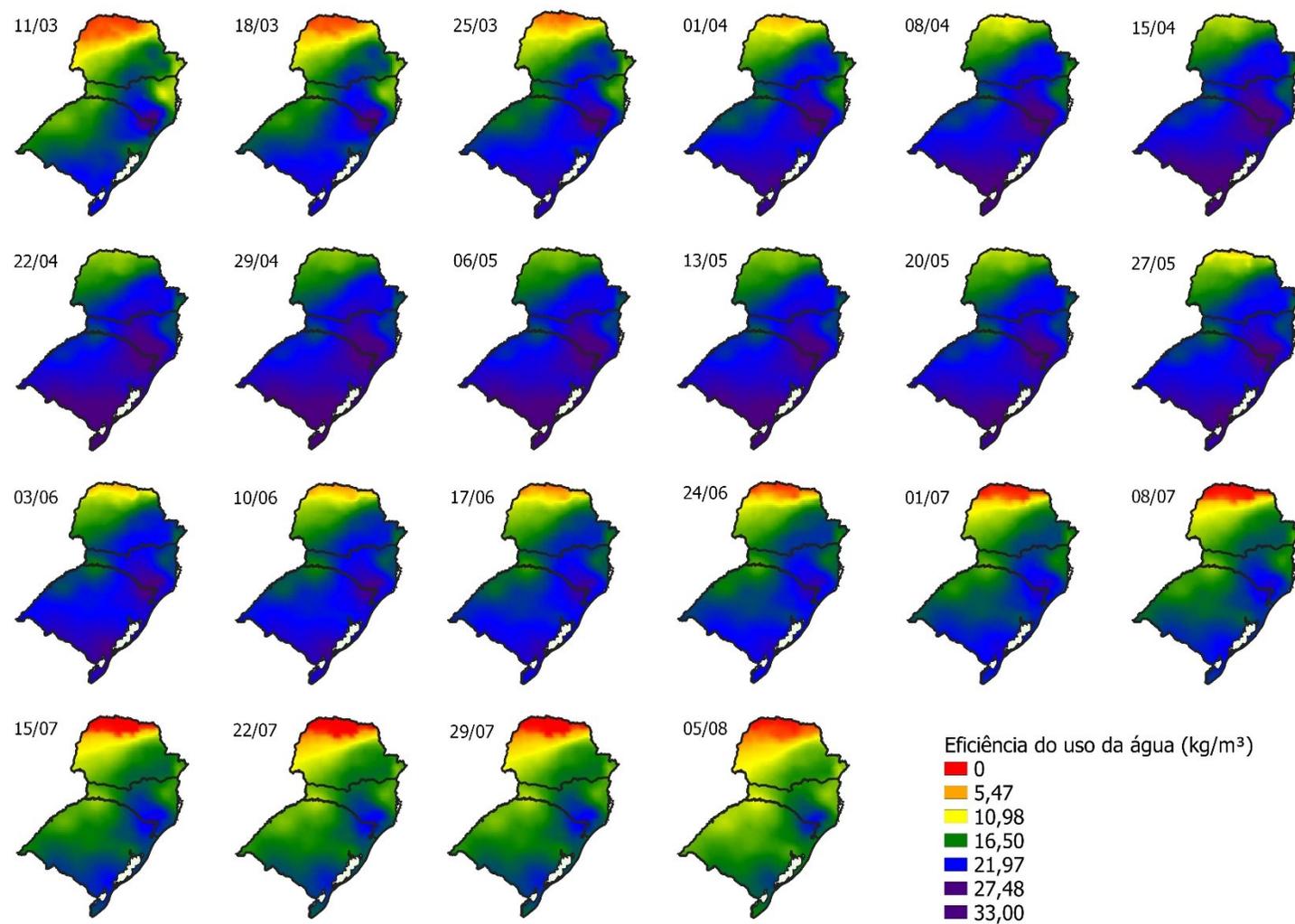
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 50. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 4.5 2070.



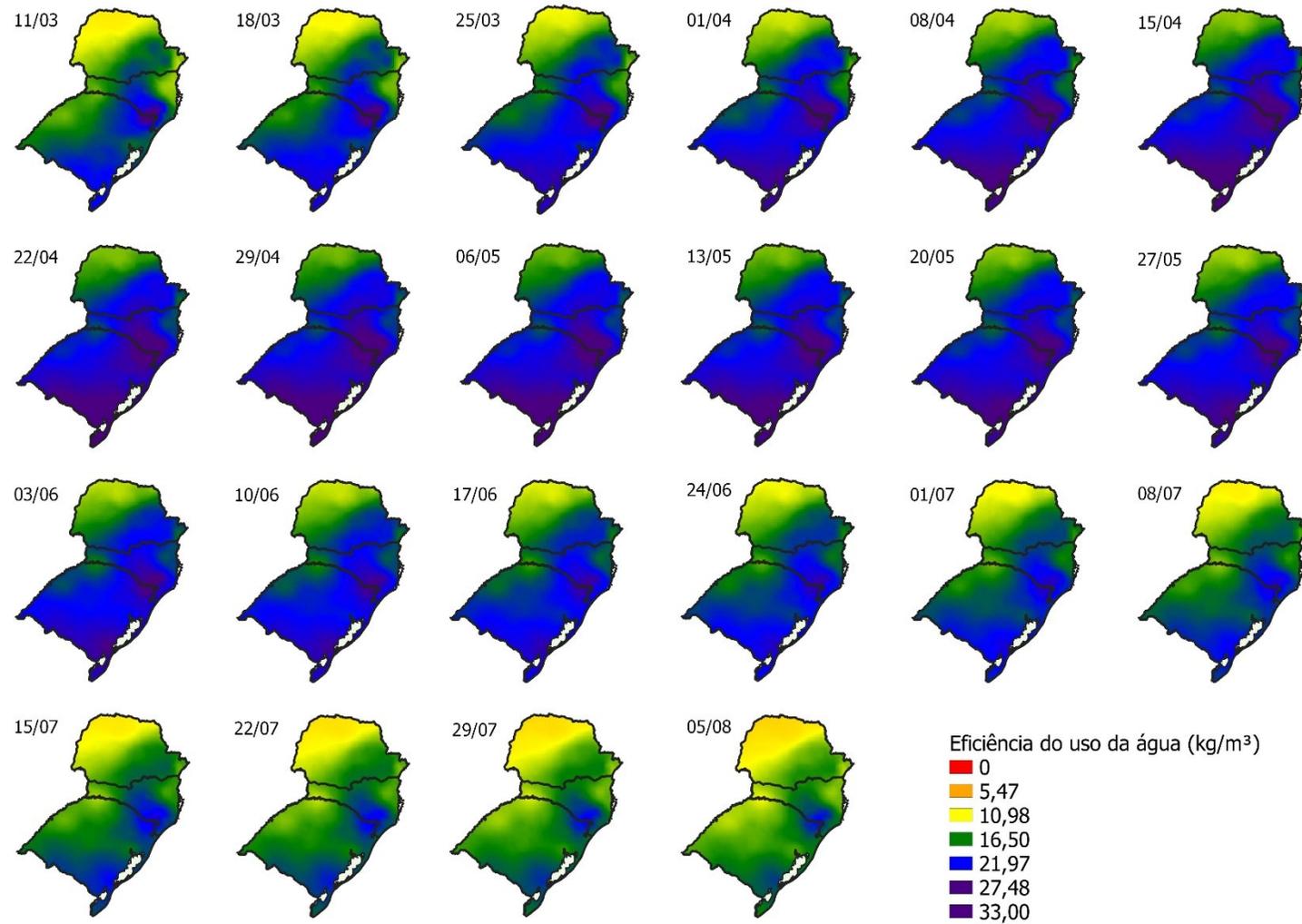
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 51. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



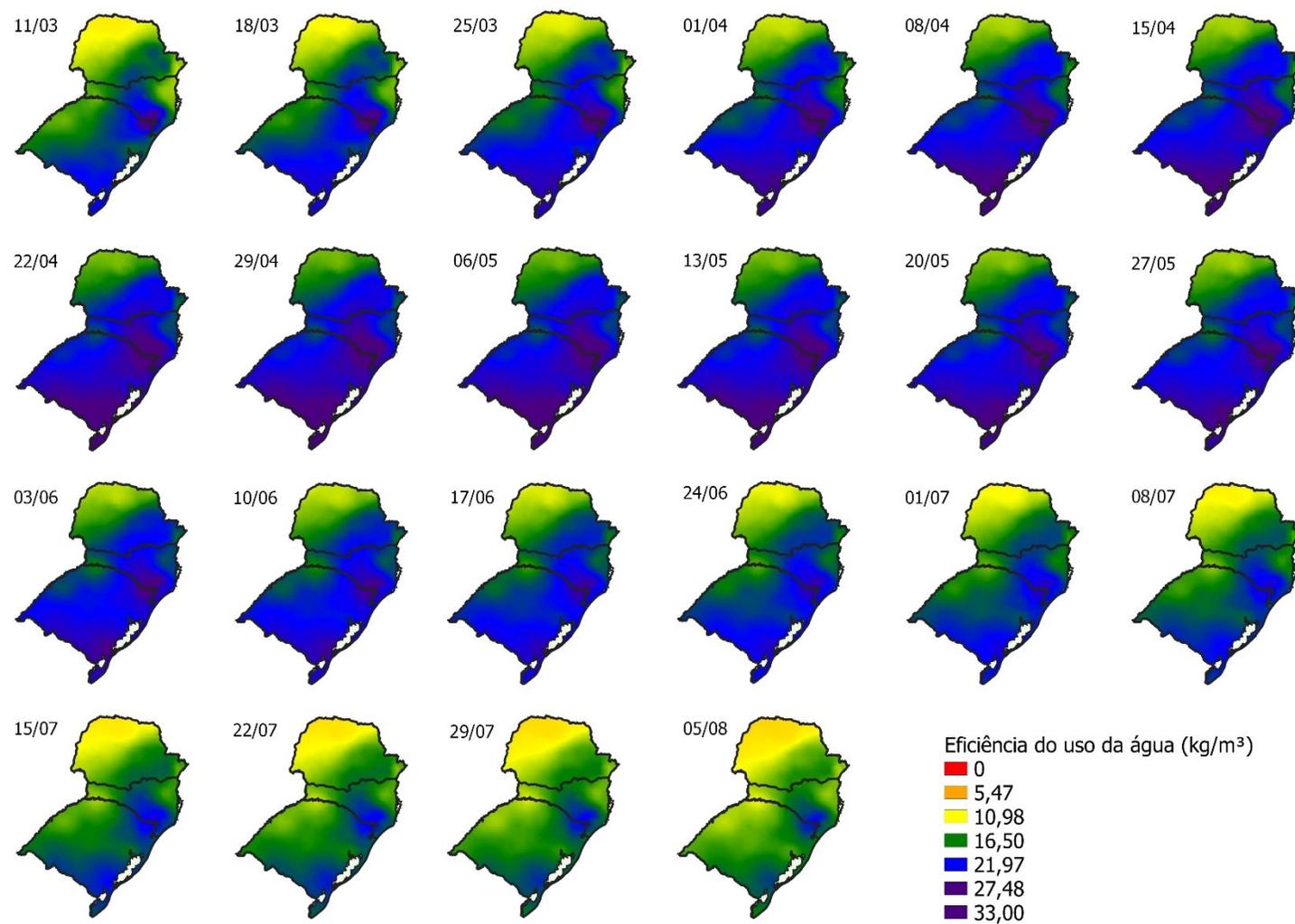
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 52. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



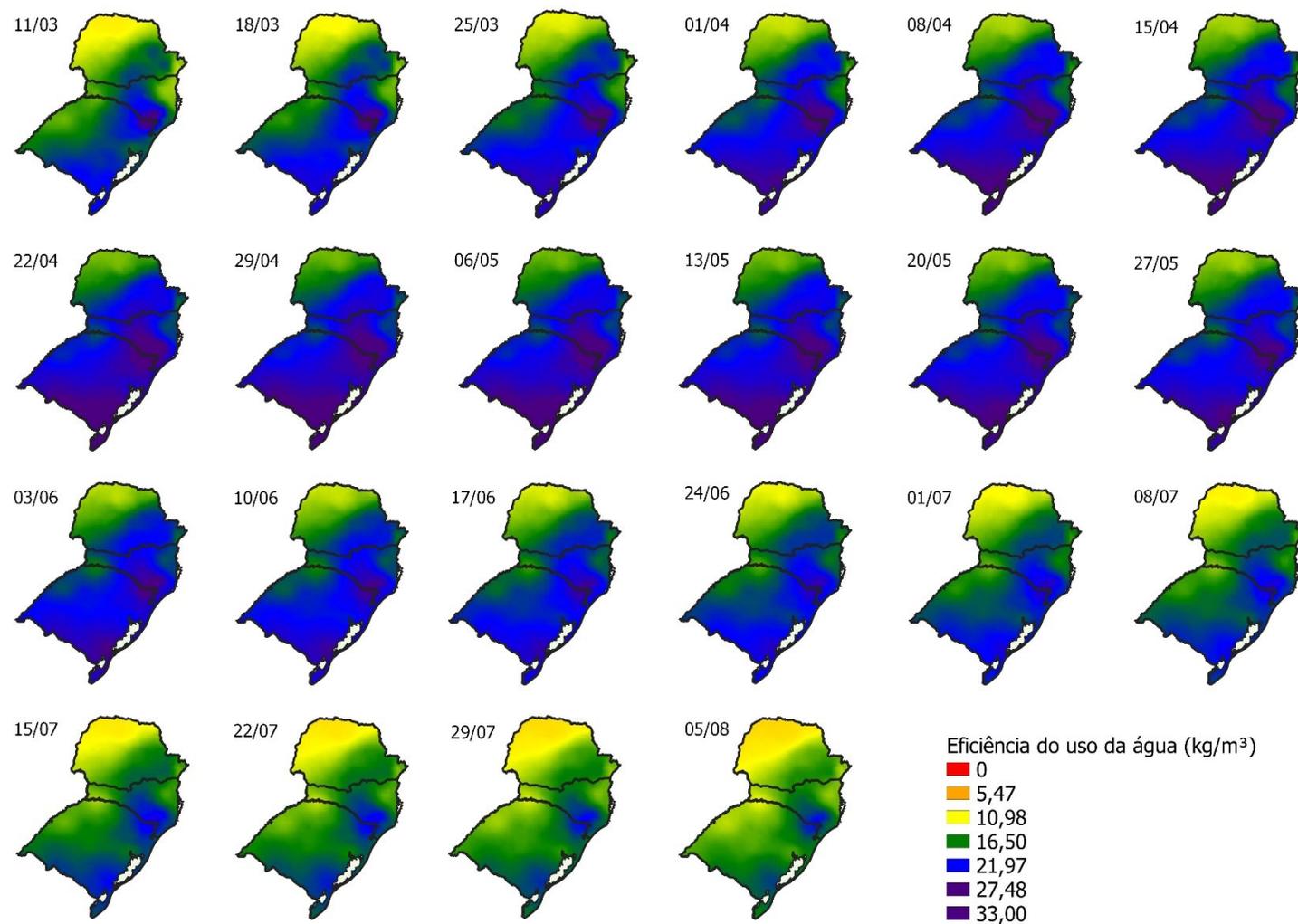
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 53. . Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 75% no cenário RCP 8.5 50.



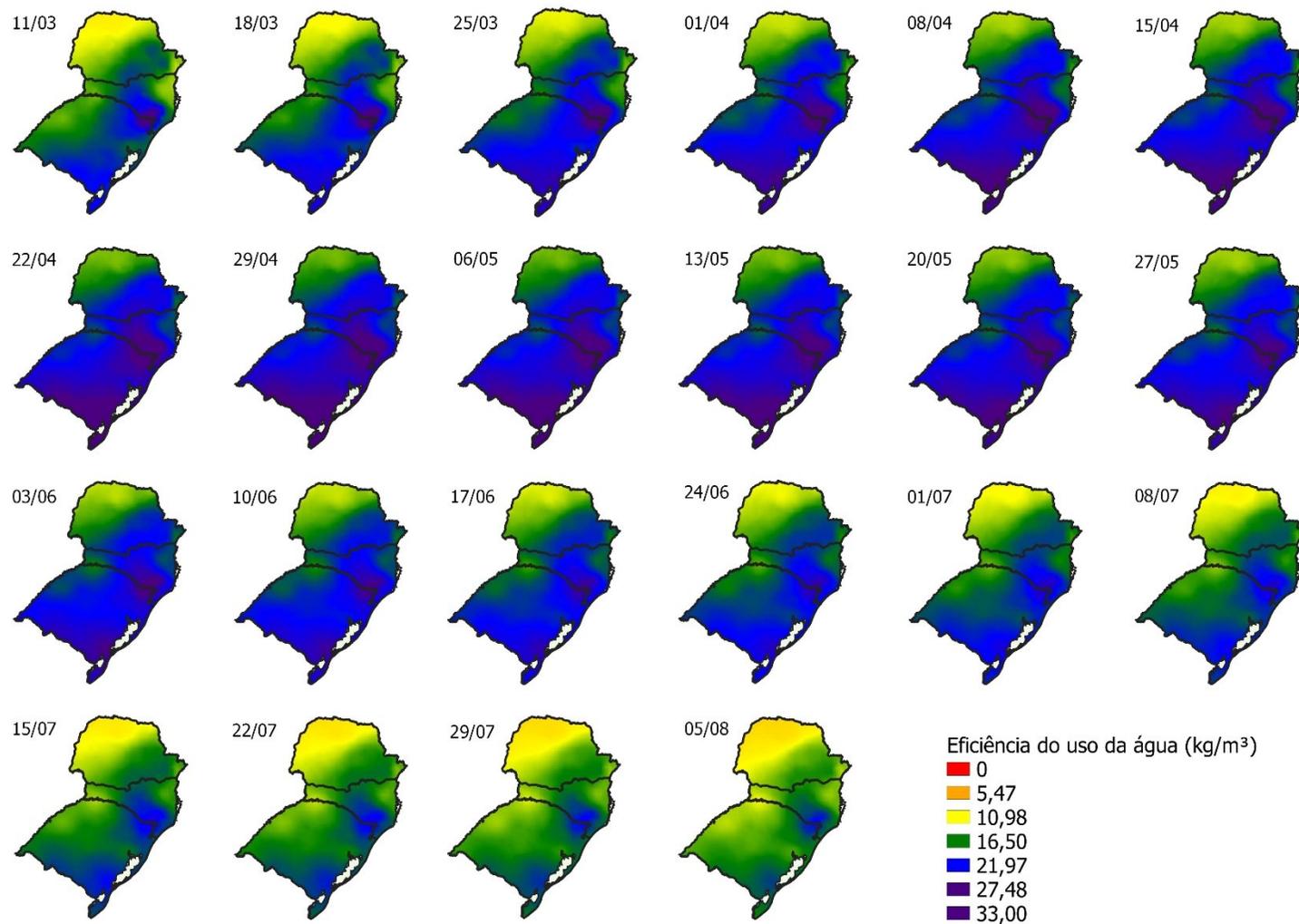
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 54. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



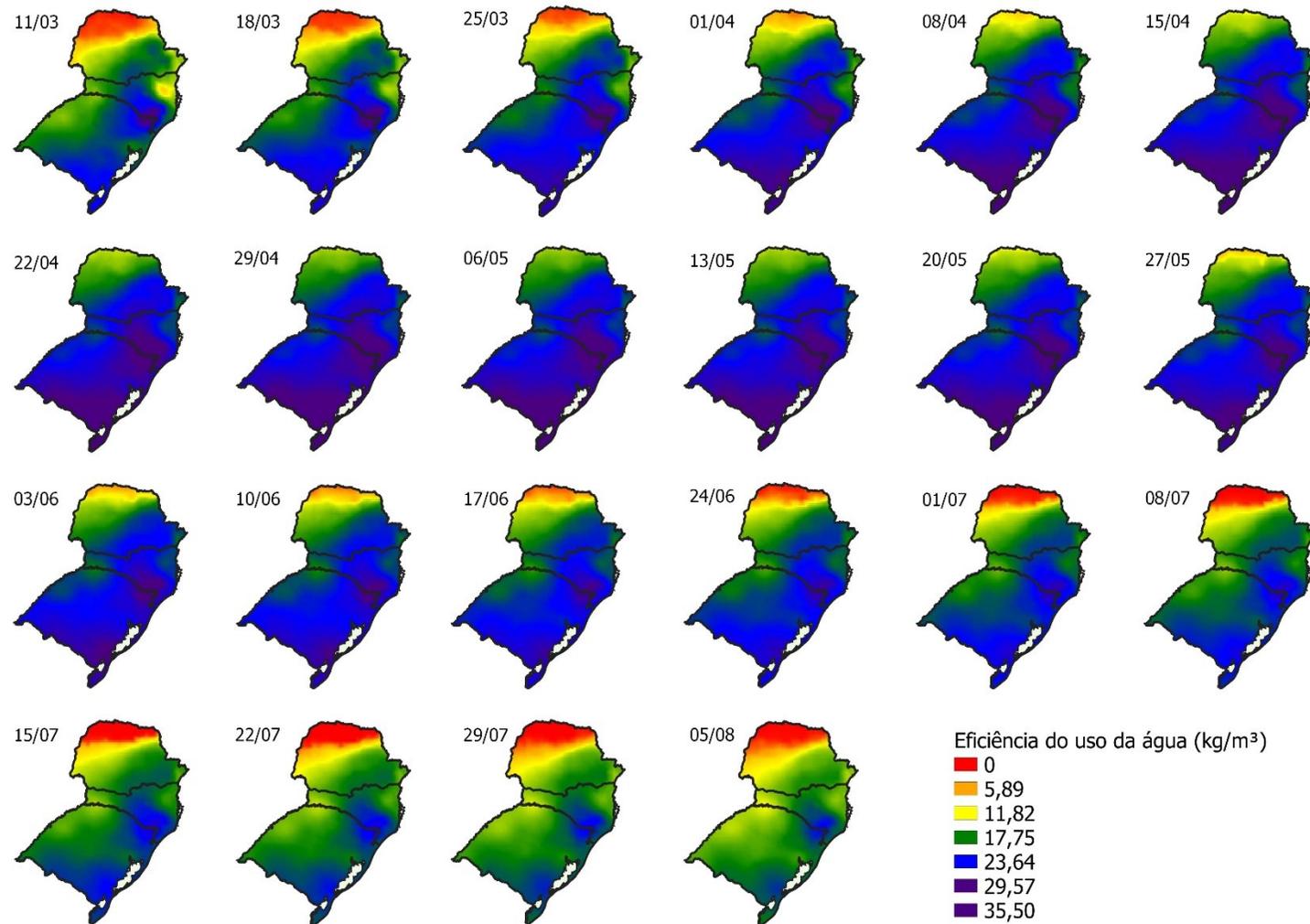
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 55. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2050.



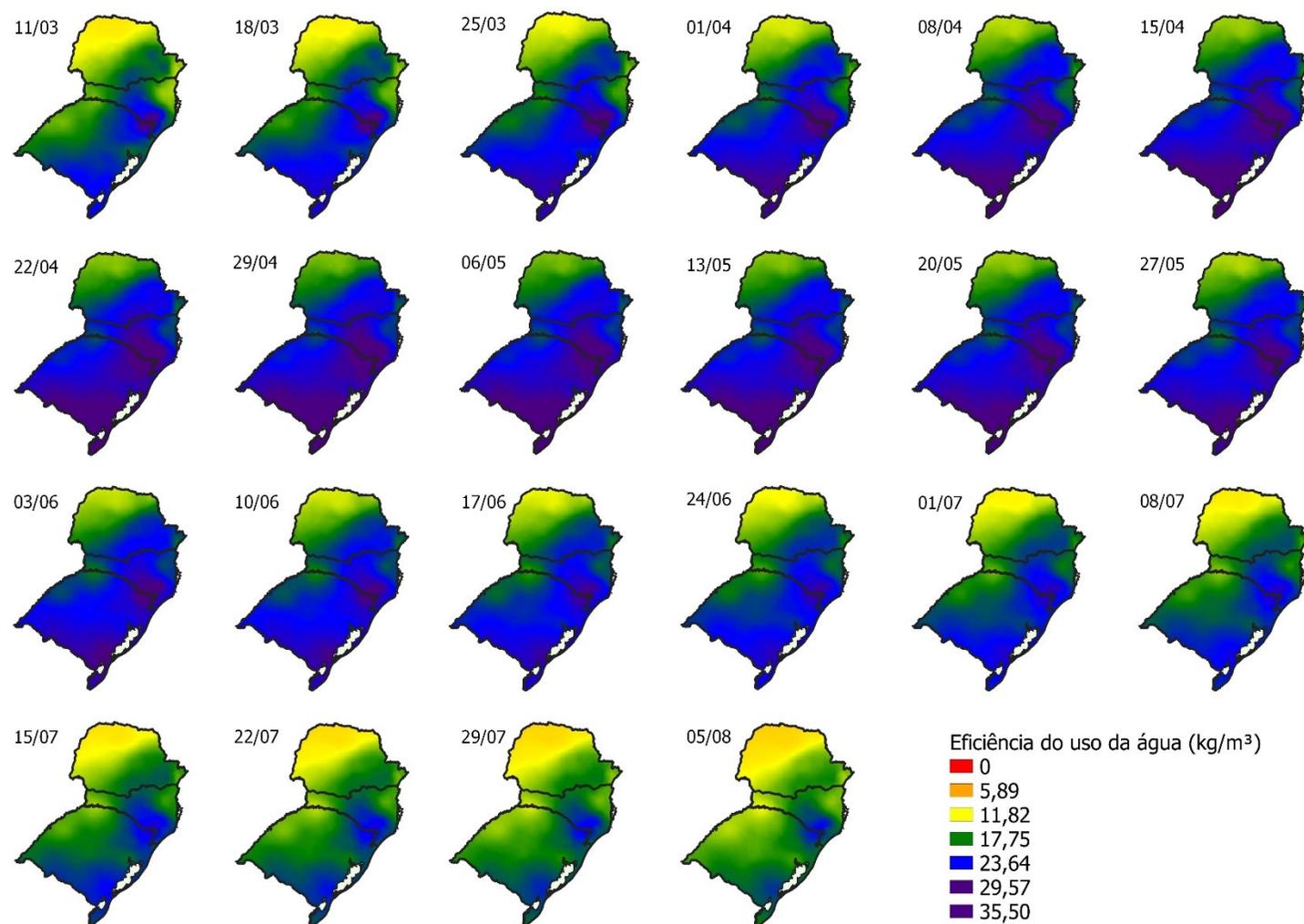
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 56. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



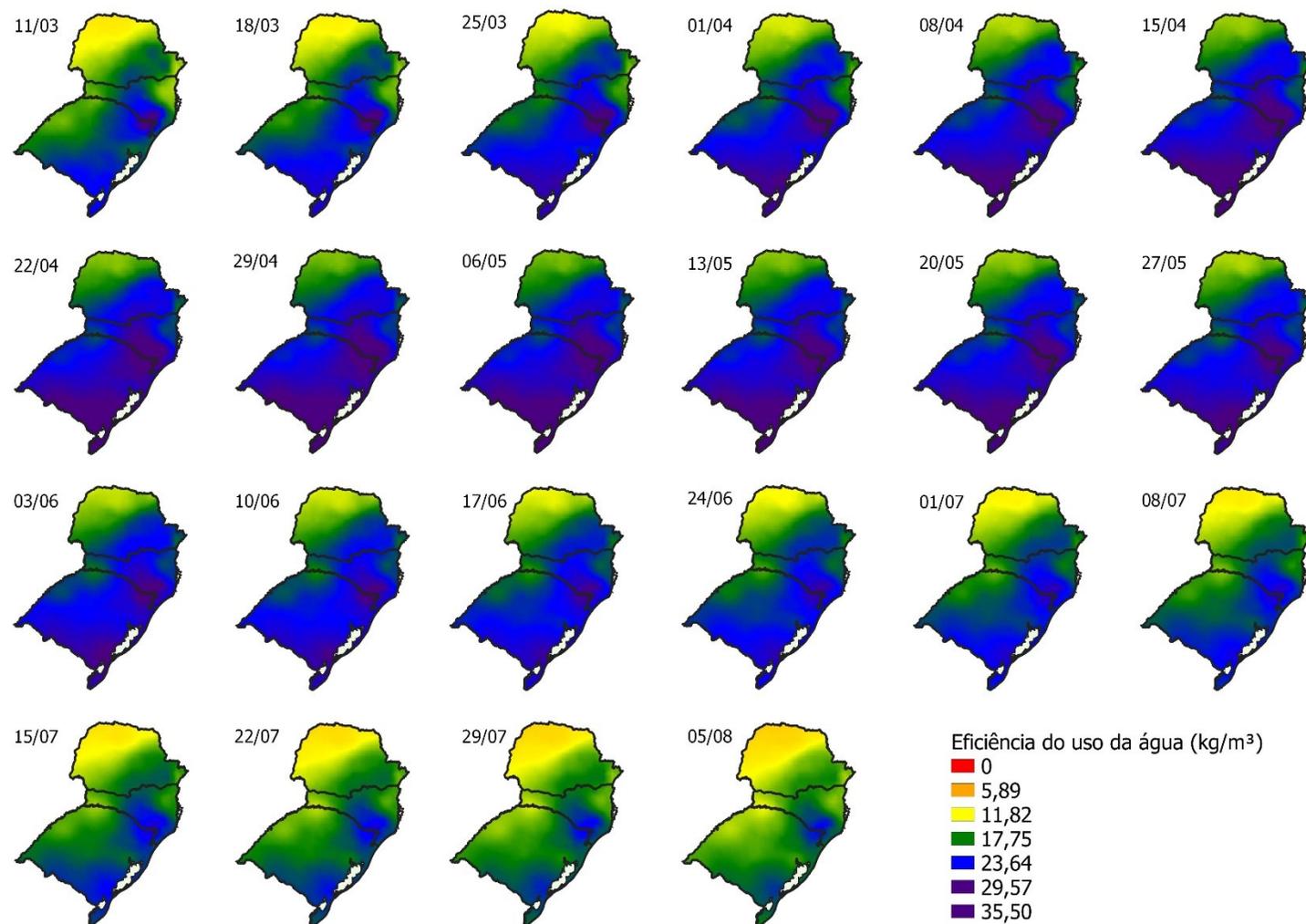
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 57. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



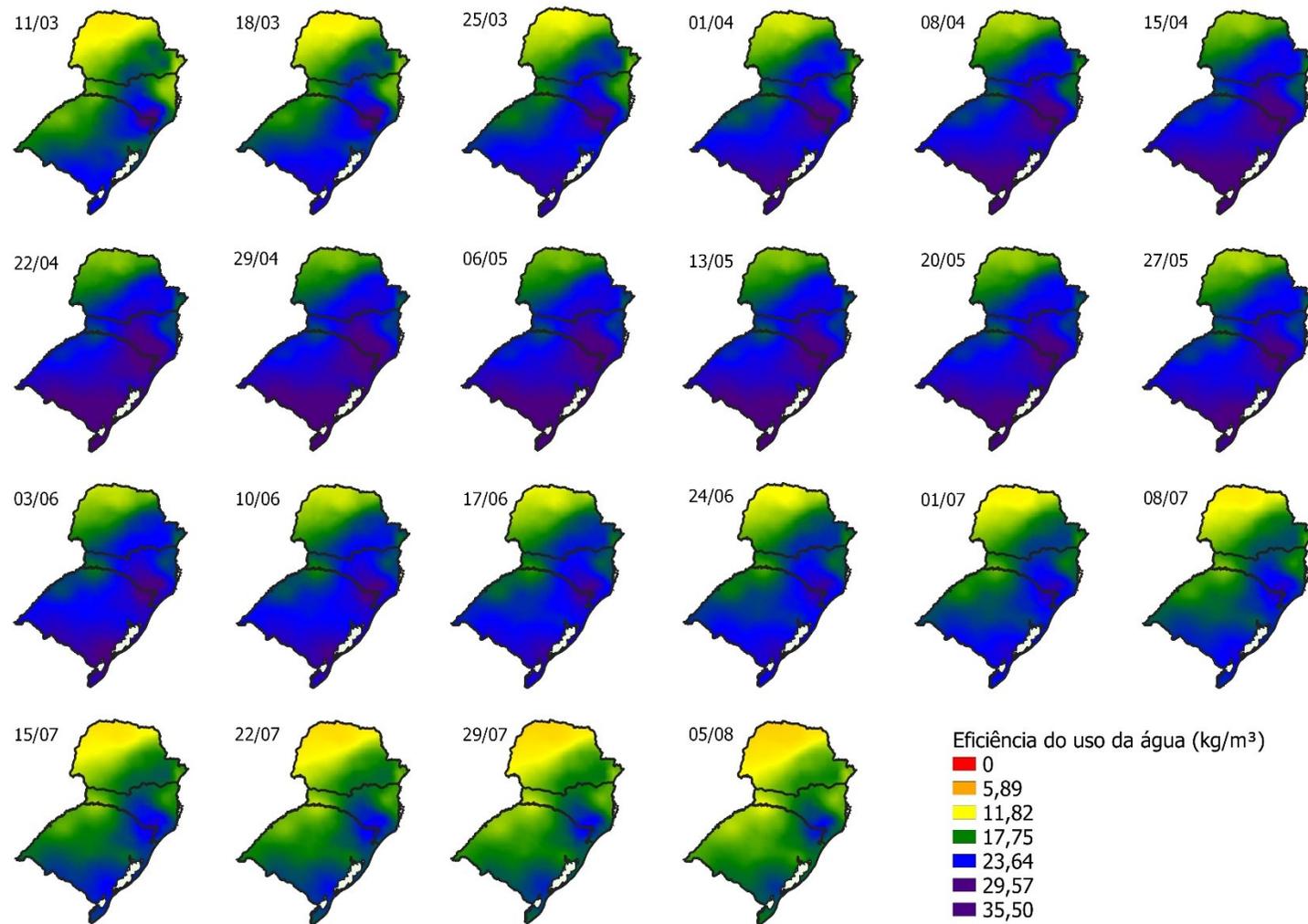
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 58. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 70% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



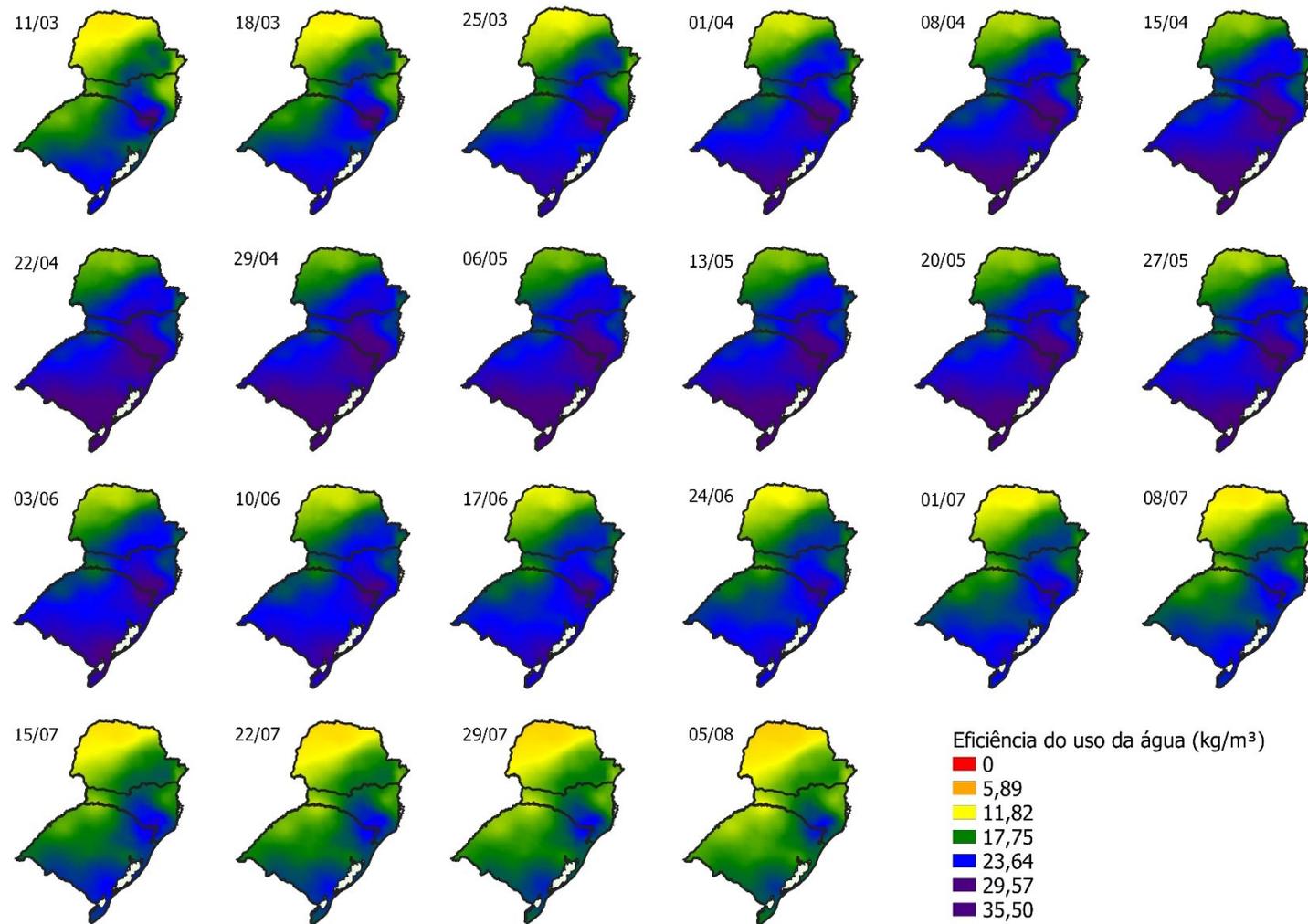
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 59. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 60. Eficiência do uso da água considerando evapotranspiração da cultura e irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário RCP 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Nos diferentes cenários simulados de aumento de temperatura, variação da precipitação e aumento de CO<sub>2</sub> para as condições do local de estudo, o trigo foi favorecido em questão de aumento de produtividade (kg.ha<sup>-1</sup>). Nesta região, uma das limitações é a geada, todavia, com o aumento da temperatura mínima, diminuiu a probabilidade de ocorrência de geada na simulação. No modelo proposto a antese começa a falhar com temperaturas de 5°C e a 0°C devido ao estresse por temperatura para a planta nesta fase. O aumento da temperatura máxima não ocasionou estresses severos a cultura, a ponto de ocasionar perdas significativas, contudo, o estresse hídrico restringe as datas de semeaduras para o cultivo sequeiro e para o cultivo irrigado baseado em eficiência do uso da água.

Considerando todo o Sul do Brasil, o melhor desempenho de produção foi observado no cenário RCP 8.5 em 2070 com uma produção máxima no cultivo irrigado (Figura 63, 64, 65 e 66) ou sequeiro (Figura 62) de 8276 kg.ha<sup>-1</sup>.

Nos locais em que a cultura é improdutivo na forma sequeira, o cultivo irrigado teve a máxima produtividade, de 5278 kg.ha<sup>-1</sup>, na lâmina de 50% (Figura 63) e de 5346 kg.ha<sup>-1</sup> na lâmina de 75% (Figura 64). Em locais onde o estresse hídrico é um limitante para a cultura, por exemplo norte Paraná, a lâmina de 75% (Figura 64) se mostrou mais eficiente do que a de 50% (Figura 63) em questão de produção. No mesmo cenário, mas para o ano de 2050, a produção máxima foi de 7584 kg.ha<sup>-1</sup>. Em locais que sofrem de estresse hídrico, a irrigação de 50% teve como resposta mínima de produção de 4743 kg.ha<sup>-1</sup> e uma irrigação de 75% com resposta mínima do local de estudo de 4821kg.ha<sup>-1</sup>.

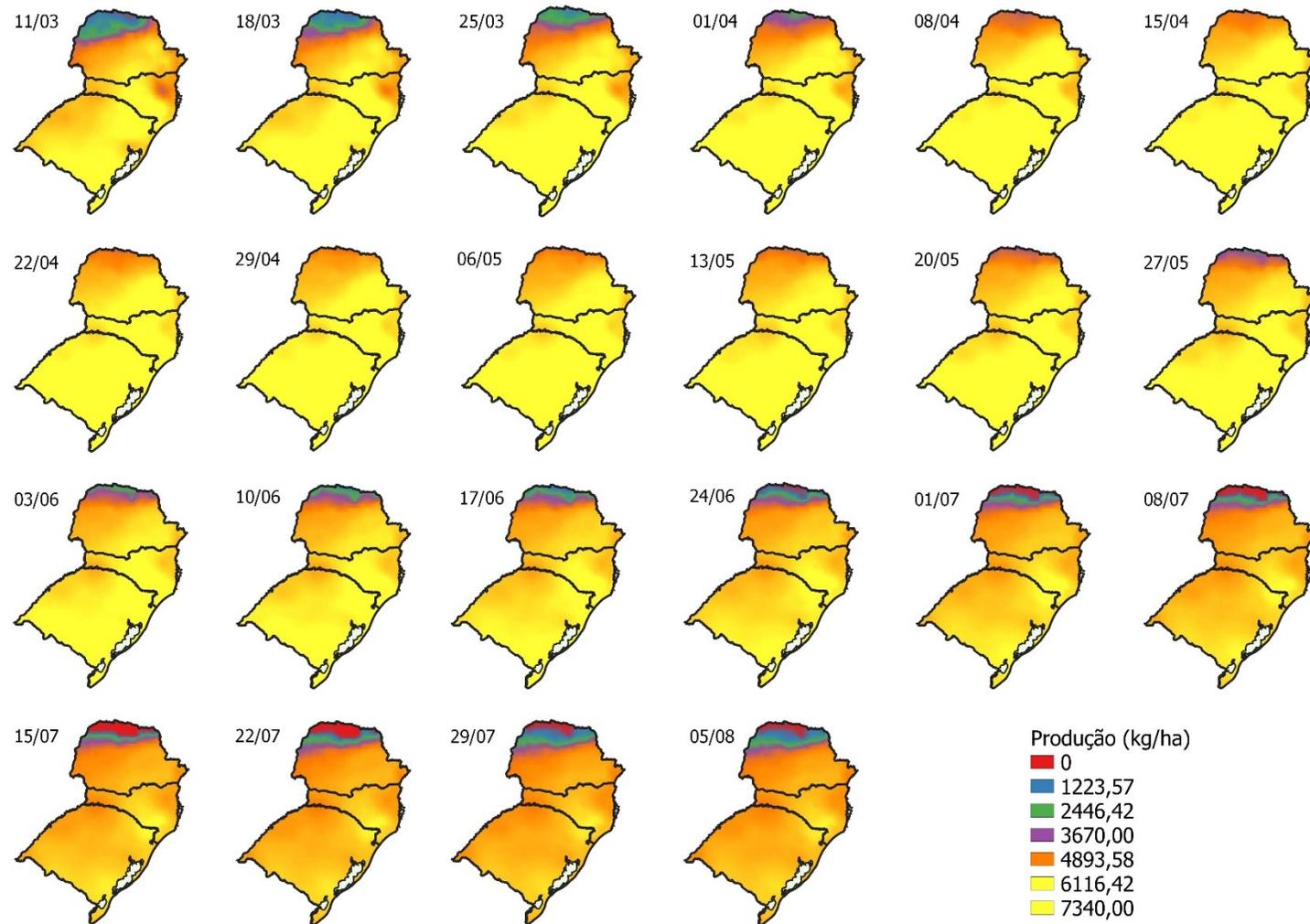
No cenário mais otimista, RCP 4.5, no ano de projeção de 2050 se teve uma produção máxima para o cultivo irrigado e sequeiro de 7340 kg.ha<sup>-1</sup>. Conquanto, no mesmo no cenário, mas para o ano 2070. Se obteve a produção máximas obtendo-se a produtividade máxima de 7492 kg.ha<sup>-1</sup> (Figura 61).

Figura 61. Máxima produtividade (kg.ha<sup>-1</sup>) nos diferentes cenários de mudanças climáticas.



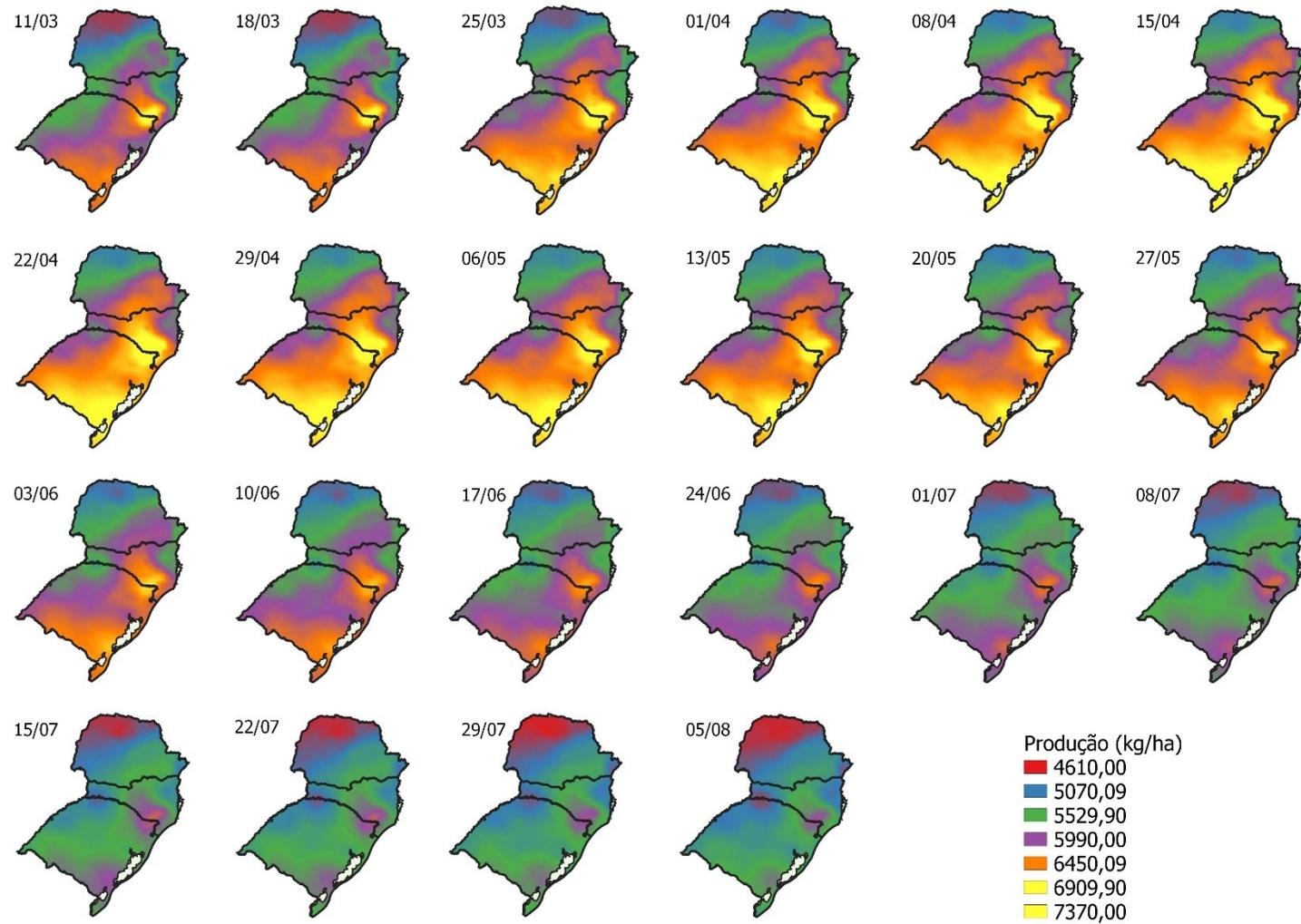
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 62. Produtividade da cultura (kg.ha<sup>-1</sup>) em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.



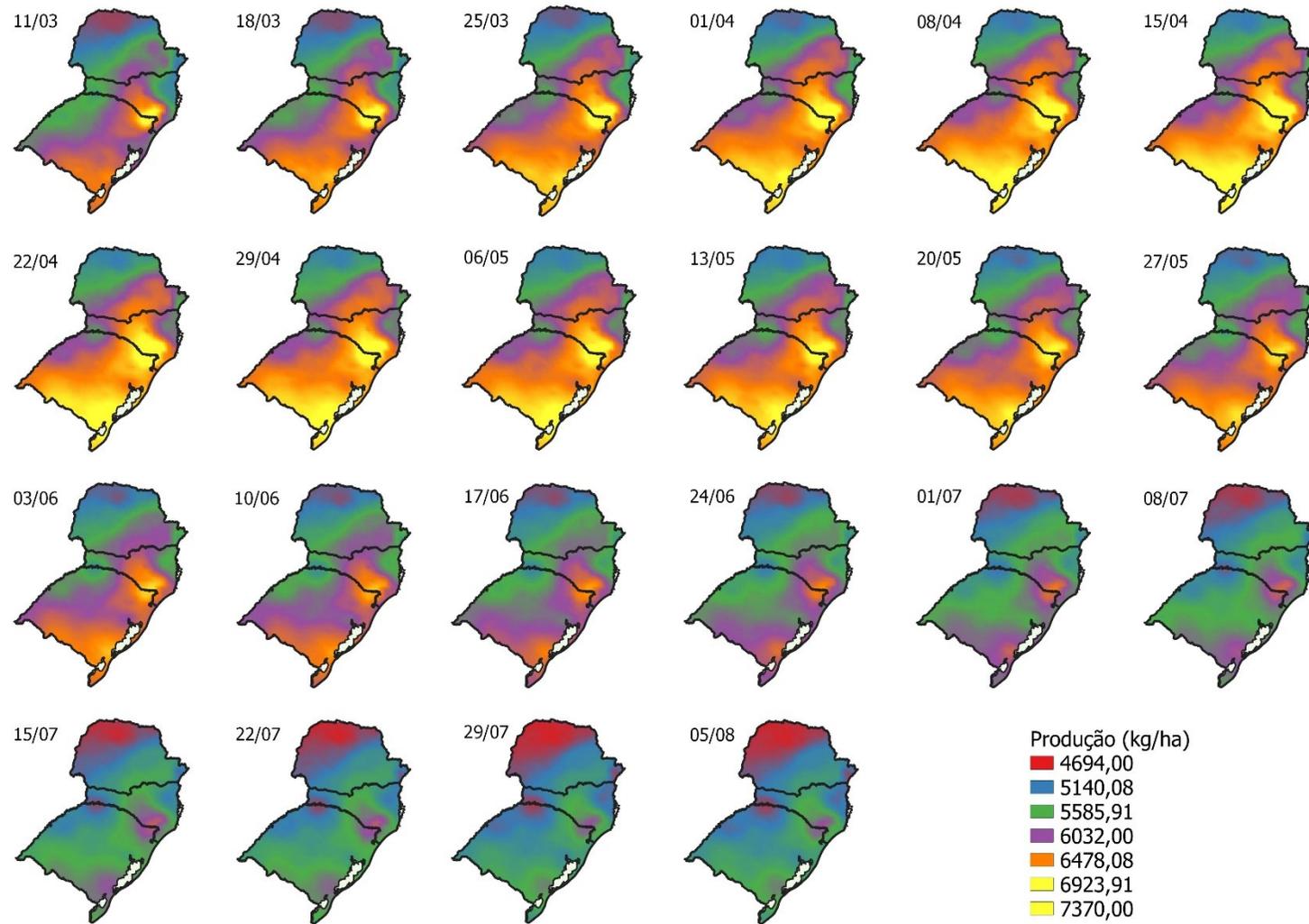
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 63. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.



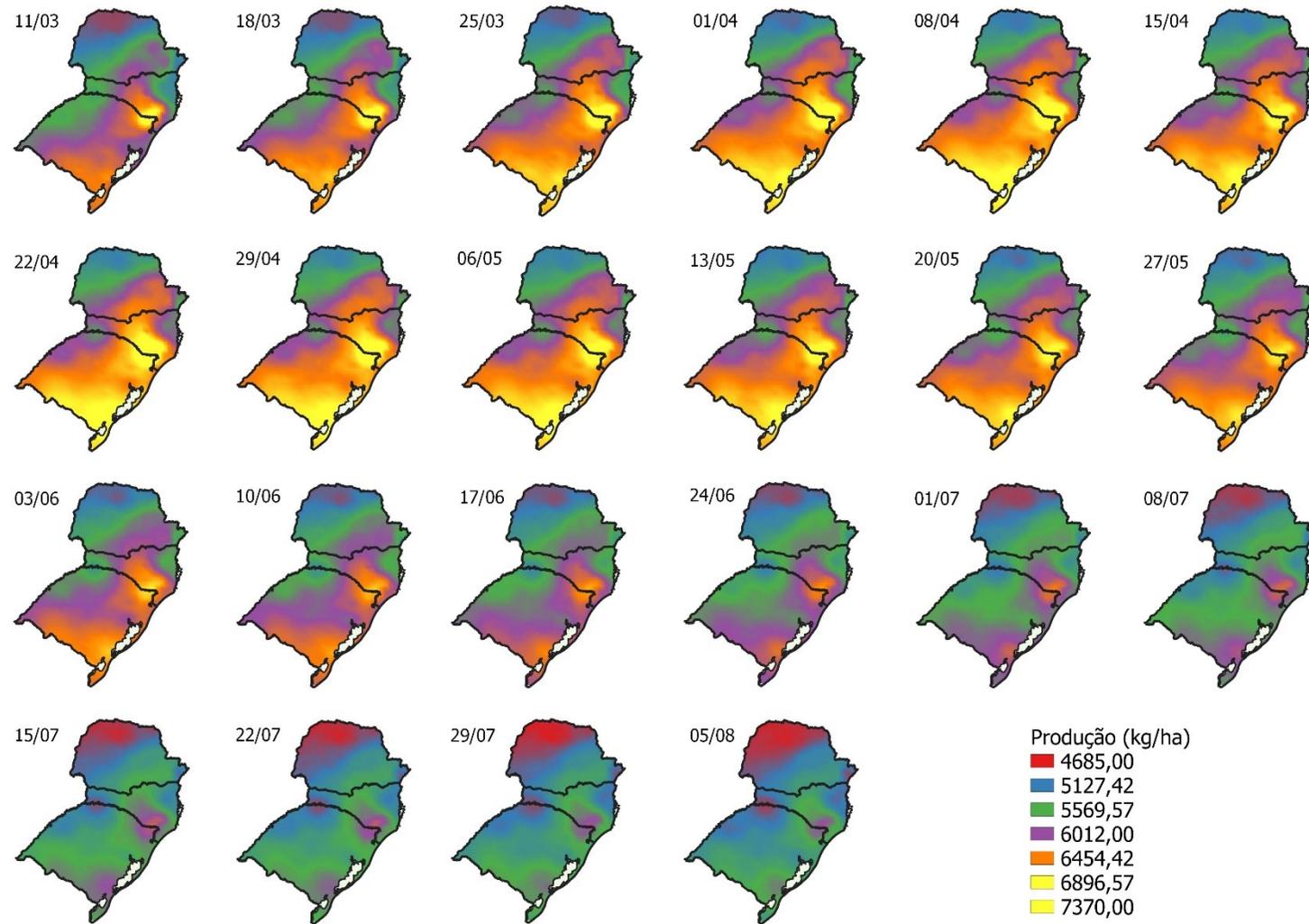
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 64. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.



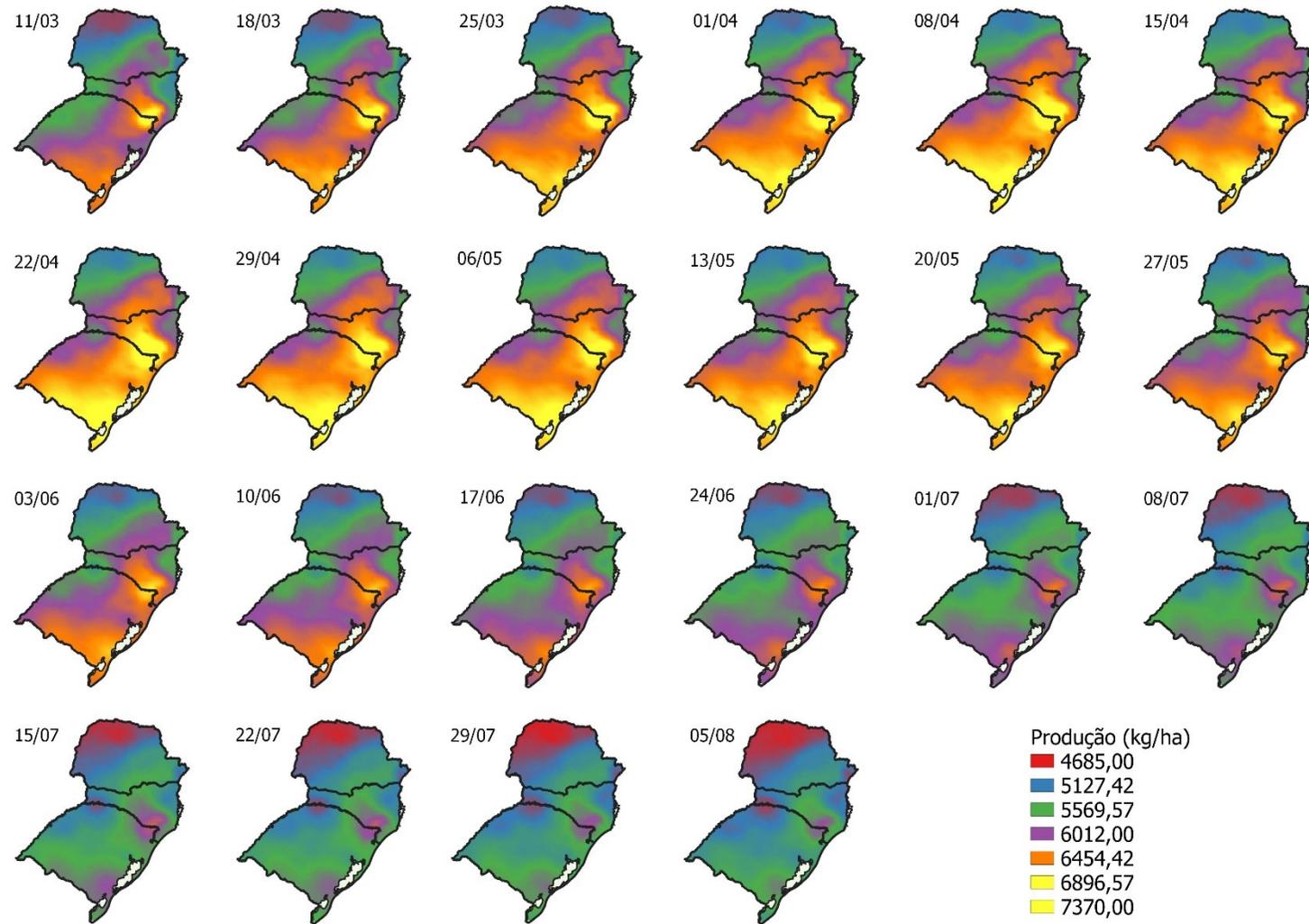
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 65. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.



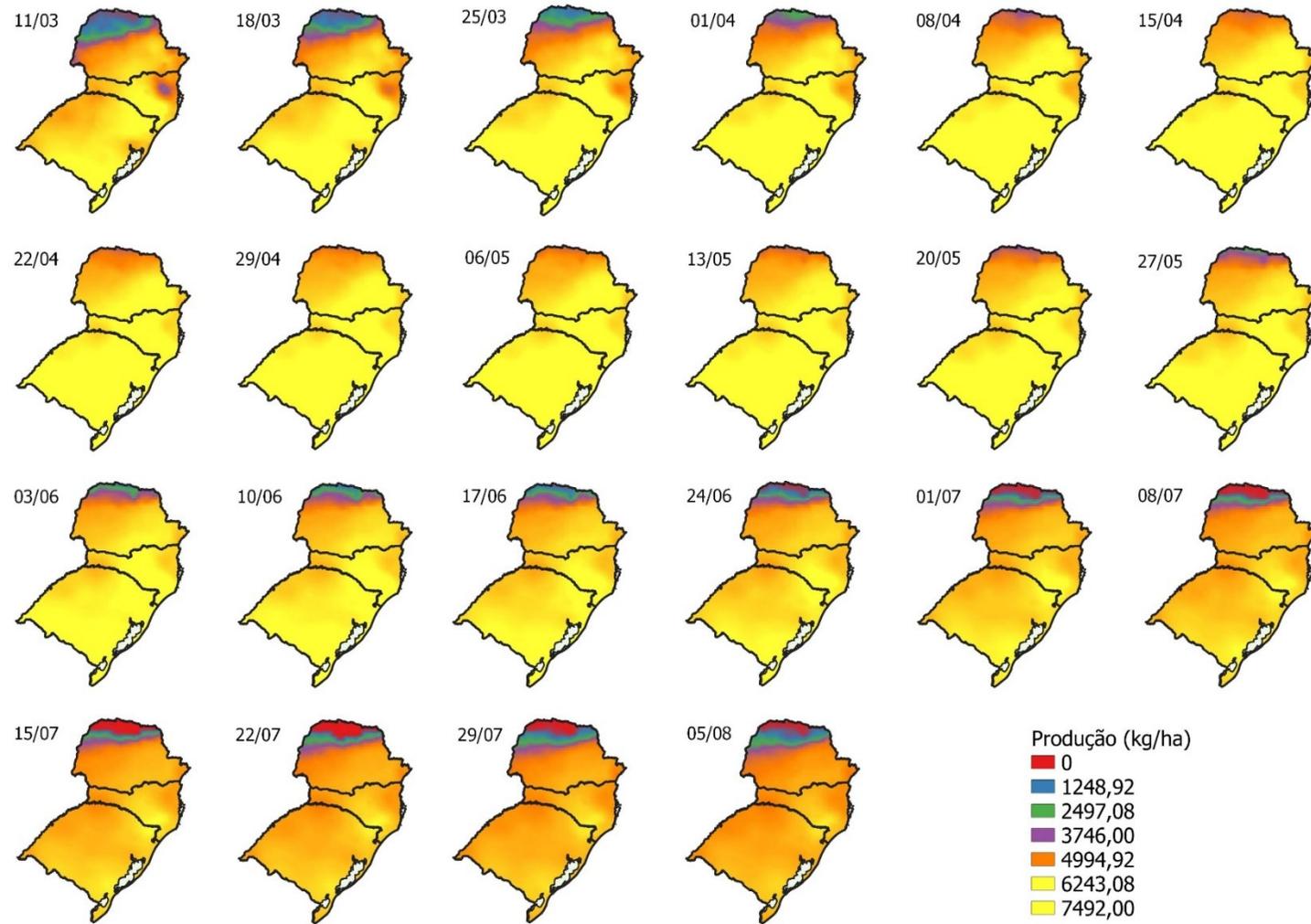
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 66. Produtividade da cultura (kg.ha<sup>-1</sup>) com irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2050.



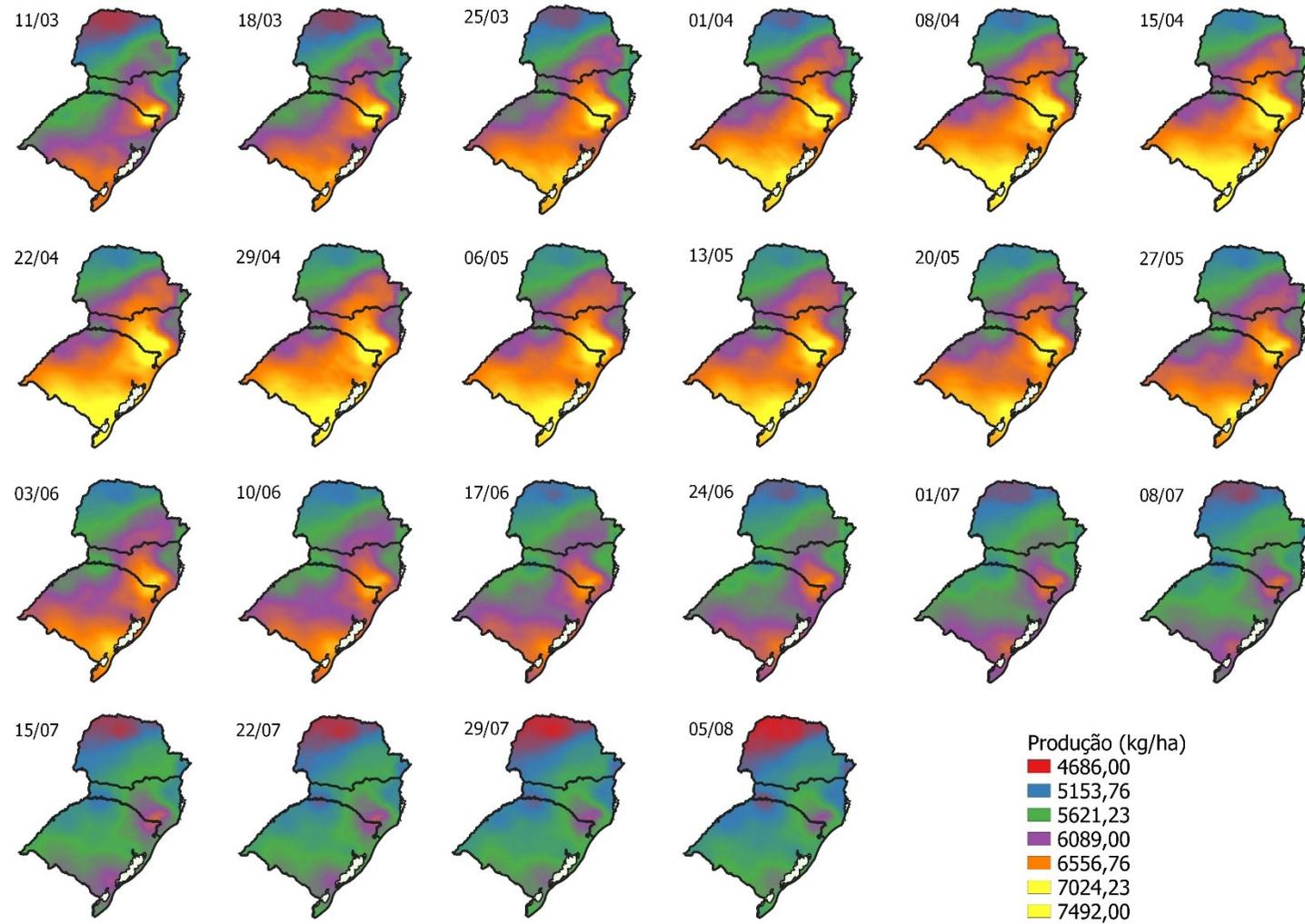
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 67. Produtividade da cultura (kg.ha<sup>-1</sup>) em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.



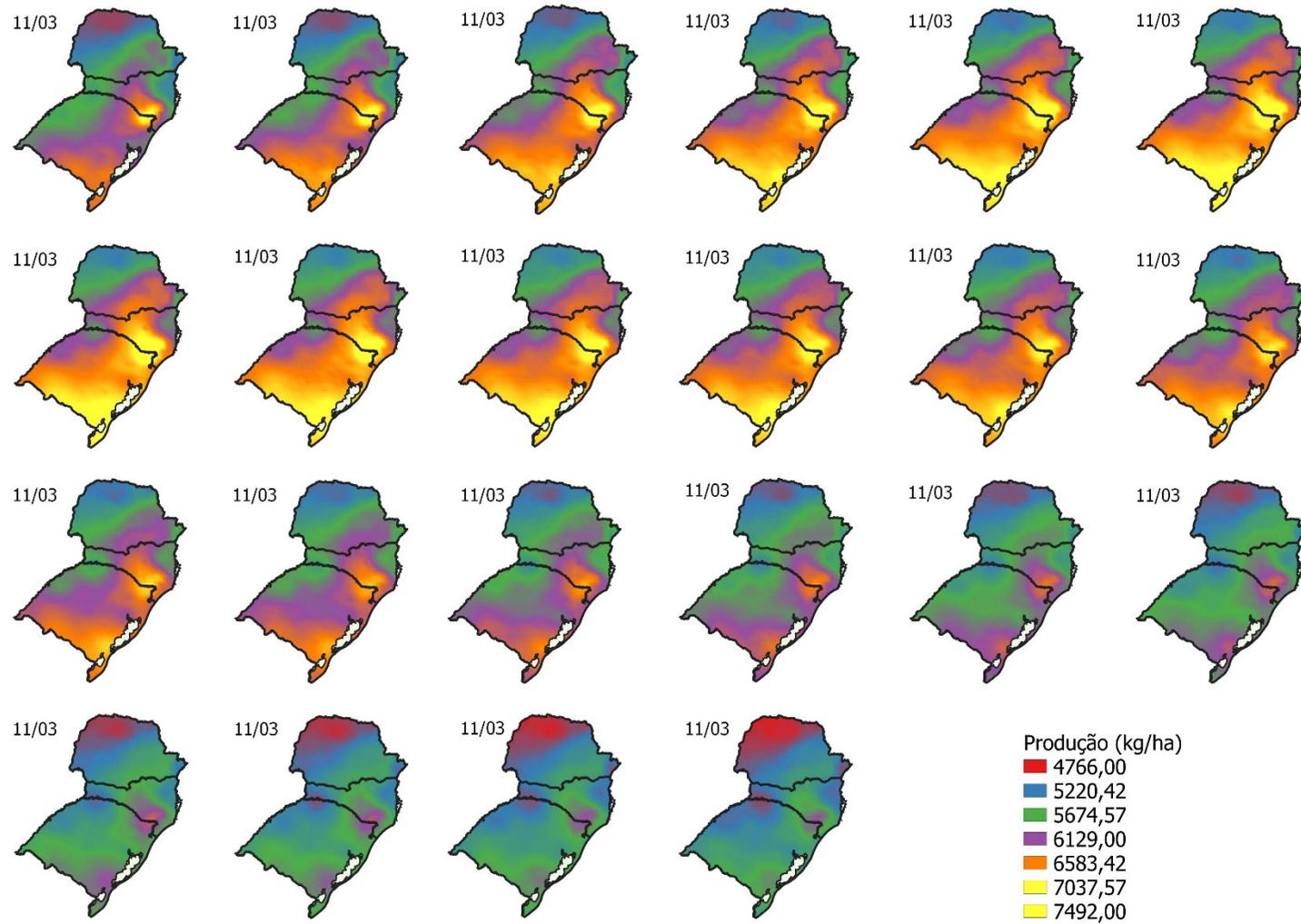
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 68. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.



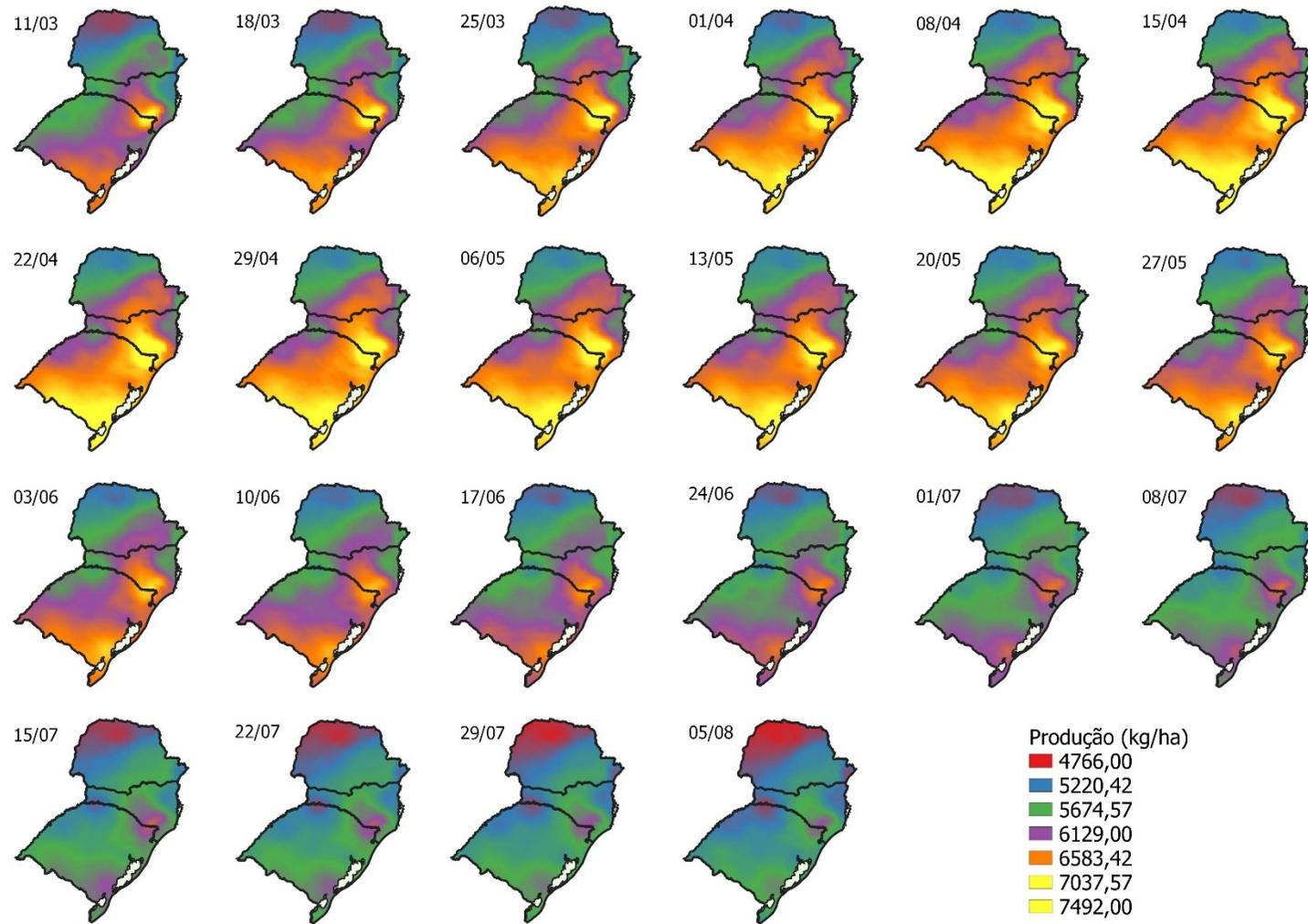
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 69. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.



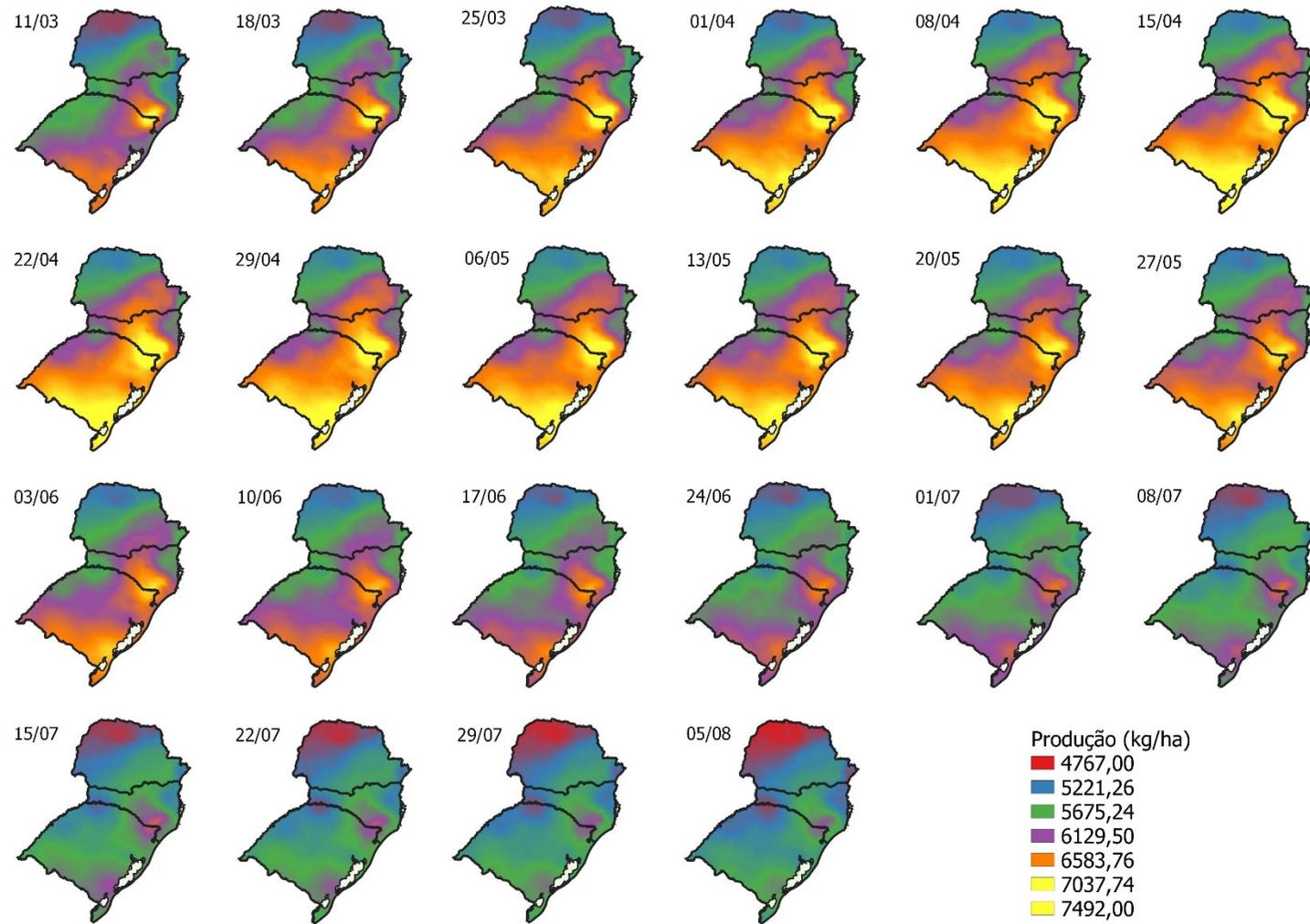
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 70. Produtividade da cultura (kg.ha<sup>-1</sup>) com irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.



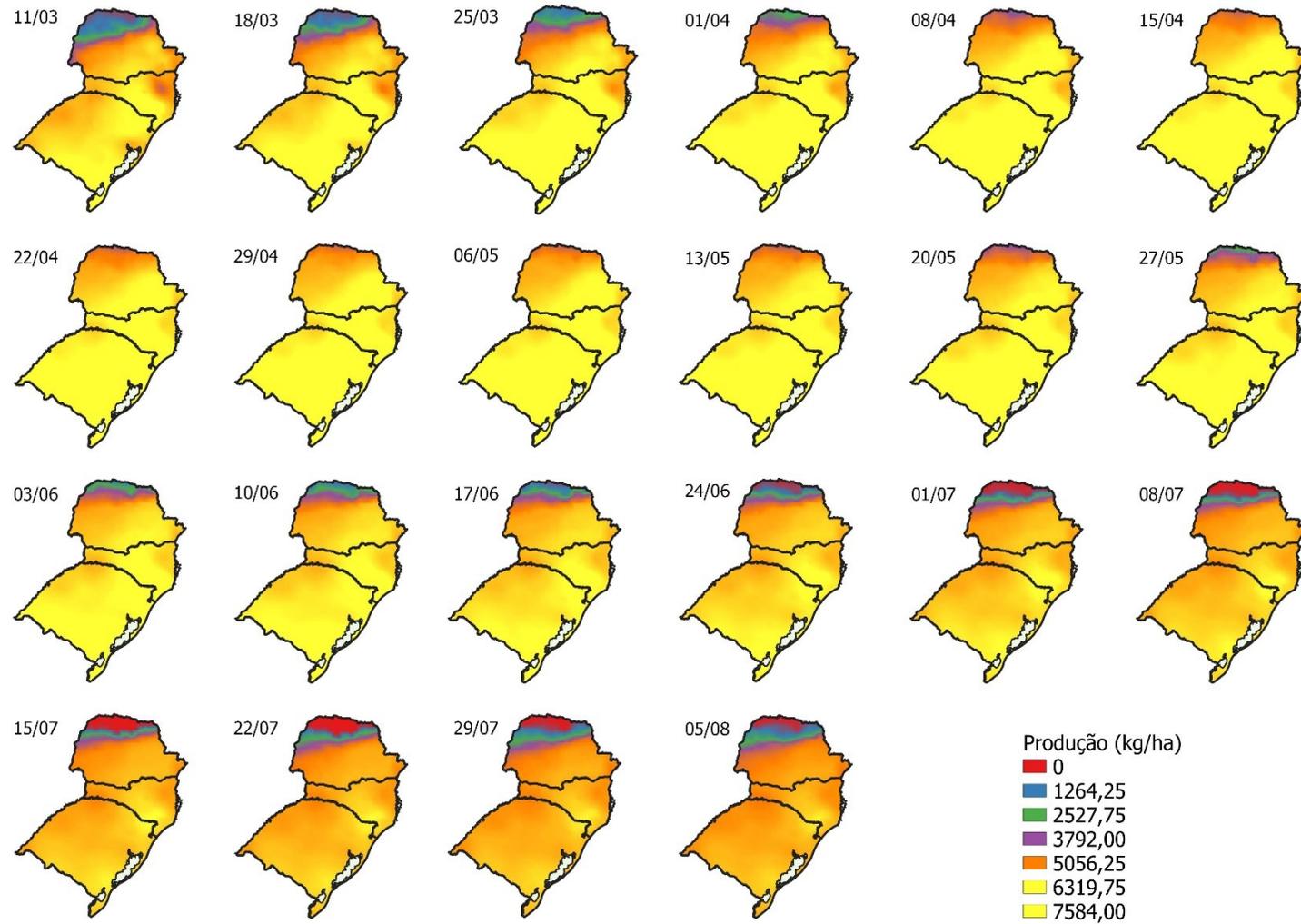
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 71. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 4.5 2070.



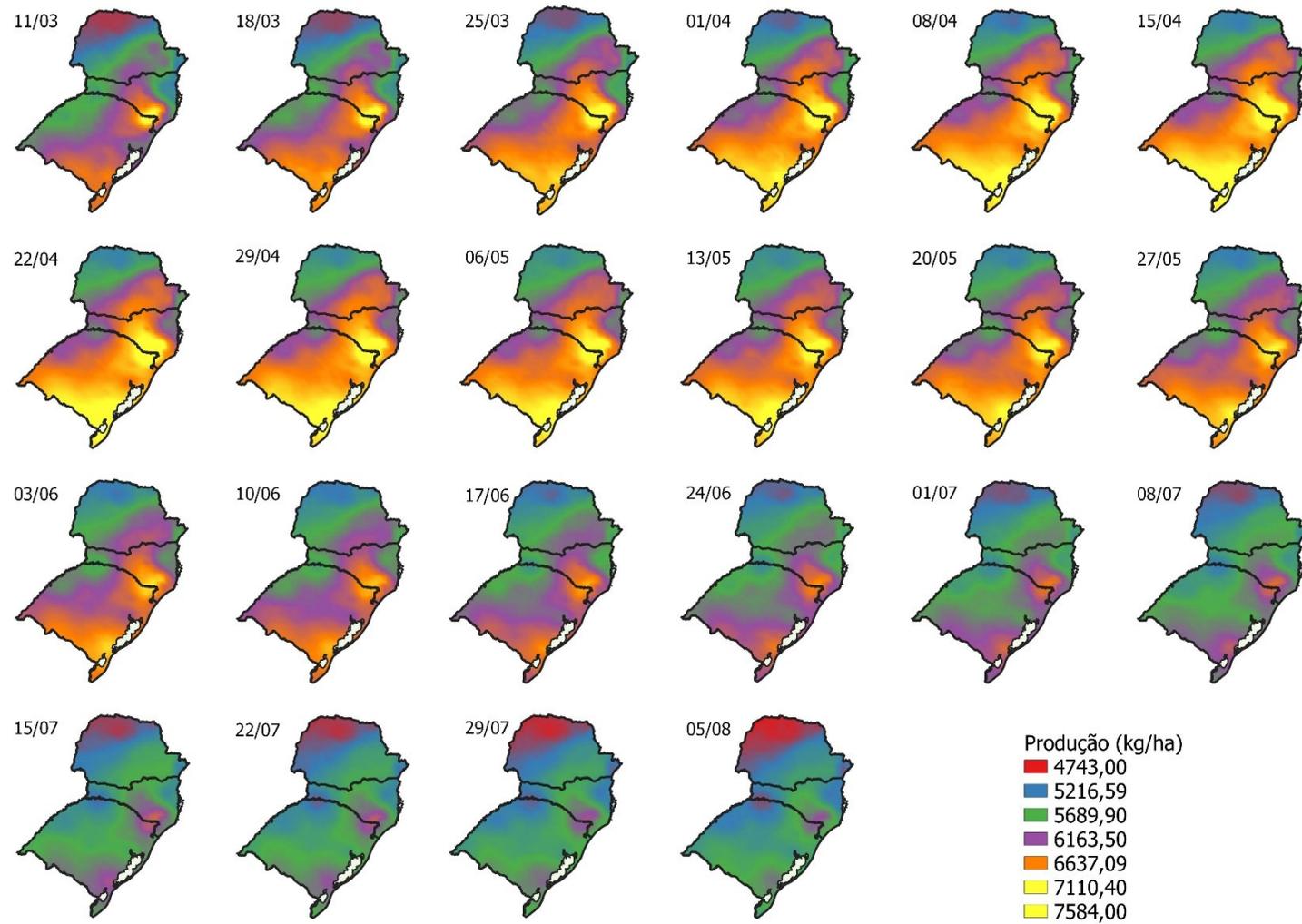
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 72. Produtividade da cultura (kg.ha<sup>-1</sup>) em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.



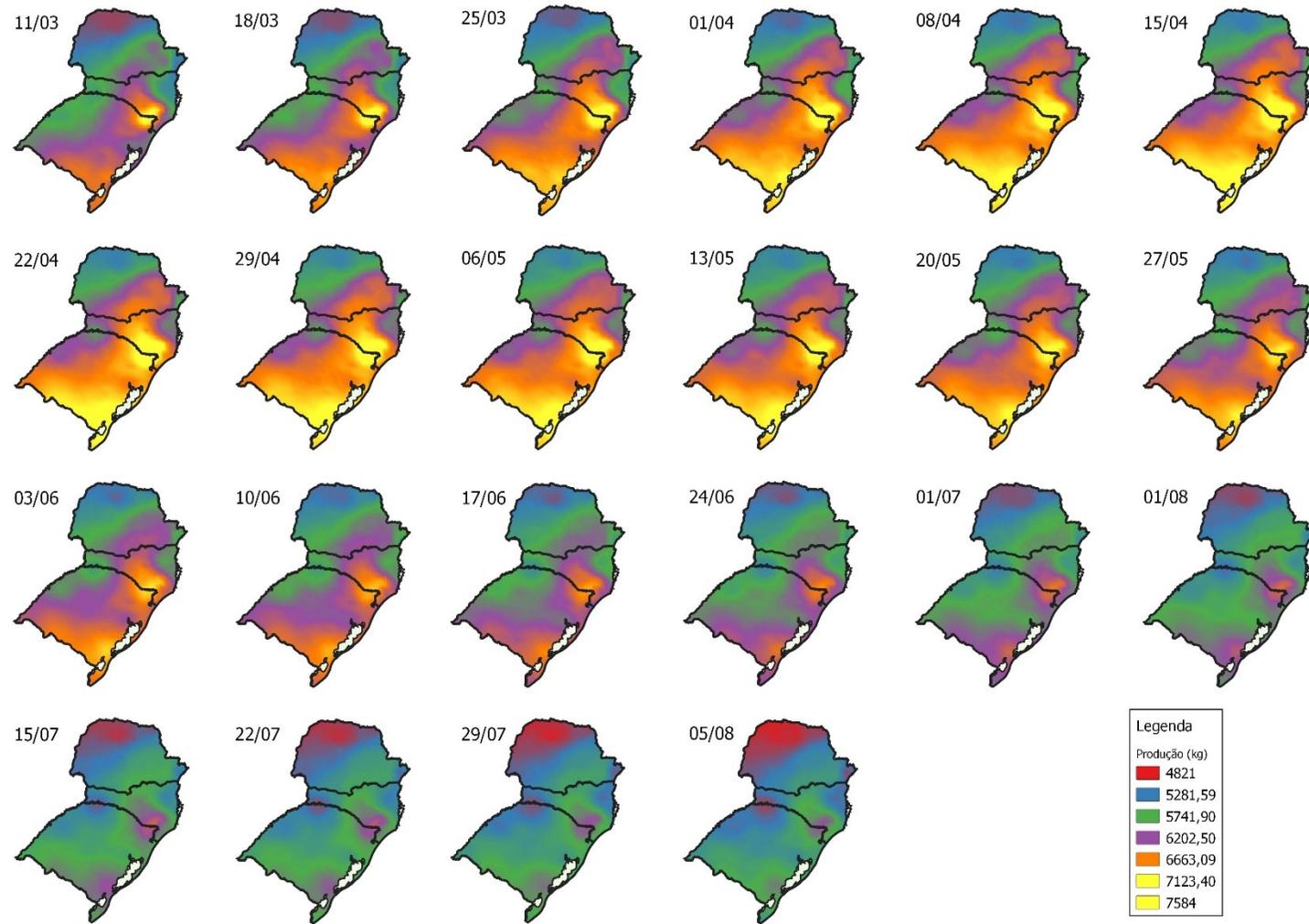
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 73. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.



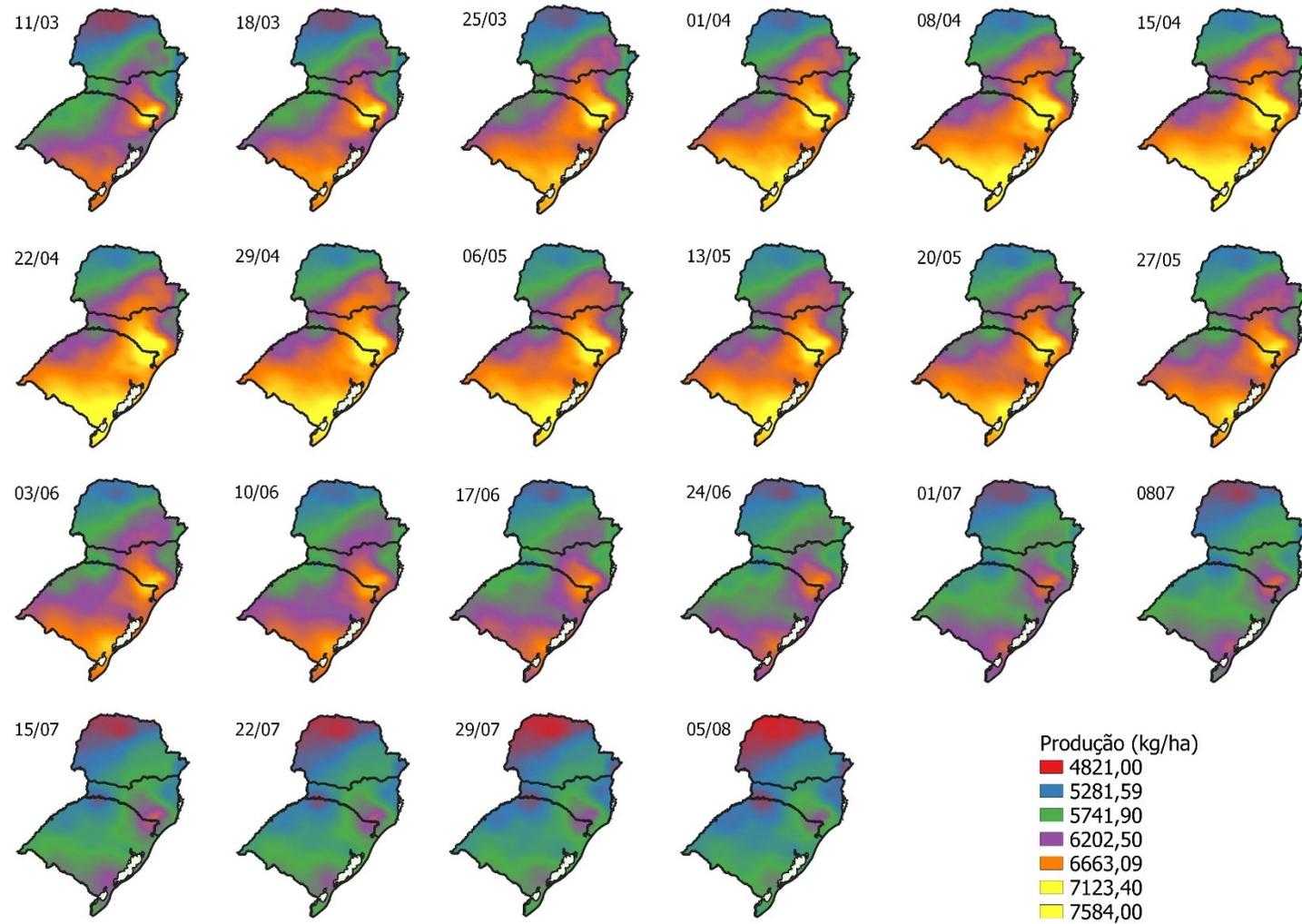
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 74. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.



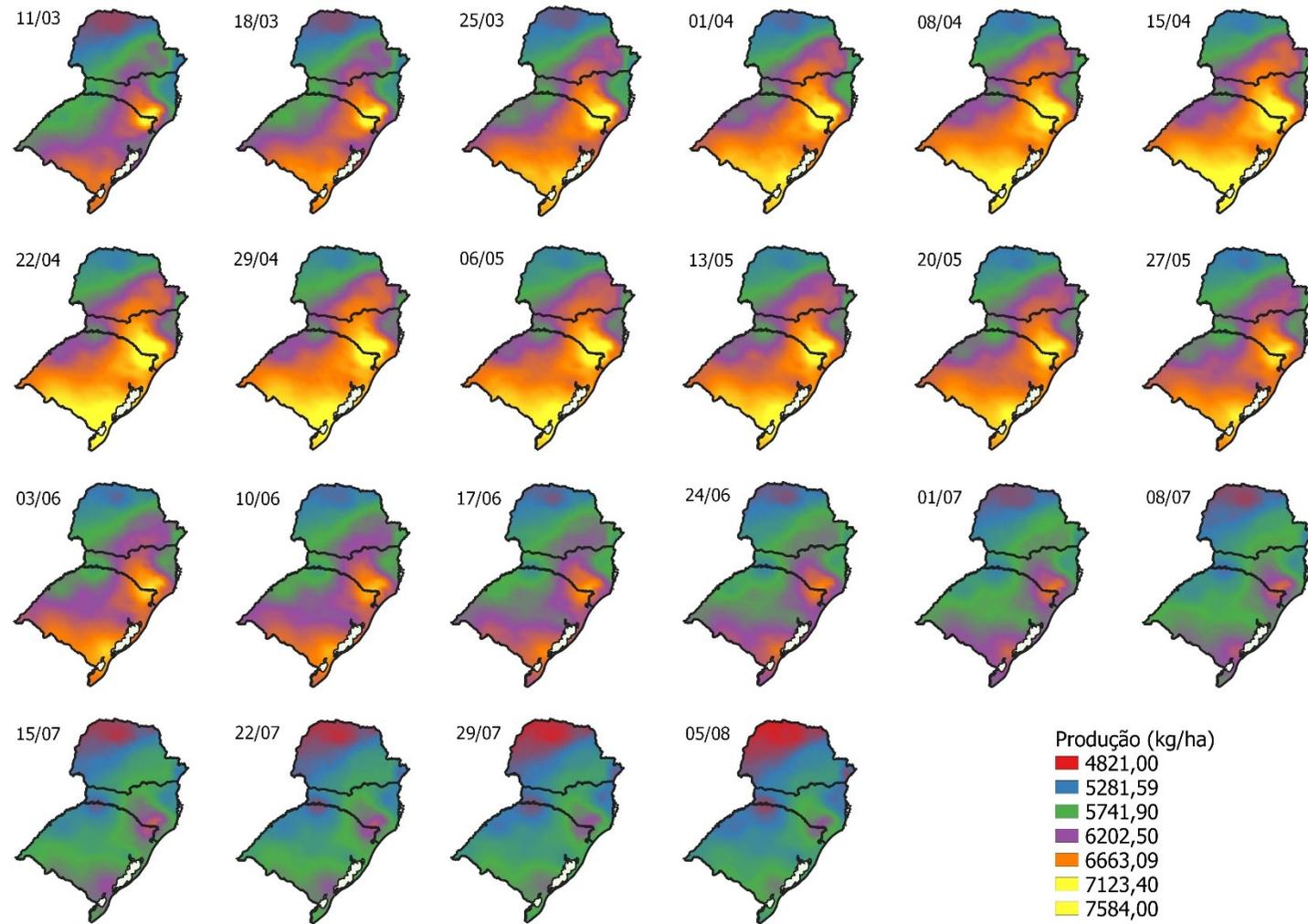
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 75. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.



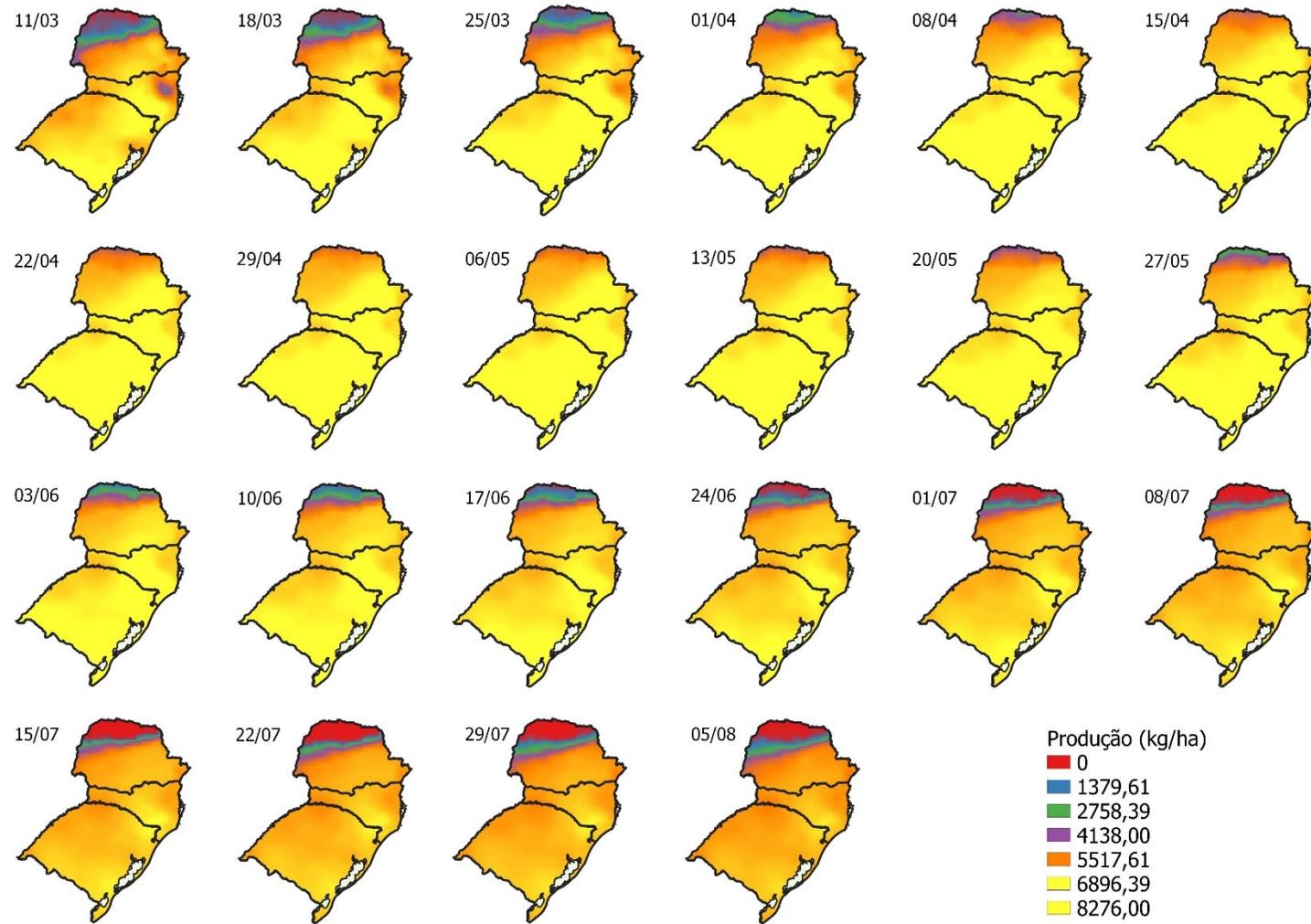
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 76. Produtividade da cultura (kg.ha<sup>-1</sup>) com irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2050.



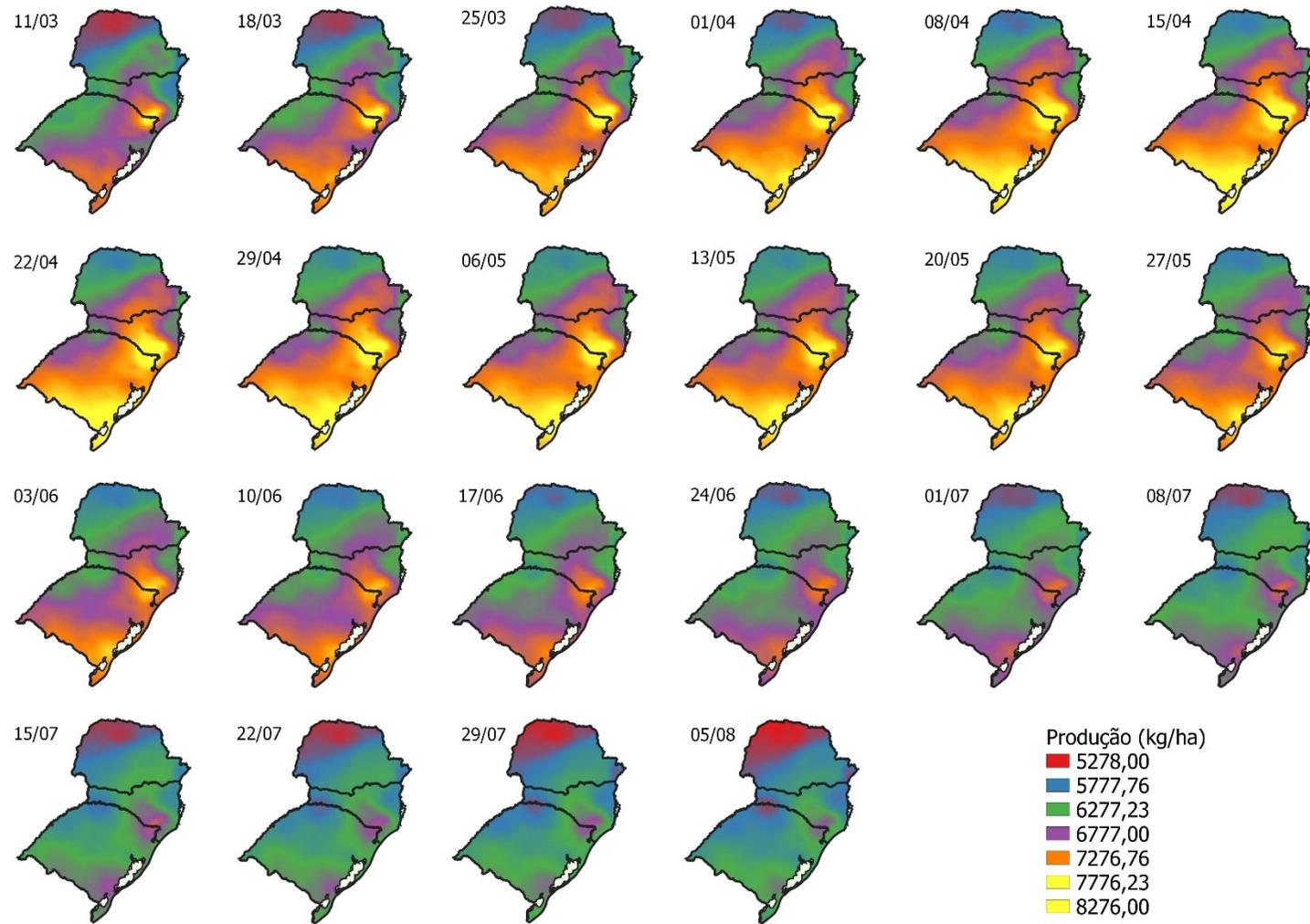
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 77. Produtividade da cultura (kg.ha<sup>-1</sup>) em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.



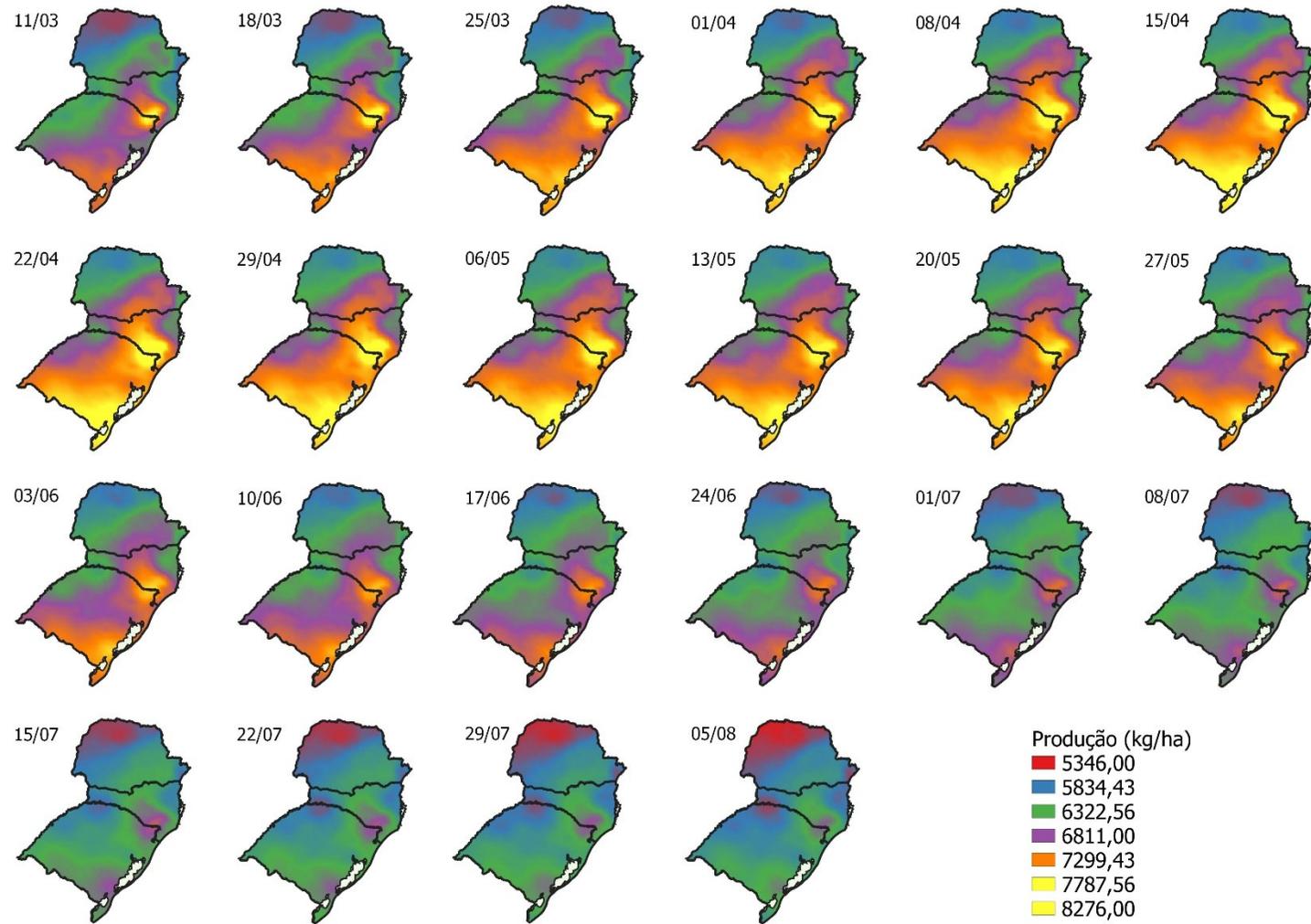
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 78. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 50% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.



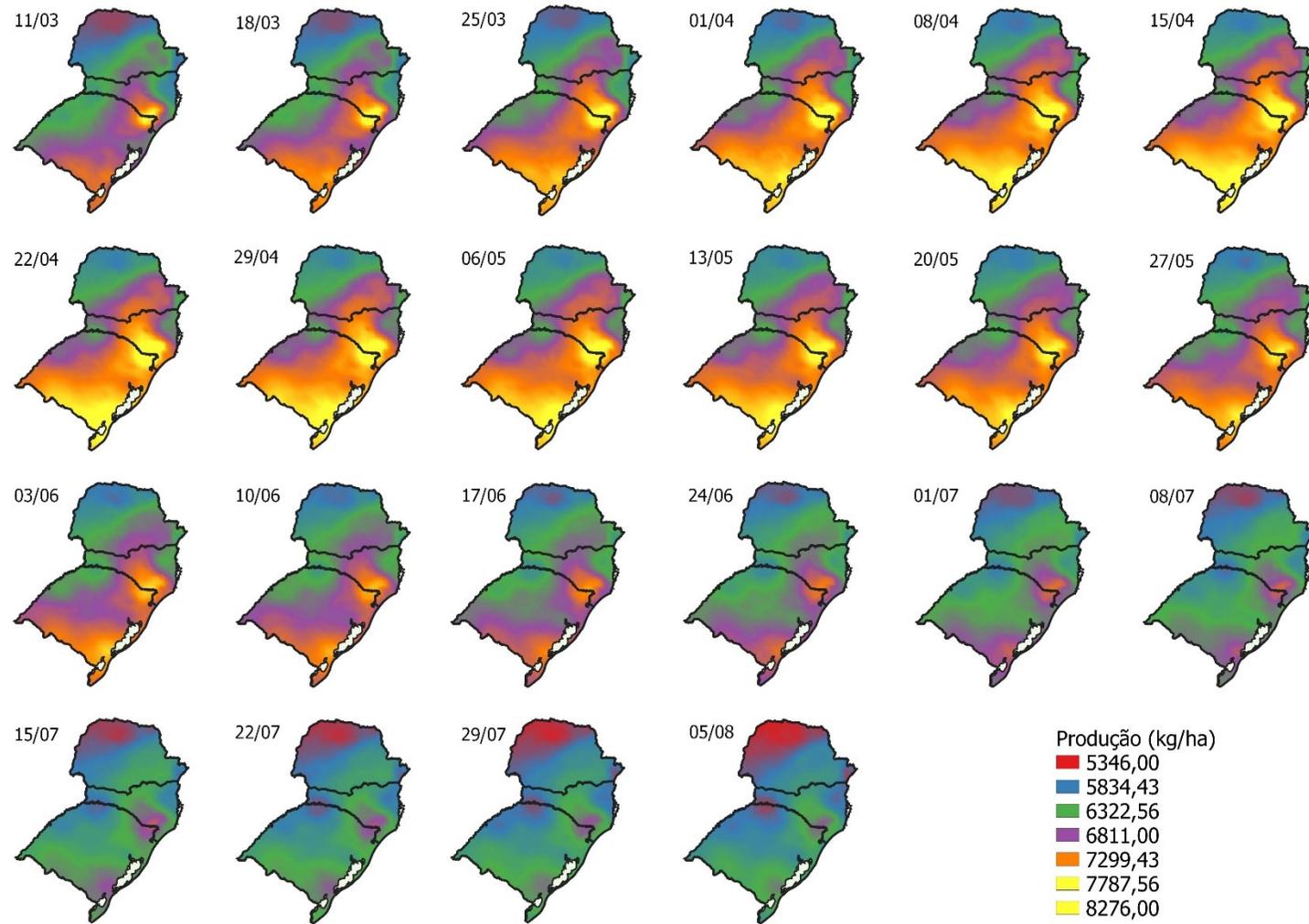
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 79. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 75% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.



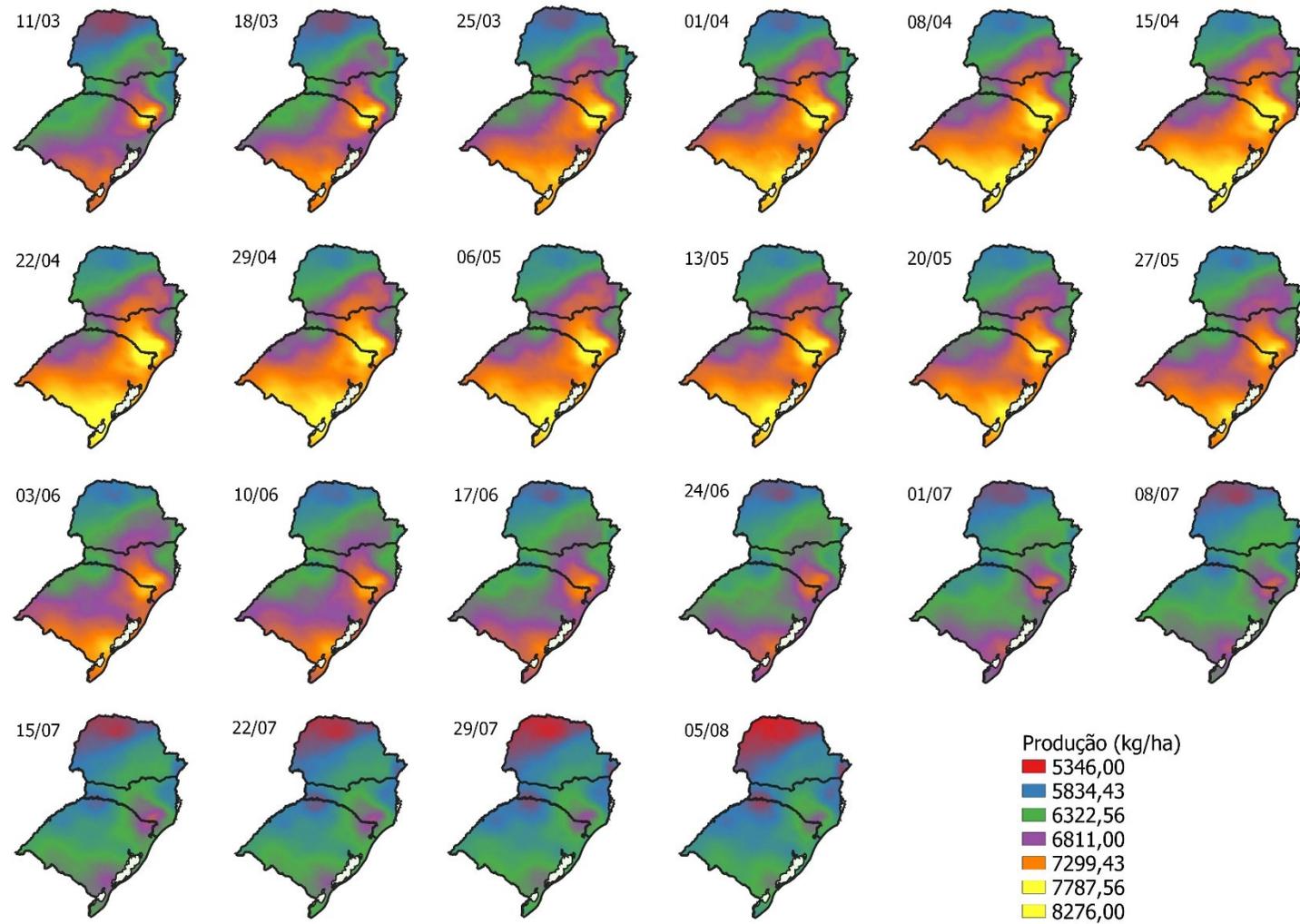
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 80. Produtividade da cultura (kg.ha<sup>-1</sup>) com irrigação de 95% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 81. Produtividade da cultura ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) com irrigação de 100% em diferentes datas de semeadura no cenário no cenário RCP 8.5 2070.

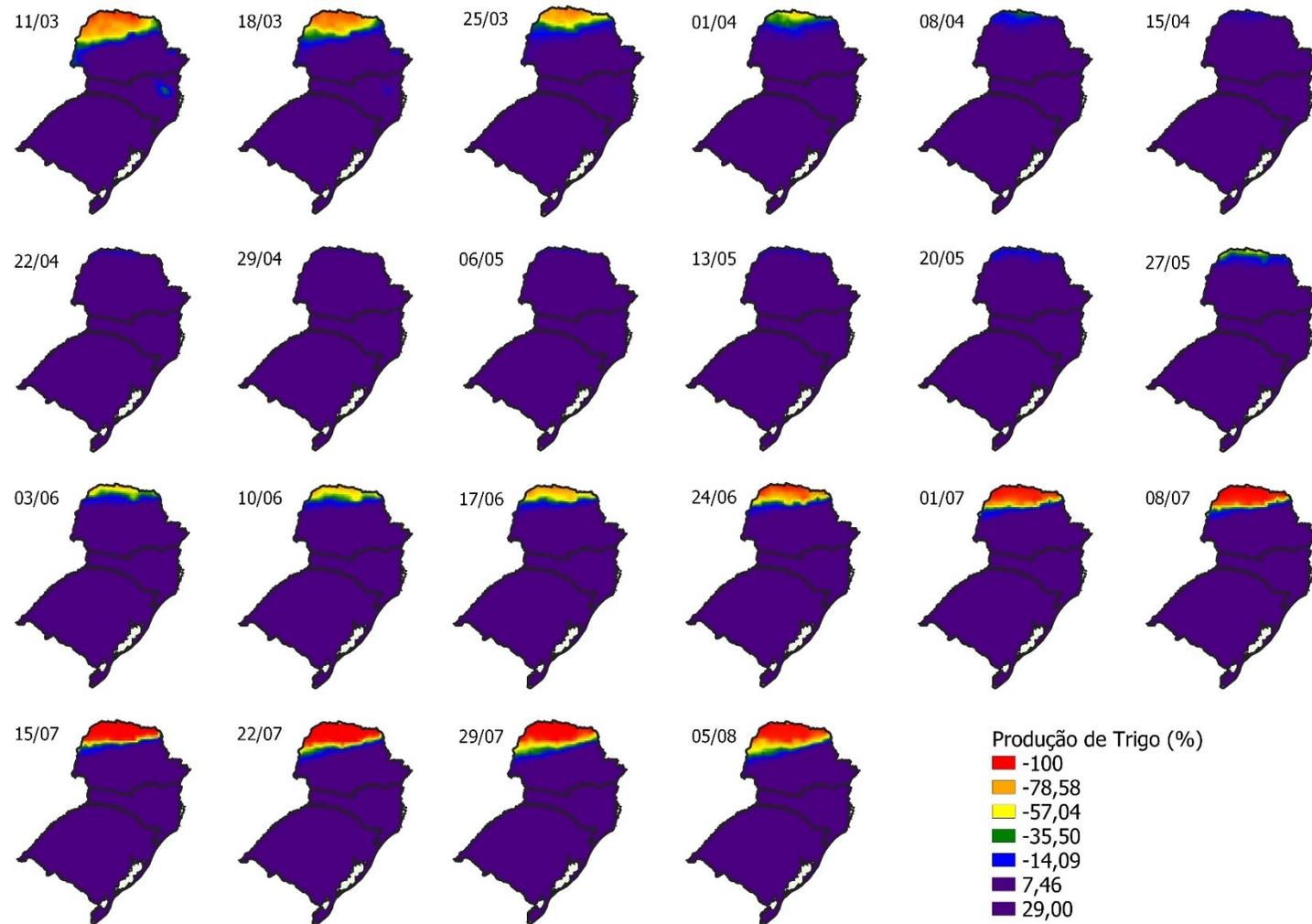


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A produtividade relativa foi obtida pela diferença do cenário futuro com o atual. No cenário RCP 8.5 2070 (Figura 82) a produtividade da cultura teve um aumento de 7,5 a 29 % nas diferentes datas de semeaduras para o estado do Rio Grande do Sul. Santa Catarina mostra a mesma predisposição, todavia, com limitação das datas de semeaduras de 11/03 e 18/03, tem a limitação em um ponto do estado com variação de -14,08 a 7,45 %. No norte do Paraná a cultura sequeira fica mais suscetível as mudanças climáticas de precipitação, restringindo as datas de semeaduras entre 29/04, 06/05 e 13/05. A semeadura após a data 01/07 para o norte do estado pode ser totalmente prejudicial ao produtor, uma vez que pode ocorrer quebra na safra, em locais que para o cenário atual e totalmente viável a produção sequeira. Para o resto do estado o cenário de mudanças climáticas mostra promissor para esta cultura.

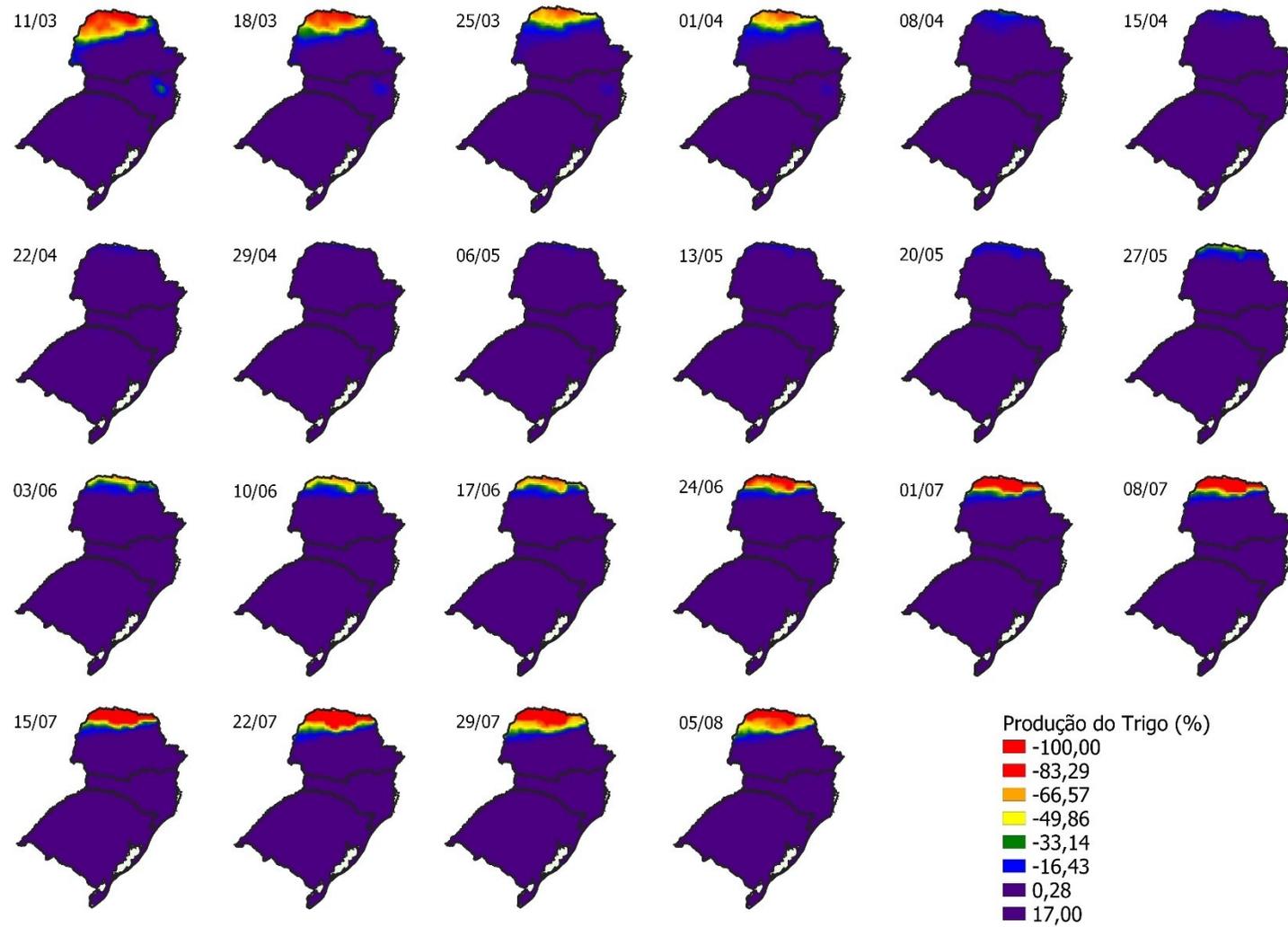
No RCP 8.5 2070 verifica-se um aumento de 29% em produção (Figura 82), enquanto, para o cenário RCP 4.5 2070 o aumento máximo foi de 17% (Figura 83). A produção com irrigação para o cenário RCP 4.5 2070 ainda se tem uma quebra de safra de 1,04%, mas para o cenário mais pessimista se tem um aumento de produção mínima de 8,93%, em locais que sem a irrigação se teria uma quebra de safra de 100%. Sendo assim, a irrigação pode ser uma estratégia adaptativa em regiões que a precipitação não supre a demanda de água requerida pela cultura, sendo assim, aplicando uma irrigação suplementar viabilizaria a produção da cultura nestes locais.

Figura 82. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 83. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 4.5 2070 e atual.



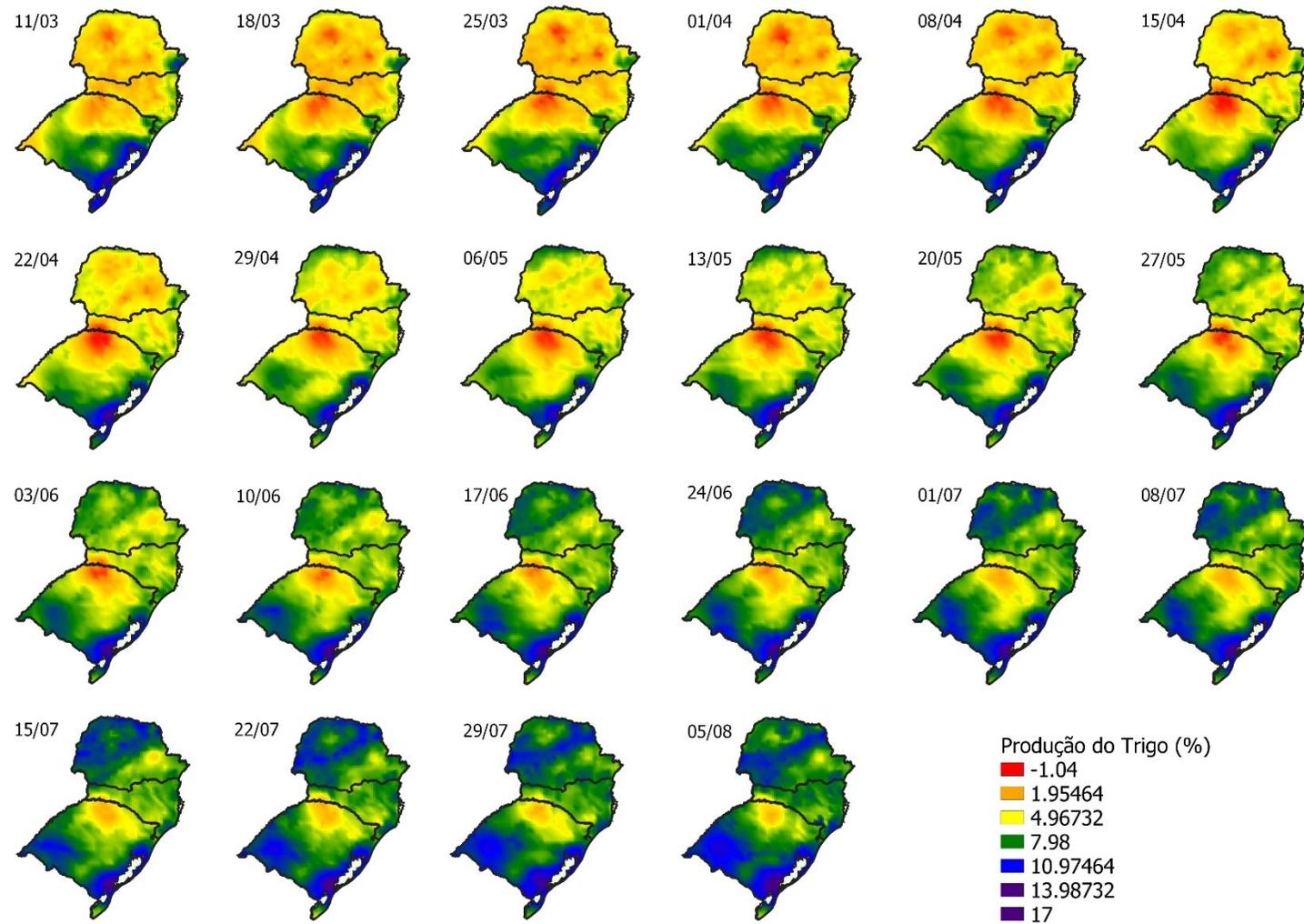
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A data de semeadura para o trigo irrigado pode variar muito comparado ao trigo sequeiro em um cenário de mudanças climáticas. Uma vez que o enchimento de grão está relacionado a temperatura elevadas, que não ocorre o fechamento estomático durante o dia devido a presença de água no solo em uma condição de irrigação, mesmo que por déficit hídrico. Sendo assim, aumentam as datas propícias a semeadura do trigo irrigado.

A lâmina de 50% (Figura 84), influenciou de forma positiva nas diferentes datas de semeaduras, em destaque ao norte do Paraná em que a cultura sequeira é inviável com irrigação teve uma variação de manter perda de produção menor que 1% até conseguindo um aumento de produção de 1,94% na produção.

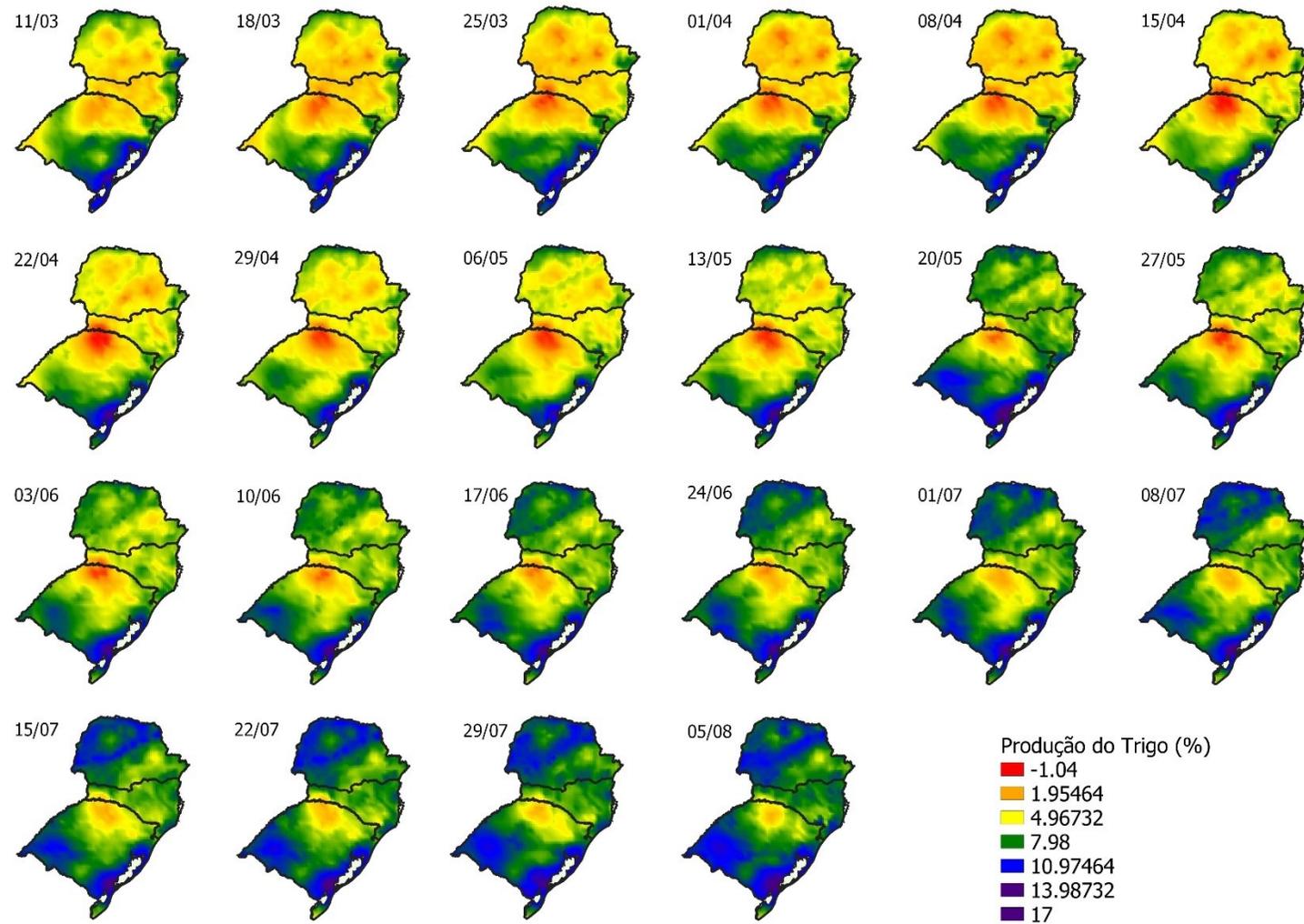
Com a maior disponibilidade de água em um cenário de irrigação com 75% (Figura 85), no Paraná diminuíram-se os locais com a produtividades relativa, sendo substituído pela variação de 4,96 a 7,98%, que são representados pela coloração amarela a verde. Os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul as lâminas entre 50 e 75% não diferem nos mapas apresentados, que pode ser atribuído a altas taxas de precipitações. O fato de o Paraná requerer uma lâmina maior pode estar associado ao clima das localidades ser mais seco e com temperaturas mais elevadas.

Figura 84. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 50%.



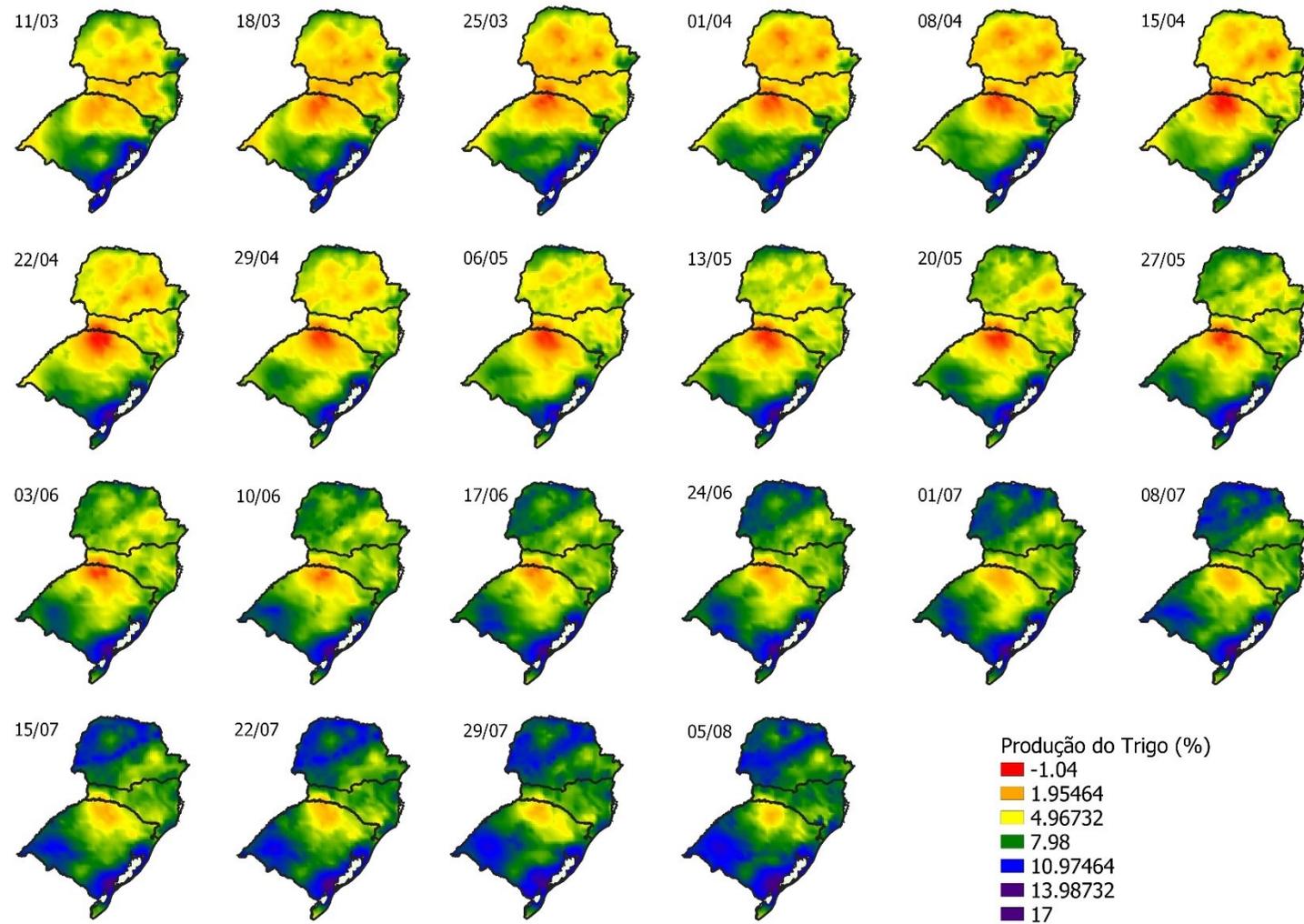
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 85. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 75%.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 86. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 100%.

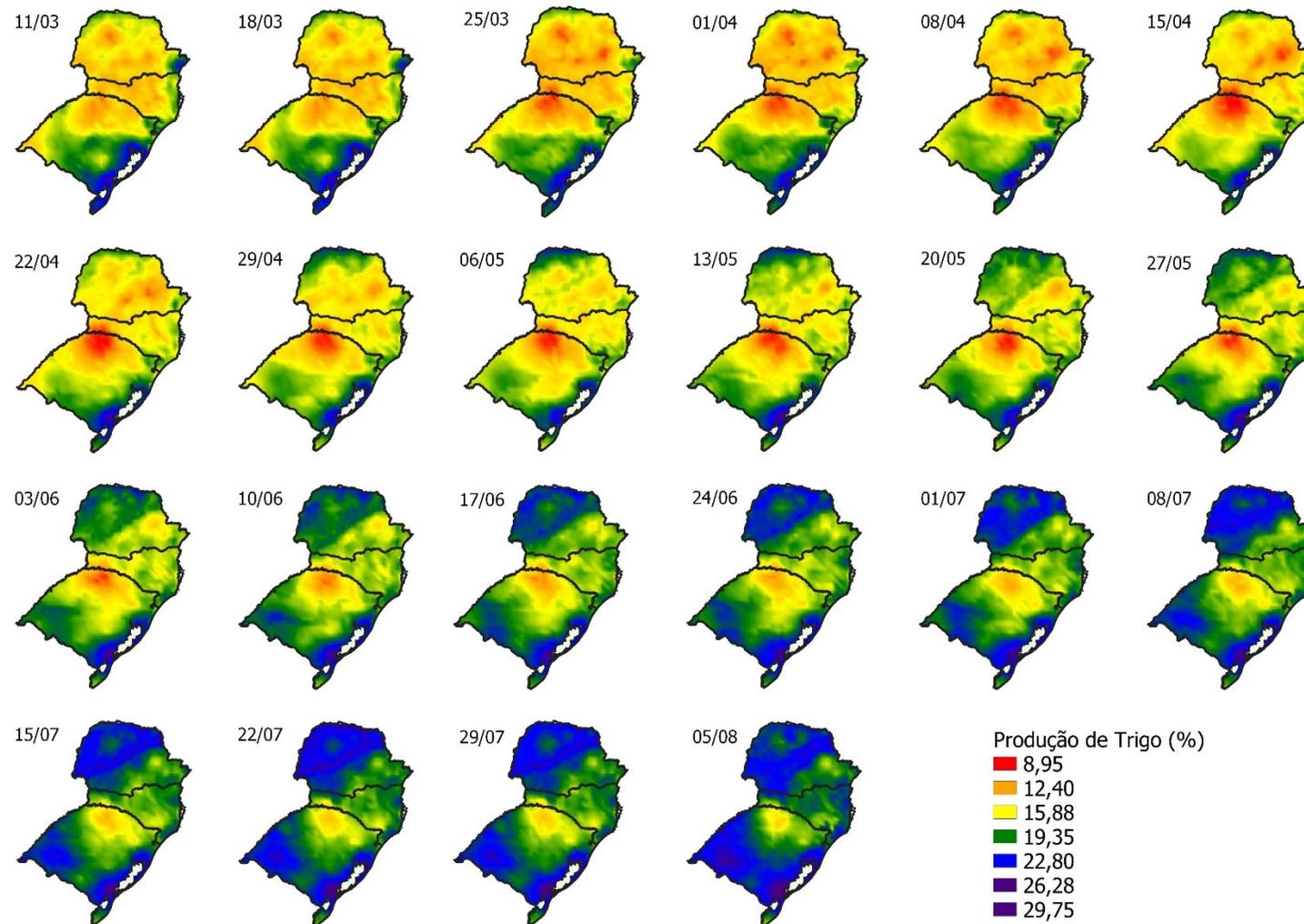


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

O cenário RCP 8.5 2070 (Figura 87, 88 e 89) foi o melhor cenário de produção ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) em diversas regiões do local de estudo proposto. Os dados observados da cultura irrigada têm uma maior produtividade, que corresponde ao aumento mínimo de 8,95%, em determinadas localidades do Rio Grande do Sul nas diferentes épocas de semeaduras chegando a variar de 22,8 a 29,8%.

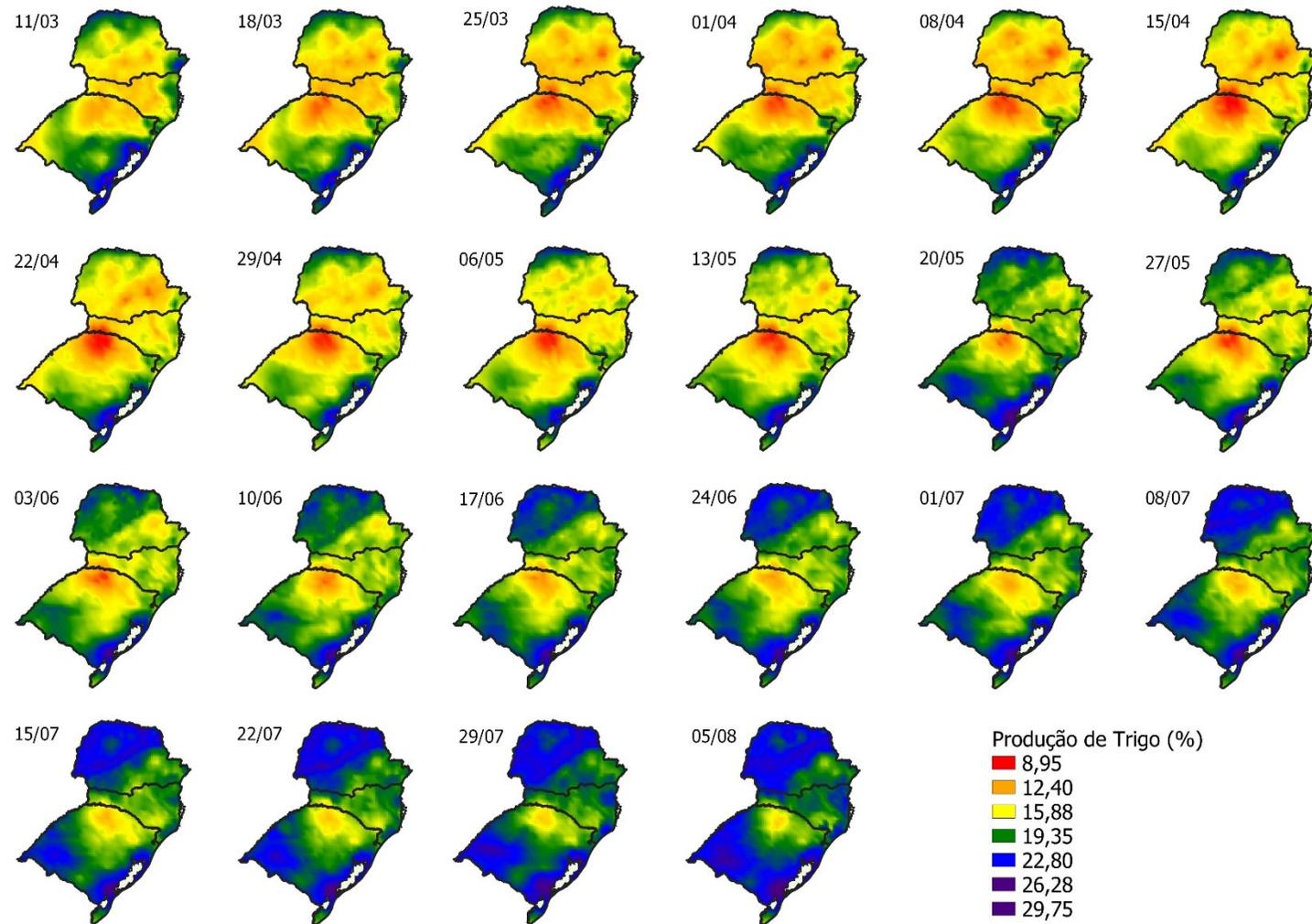
Foi observado um padrão de aumento de produtividades para o estado do Paraná e Rio Grande do Sul nas datas de semeaduras a partir do 08 de junho até 05 de agosto. Todavia, Santa Catarina não mostrou o mesmo padrão como os outros estados em um aumento superior de 22,8%, sendo observado no máximo 19,4% a mais que no cenário atual.

Figura 87. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 50%.



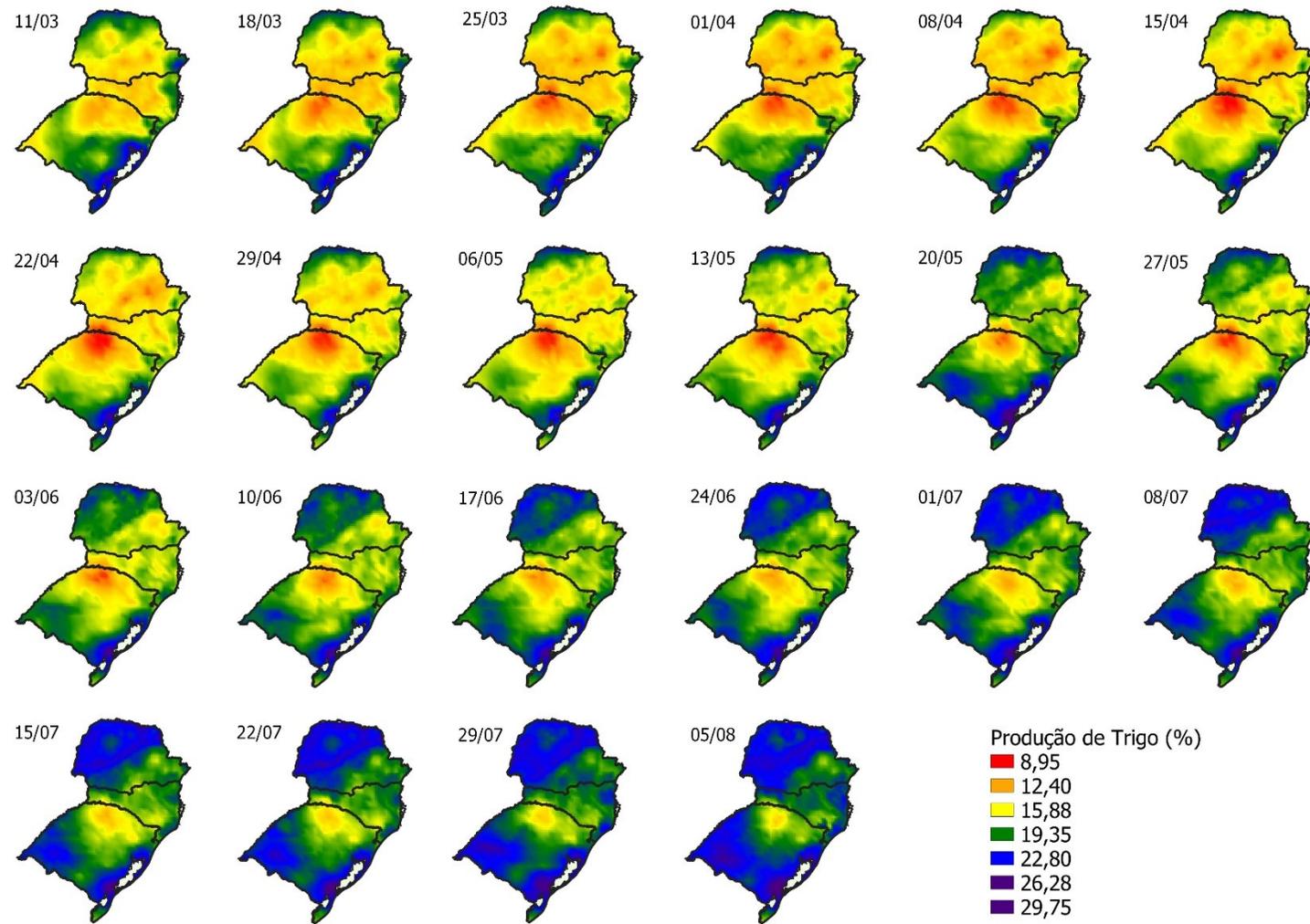
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 88. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 75%.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 89. Produtividade relativa da cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 100%.

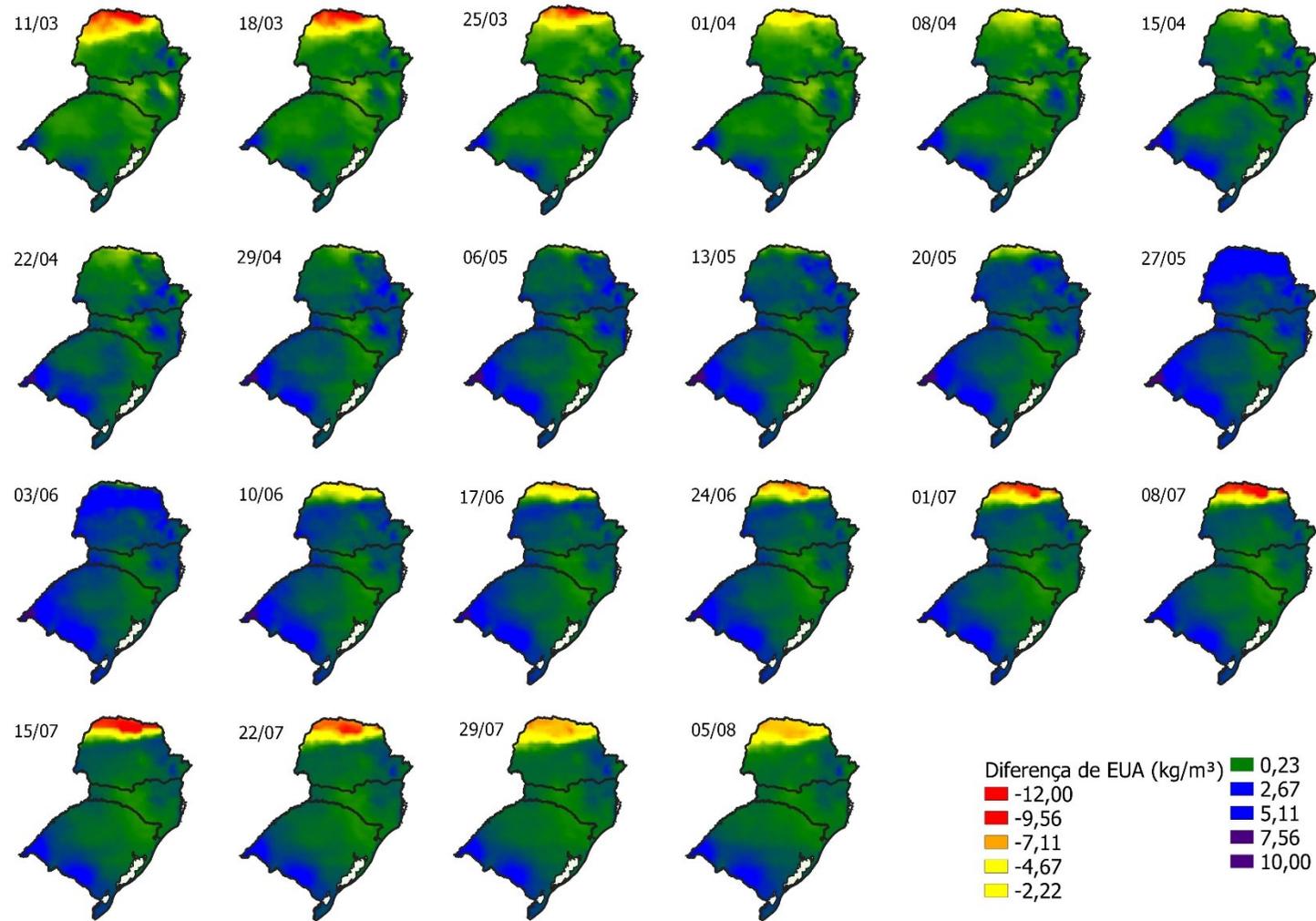


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Nos cenários simulados RCP 4.5 e 8.5 sem irrigação (Figura 90 e 95) apresentaram diferenças do cenário atual com valores negativos, ou seja, no cenário atual teve maior eficiência do uso da água do que o cenário modelado. Uma das causas pode ser o aumento da temperatura que ultrapassa a temperatura tolerável e causa um estresse na planta, que diminui a produtividade da cultura ou a falta de água em períodos críticos da cultura. Foi observado  $-12 \text{ kg.m}^{-3}$  conforme a data de semeadura (Figura 91 e 96). Todavia, as datas 27/05 e 03/06 para a área de estudo apresentou uma diferença positiva para eficiência do uso da água comparada ao cenário atual.

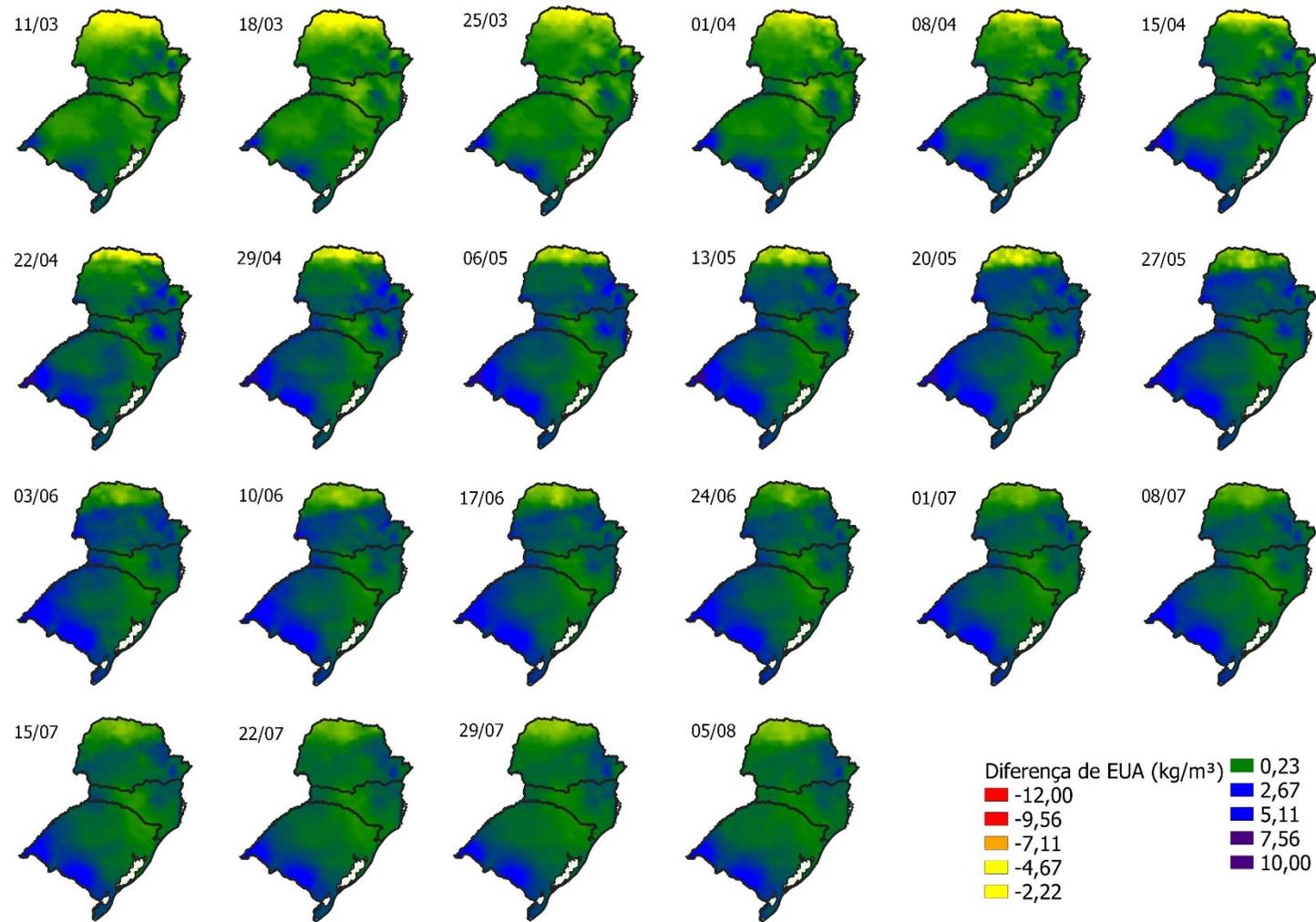
A cultura no estado no Rio grande do Sul diferente para as datas simuladas se observa uma diferença positiva para o cenário futuro projetado, as regiões da campanha e do Sul se beneficiam mais que as outras. Santa Catarina tem respostas diferentes conforme a data de semeadura, a escolha da data de semeadura para este estado será de suma importância para a melhor produtividade do uso da água, uma vez que a data errada pode gerar perdas de eficiência comparado ao cenário atual.

Figura 90. Eficiência do uso da água considerando a precipitação do cenário RCP 4.5 2050 e atual.



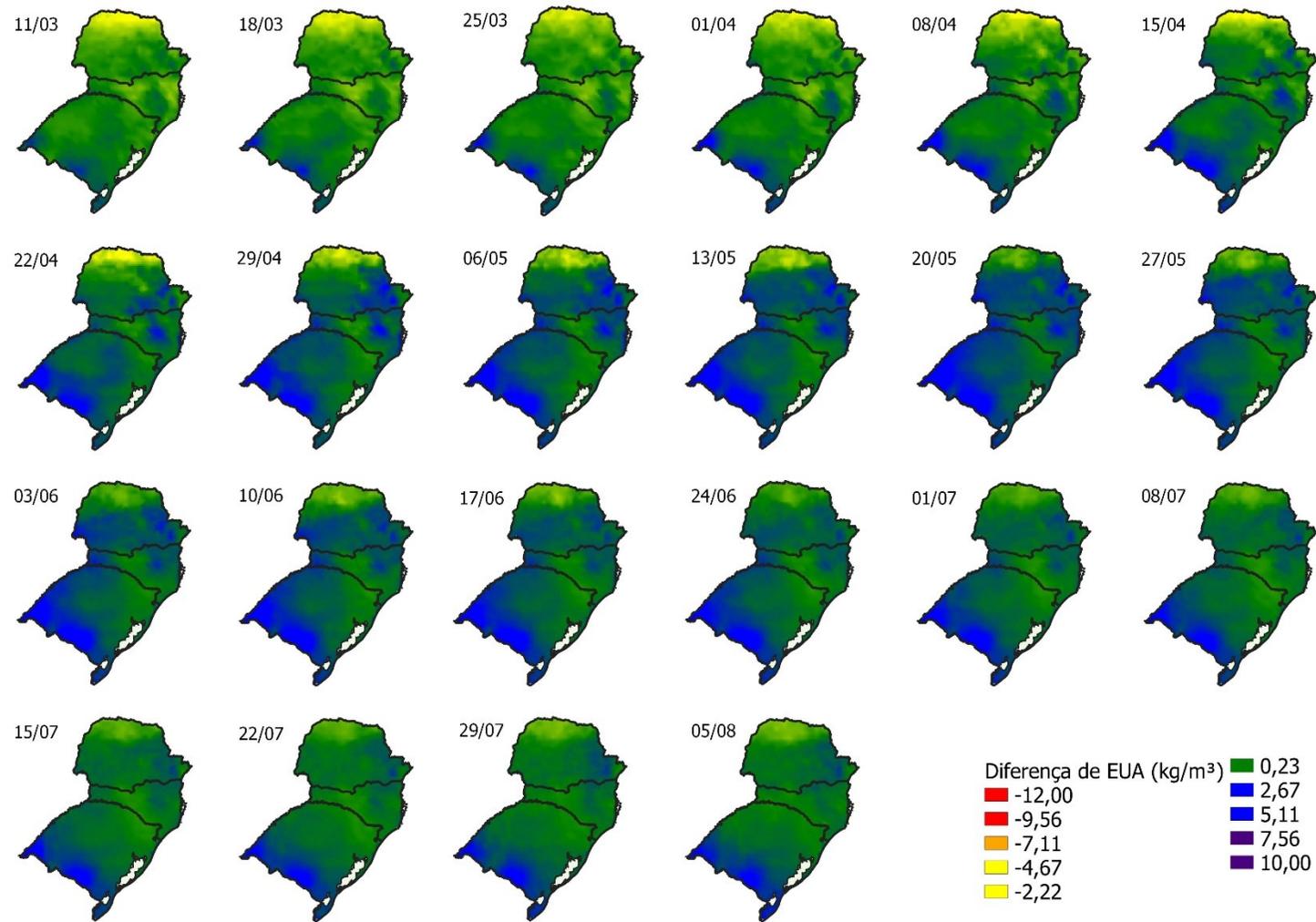
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 91. Diferença da Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2050 e atual com irrigação de 50%.



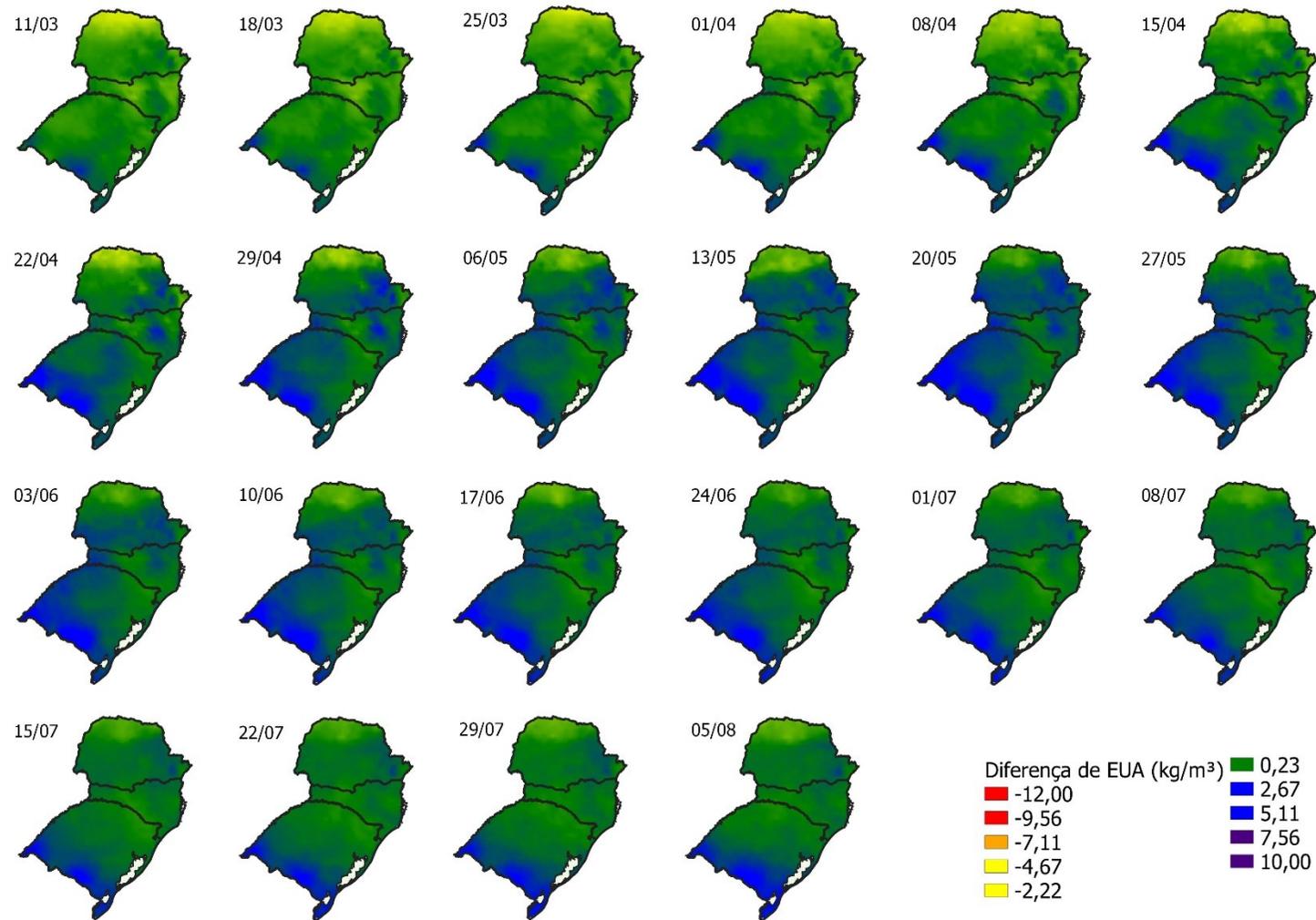
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 92. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2050 e atual com irrigação de 75%.



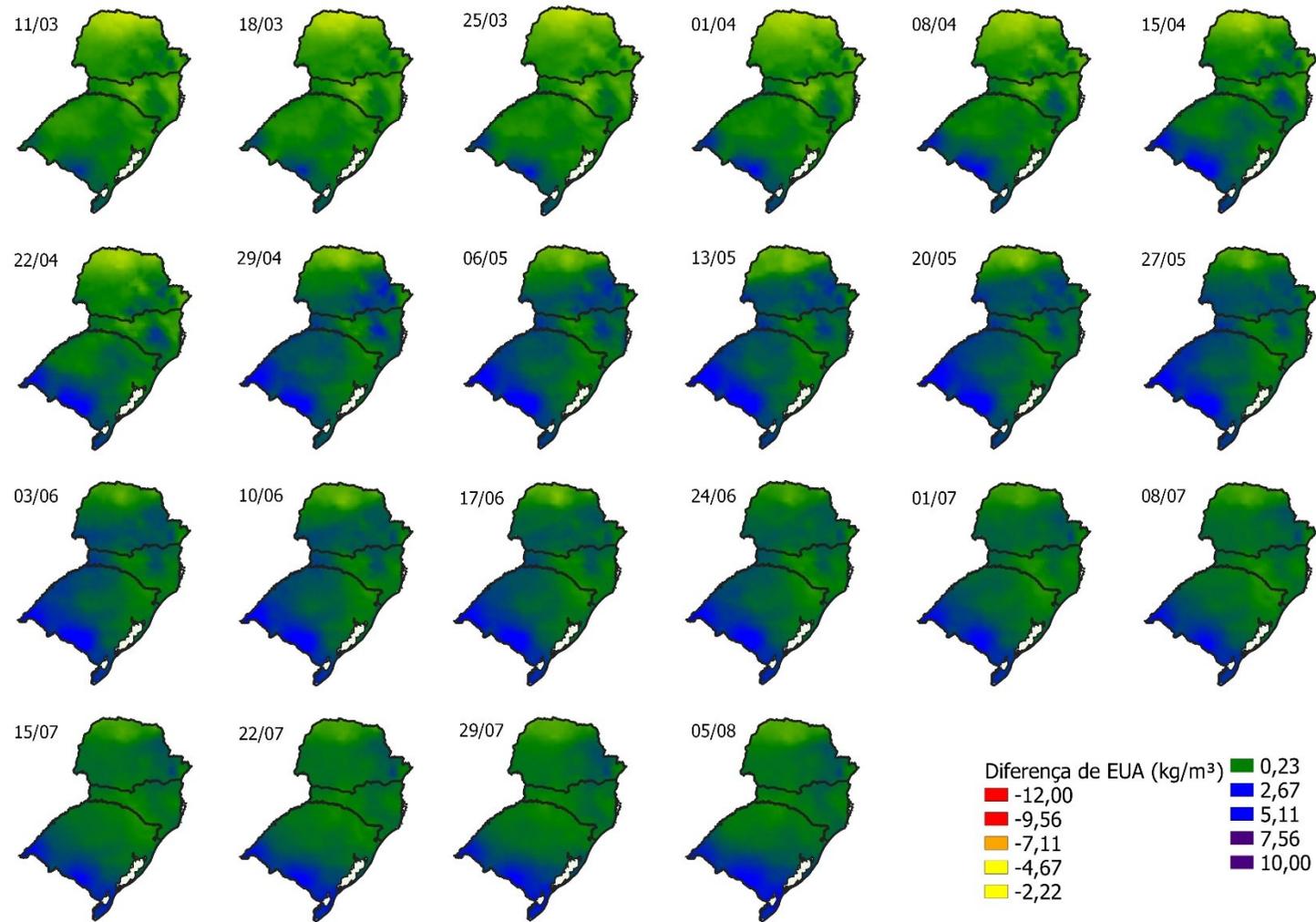
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 93. Diferença da Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2050 e atual com irrigação de 95%.



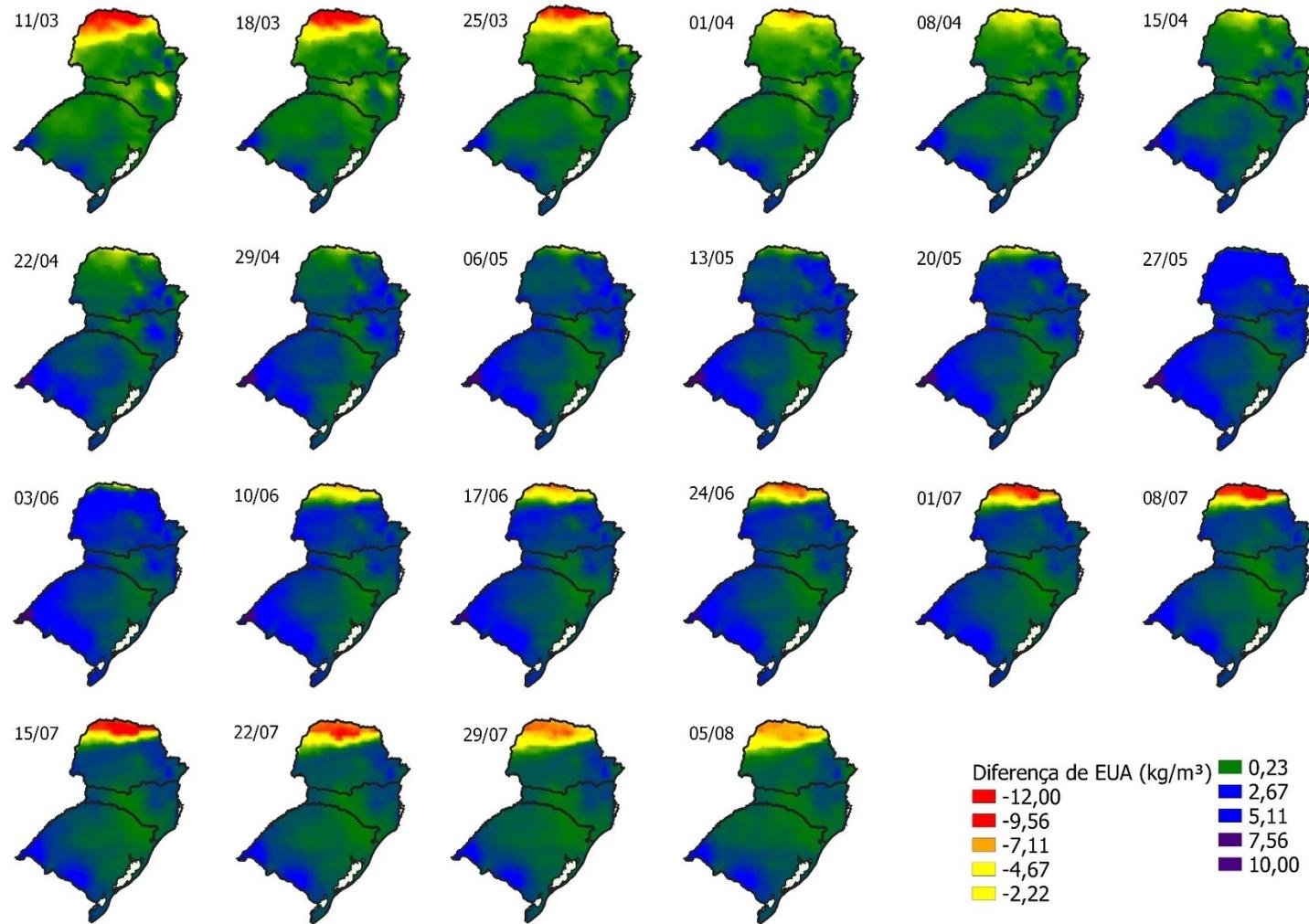
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 94. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2050 e atual com irrigação de 100%.



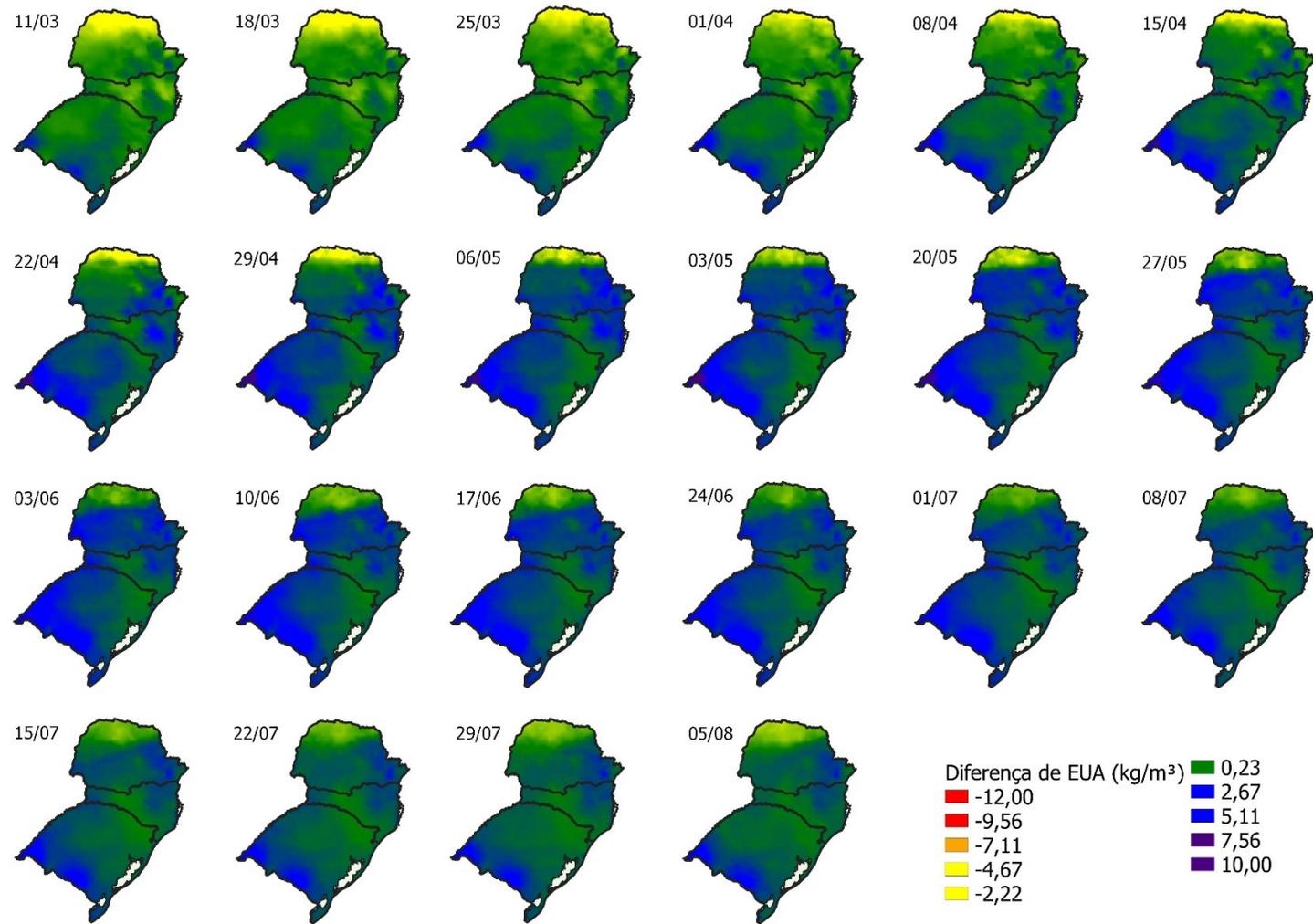
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 95. Eficiência do uso da água considerando a precipitação do cenário RCP 4.5 2070 e atual.



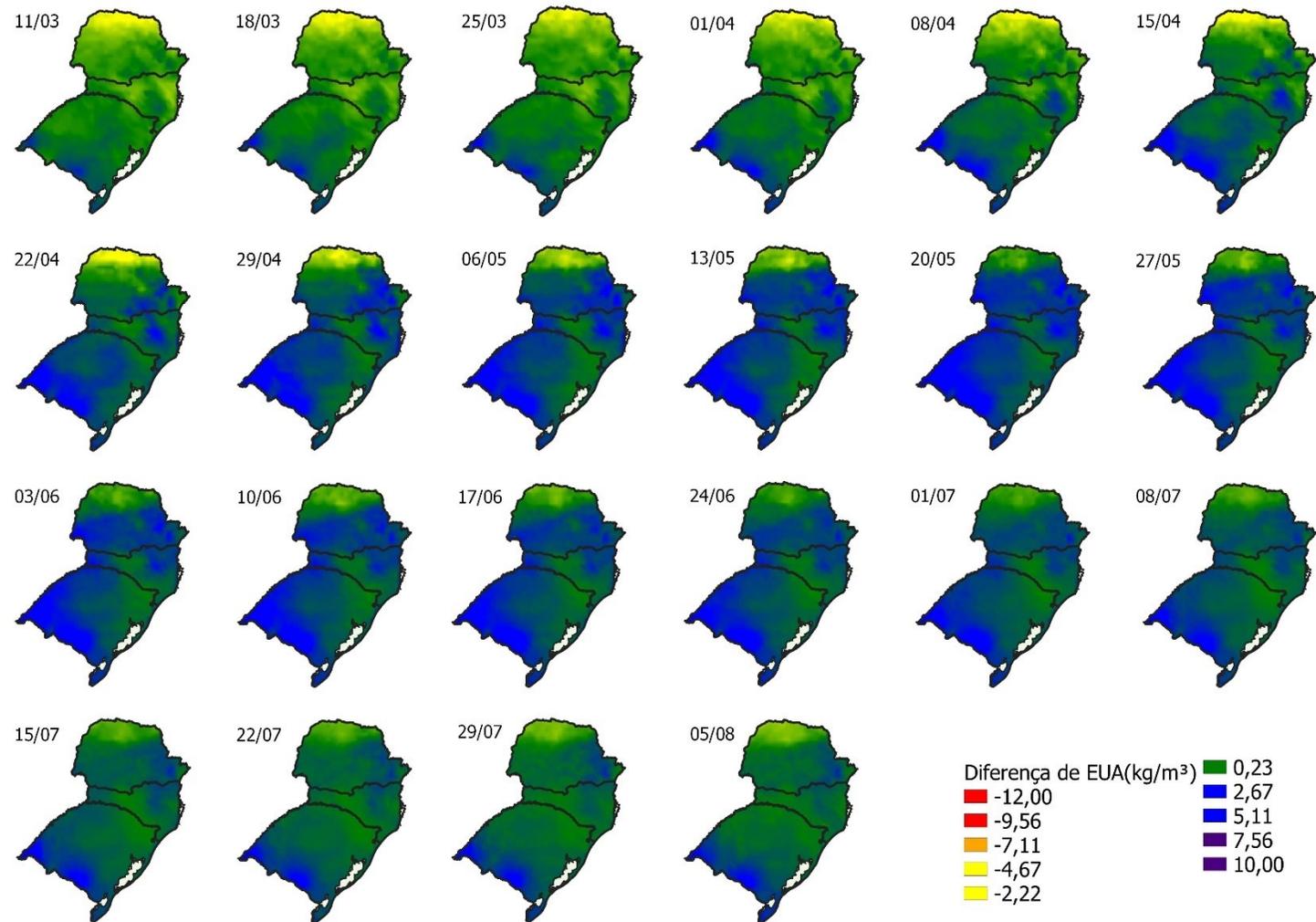
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 96. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 50%.



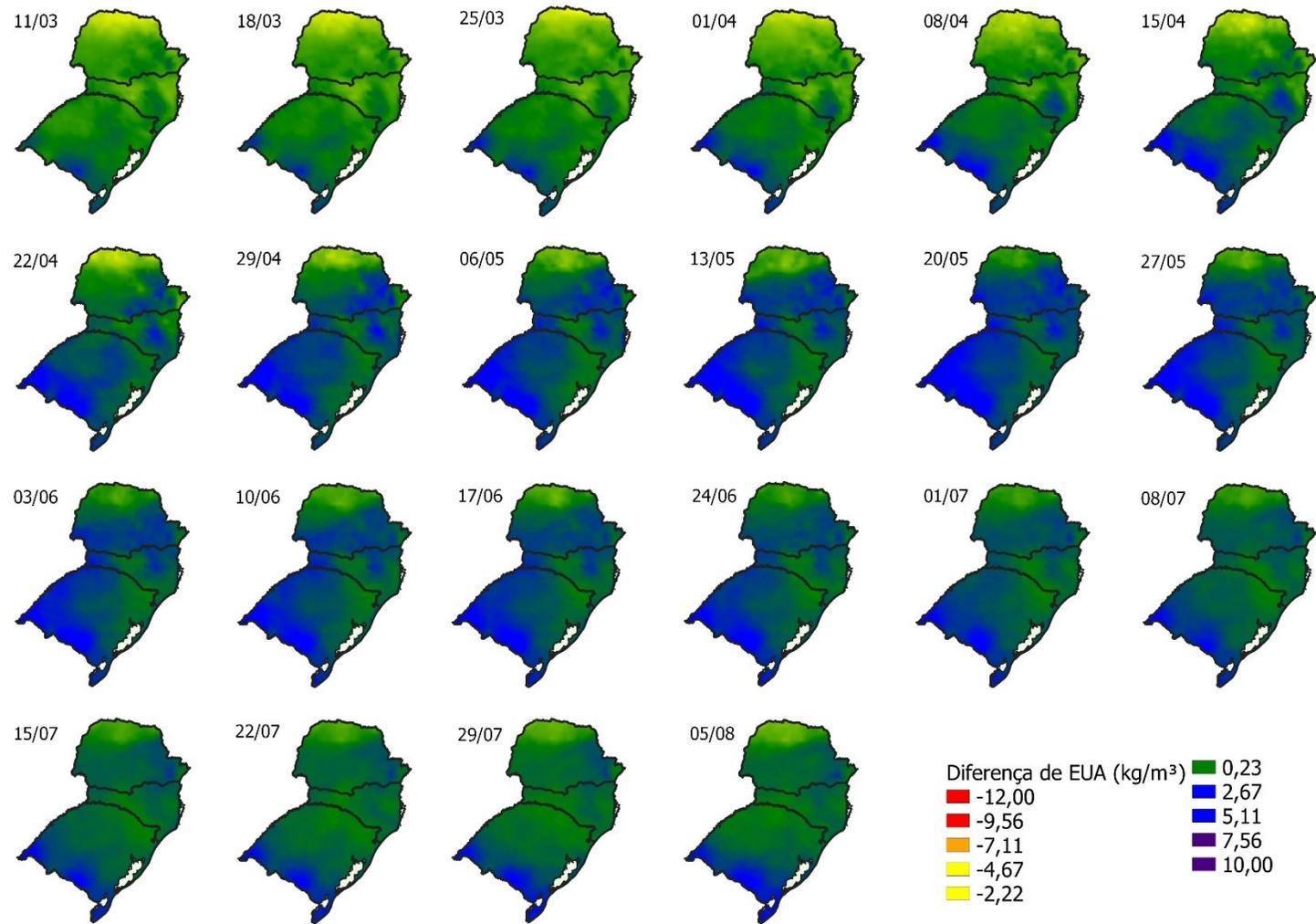
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 97. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 75%.



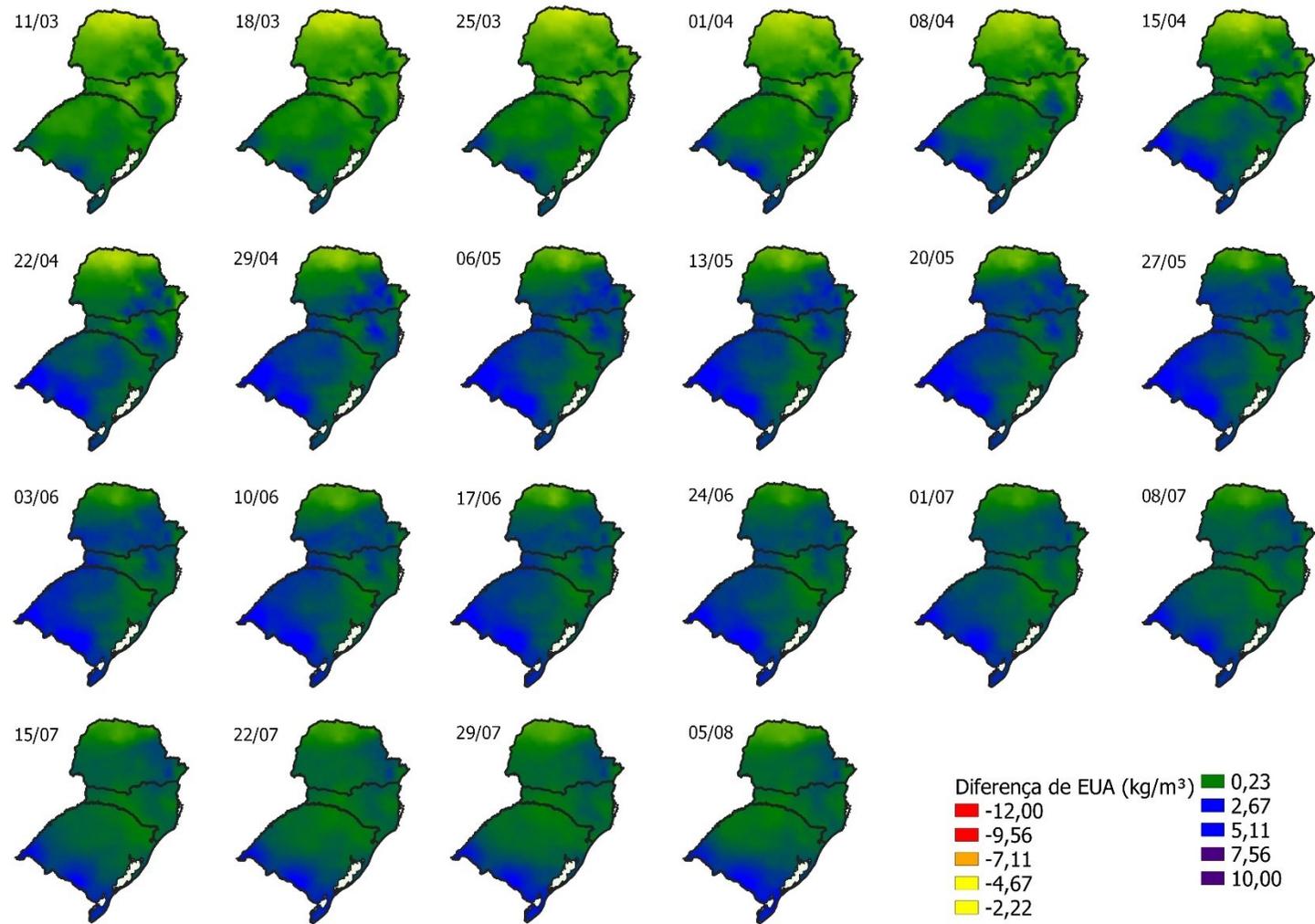
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 98. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 95%.



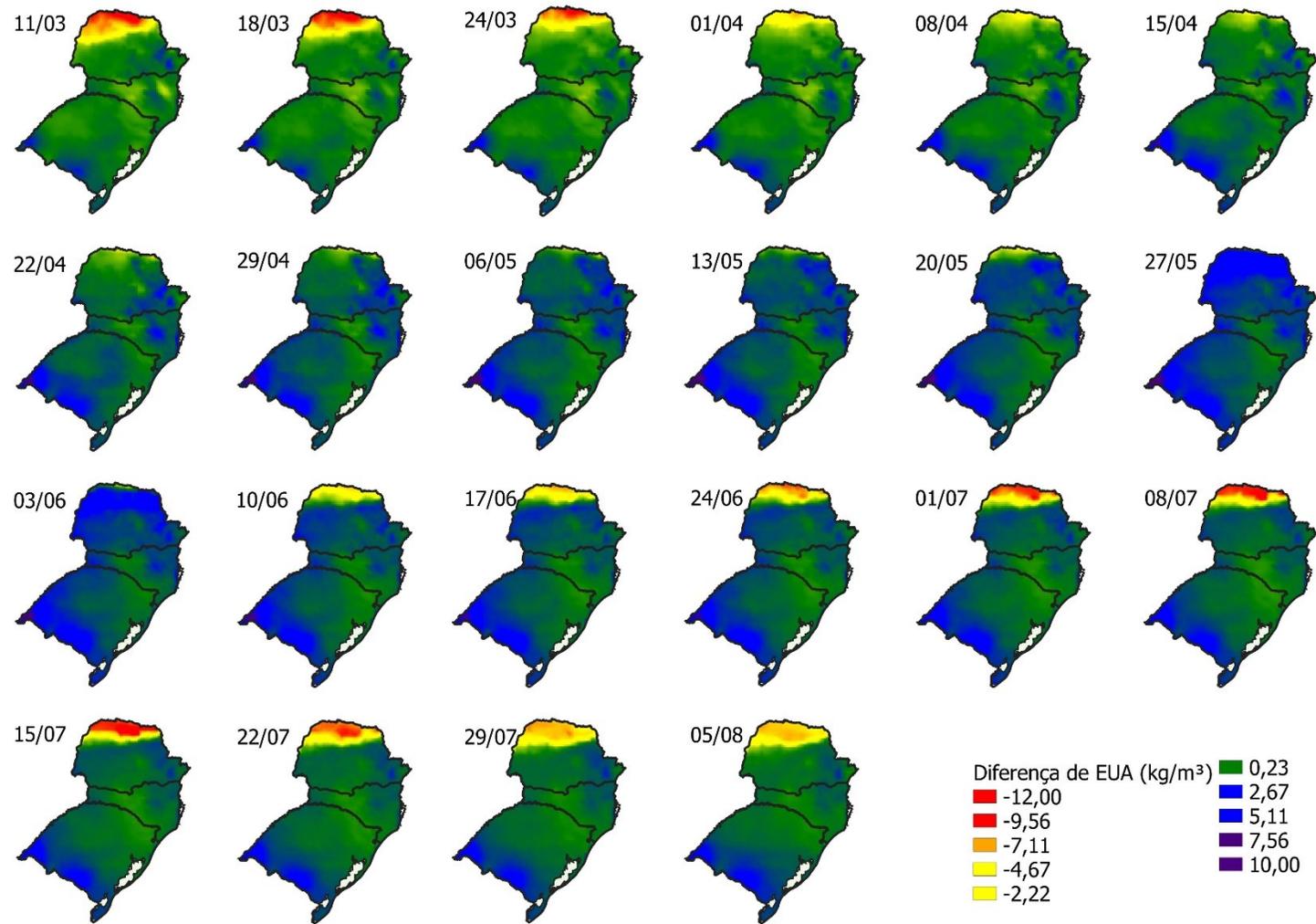
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 99. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 4.5 2070 e atual com irrigação de 100%.



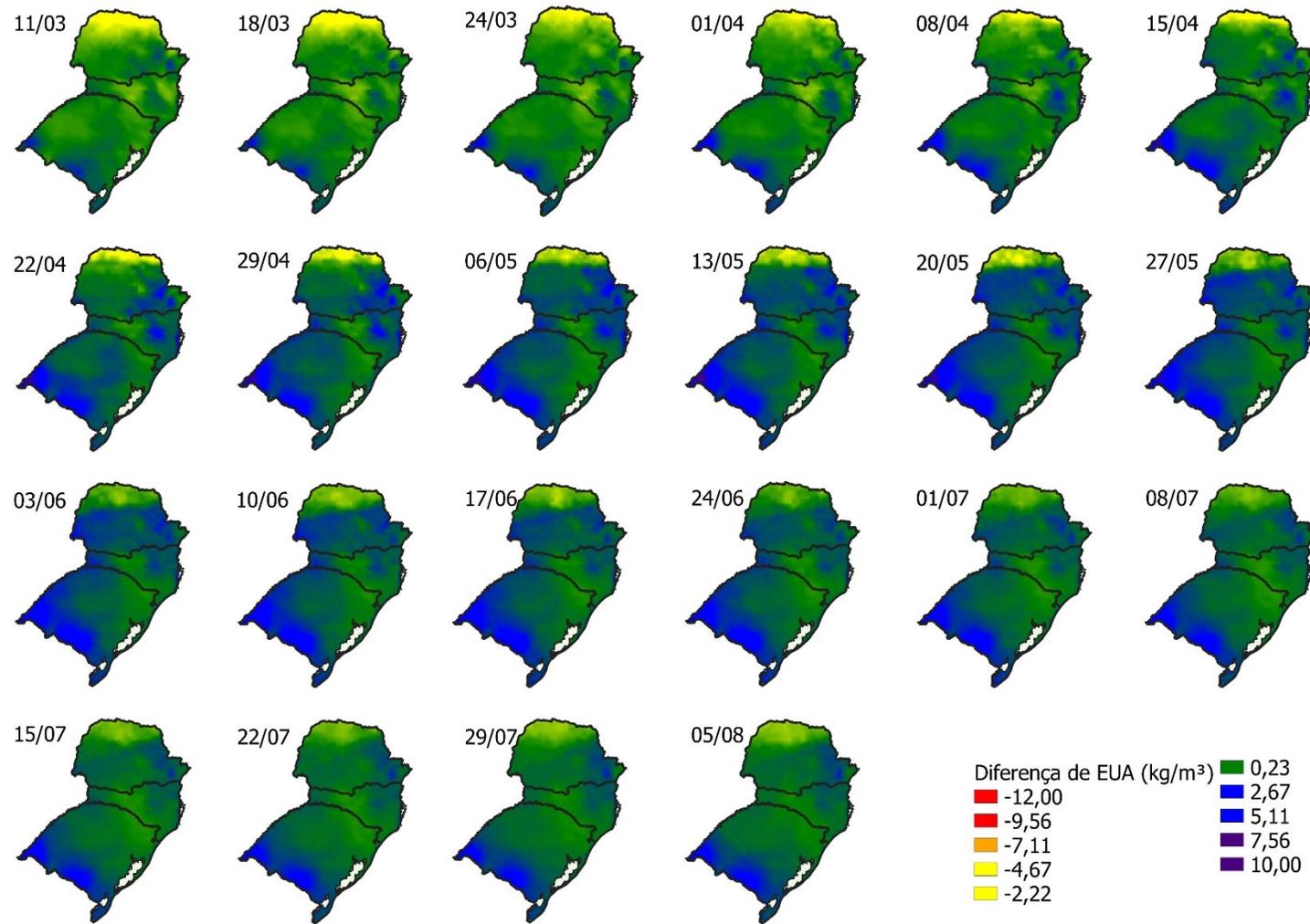
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 100. Eficiência do uso da água considerando a precipitação do cenário RCP 8.5 2050 e atual.



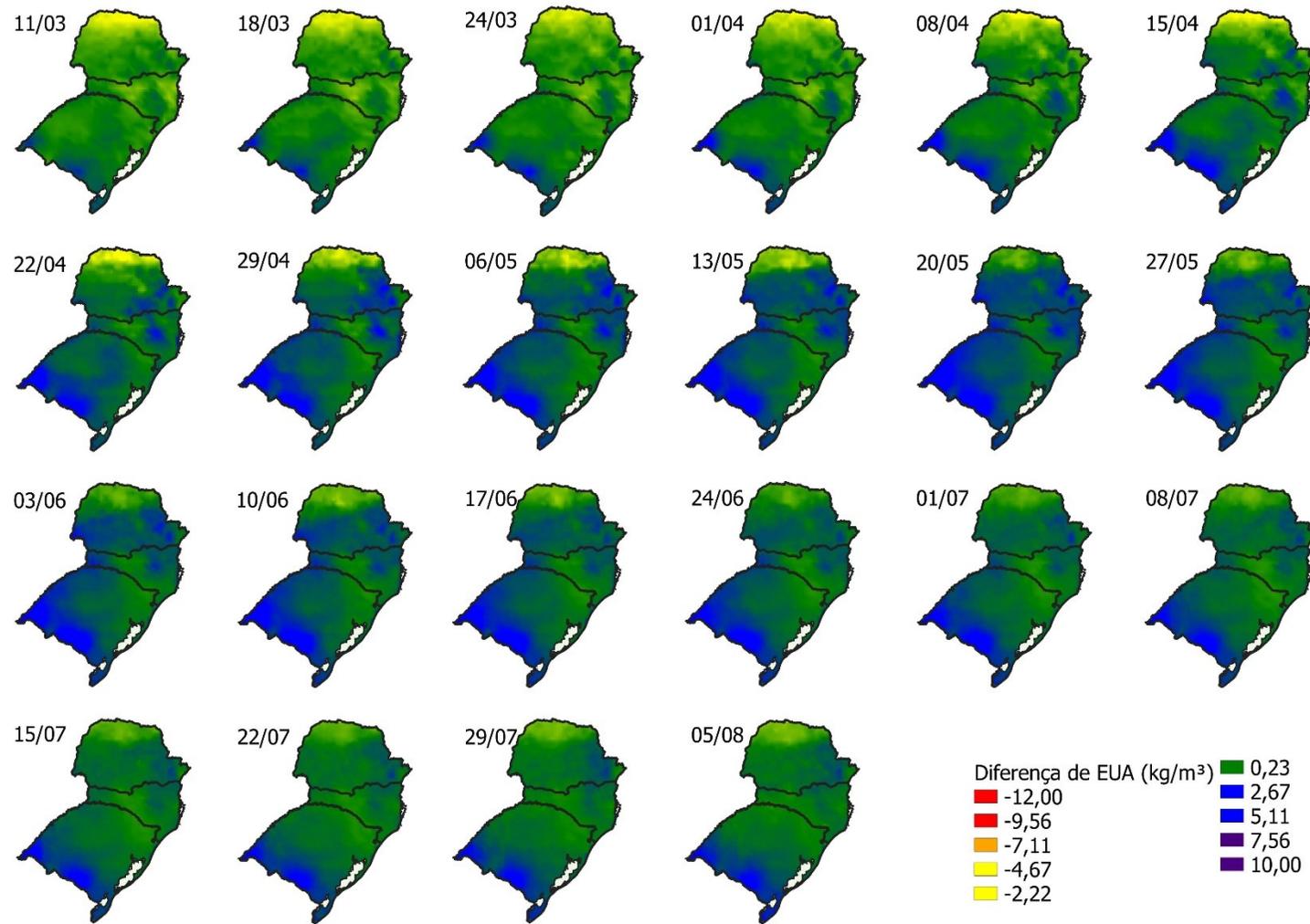
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 101. Diferença da Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2050 e atual com irrigação de 50%.



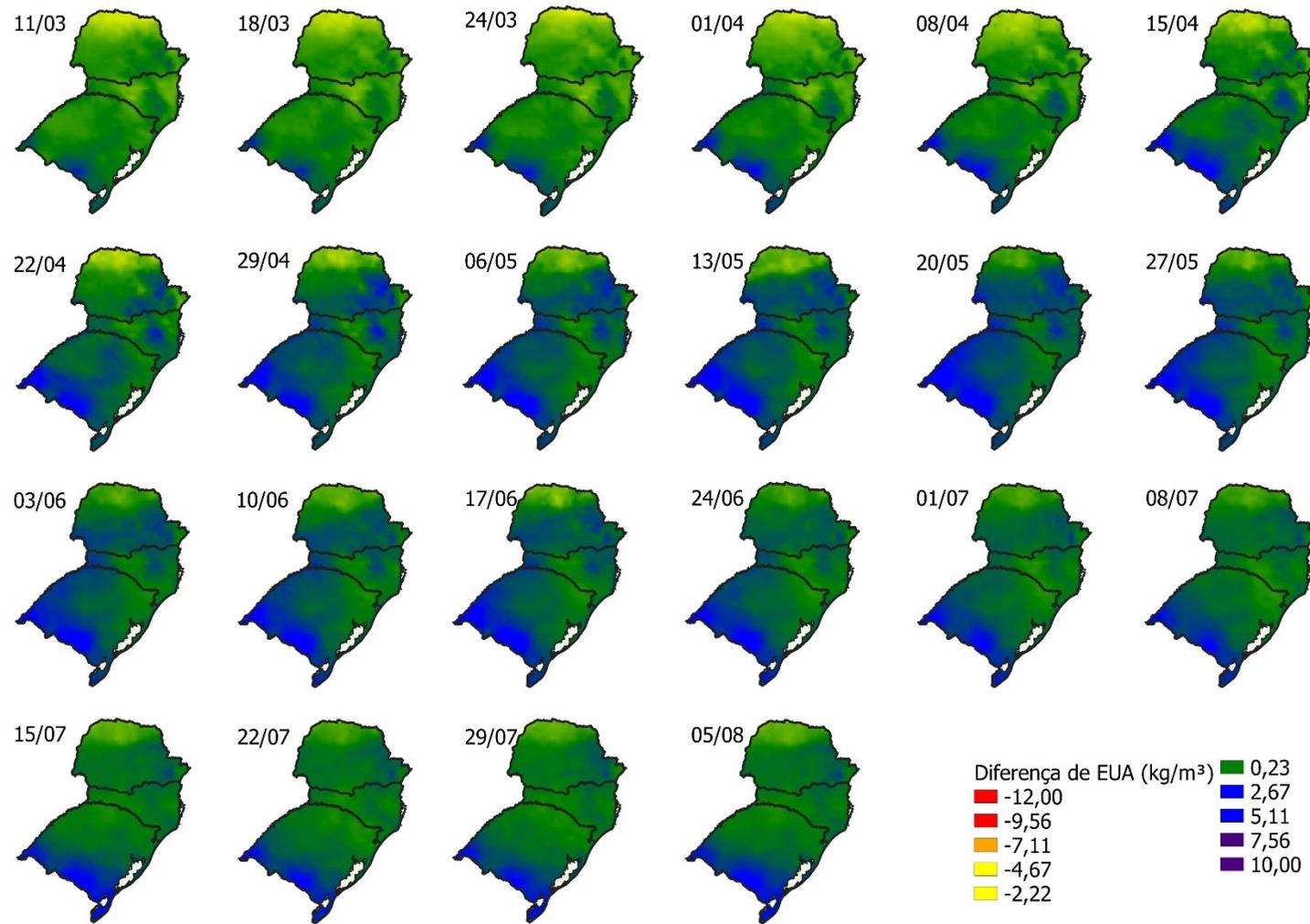
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 102. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2050 e atual com irrigação de 75%.



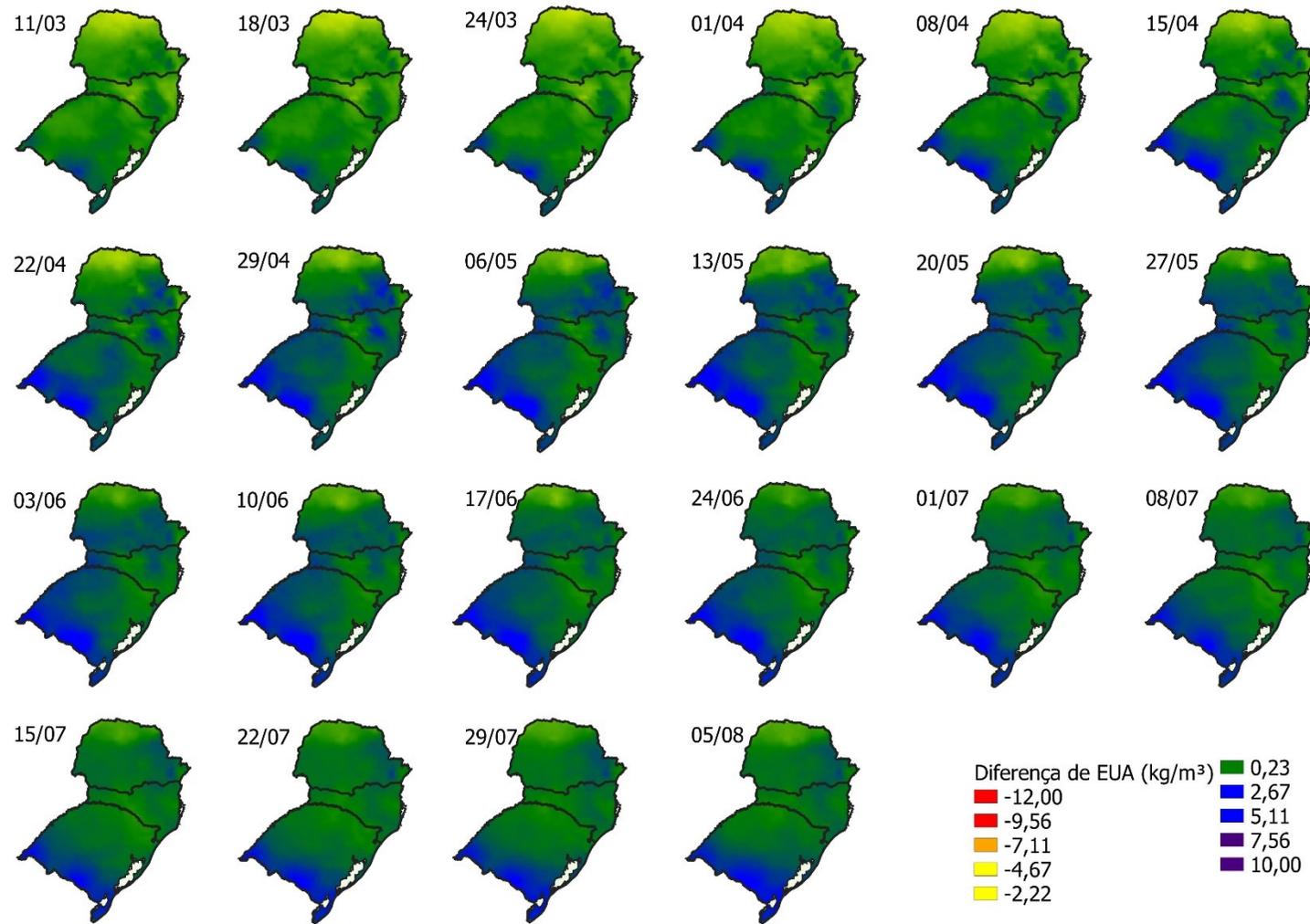
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 103. Diferença da Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2050 e atual com irrigação de 95%.



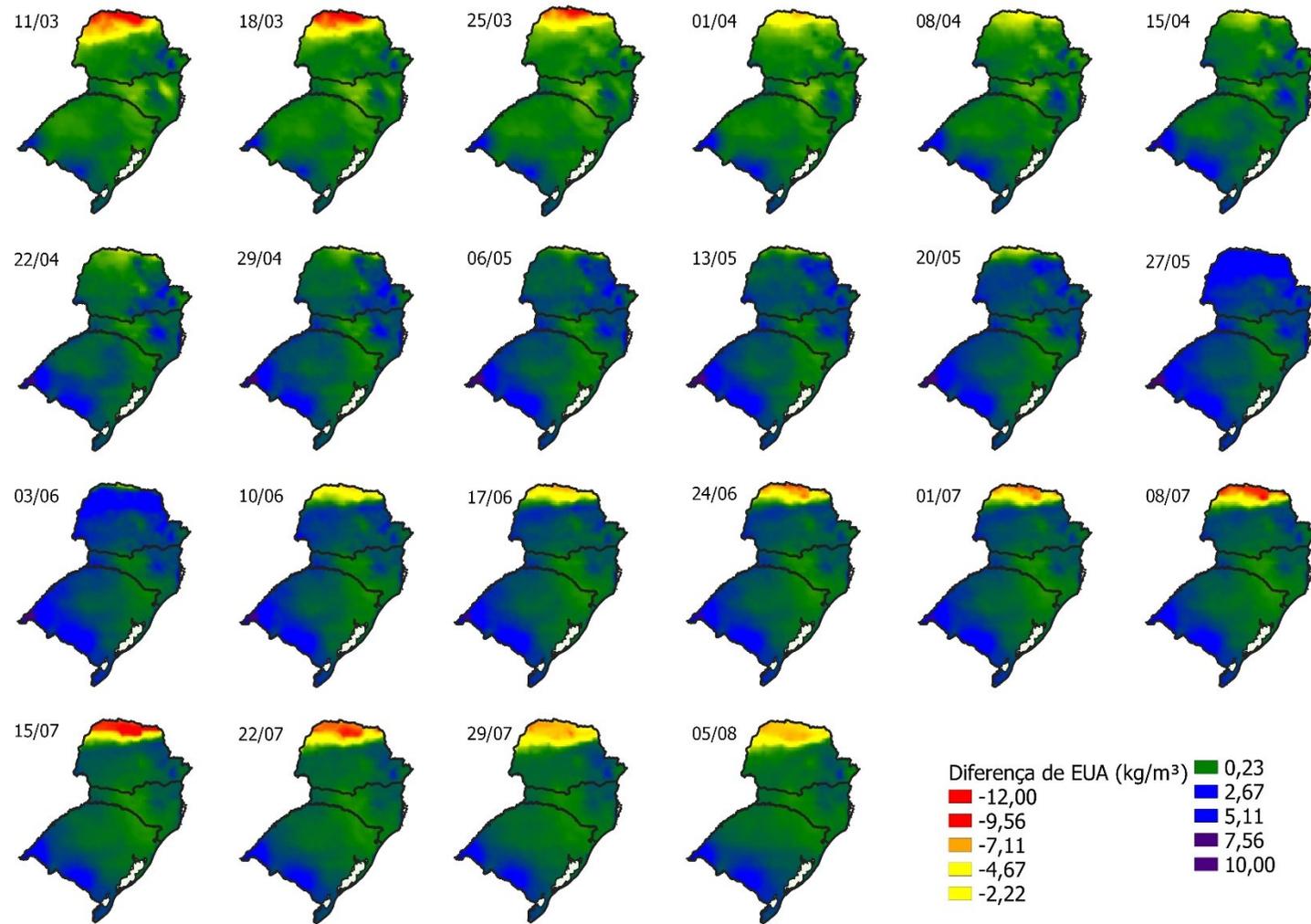
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 104. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2050 e atual com irrigação de 100%.



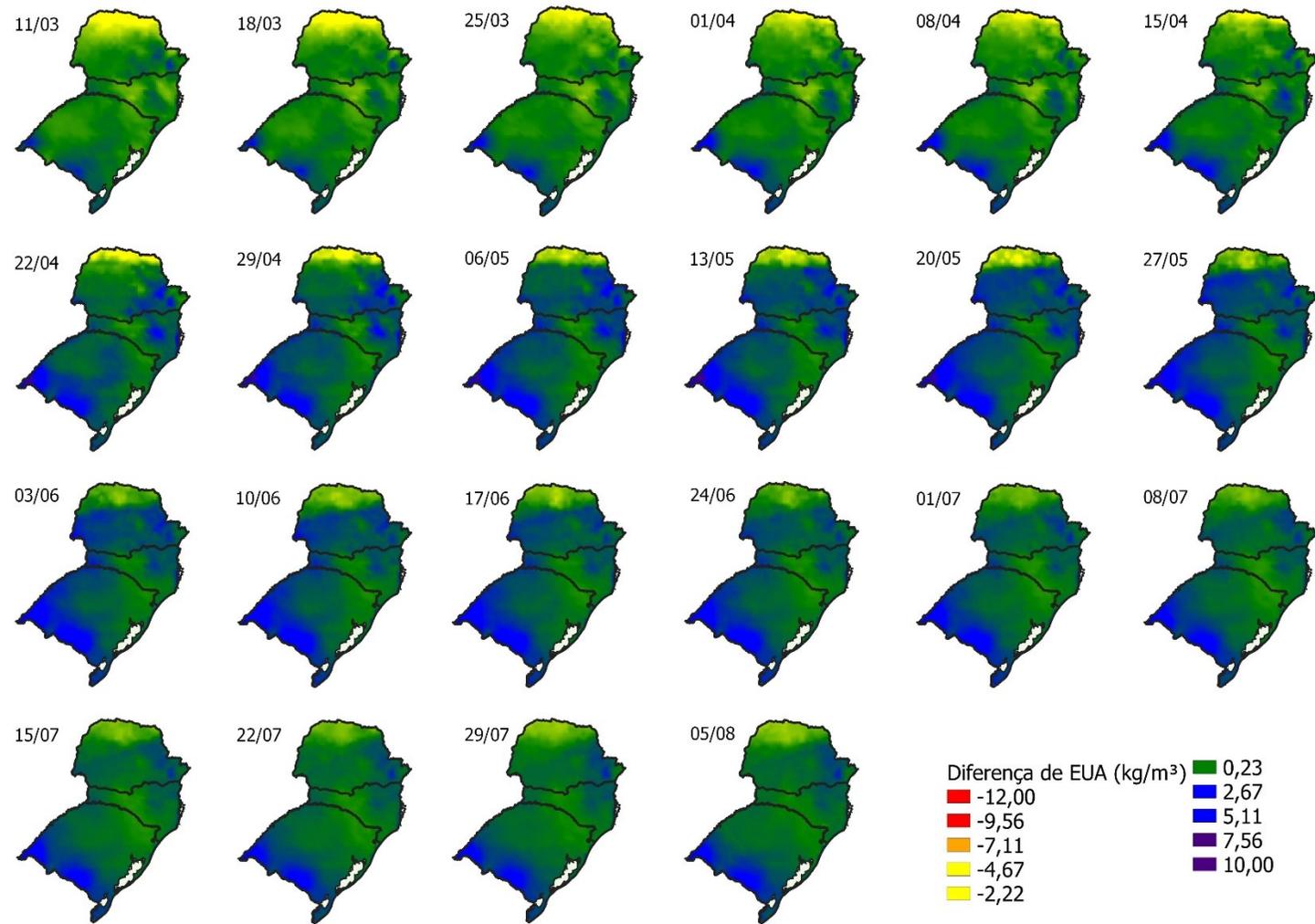
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 105. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual.



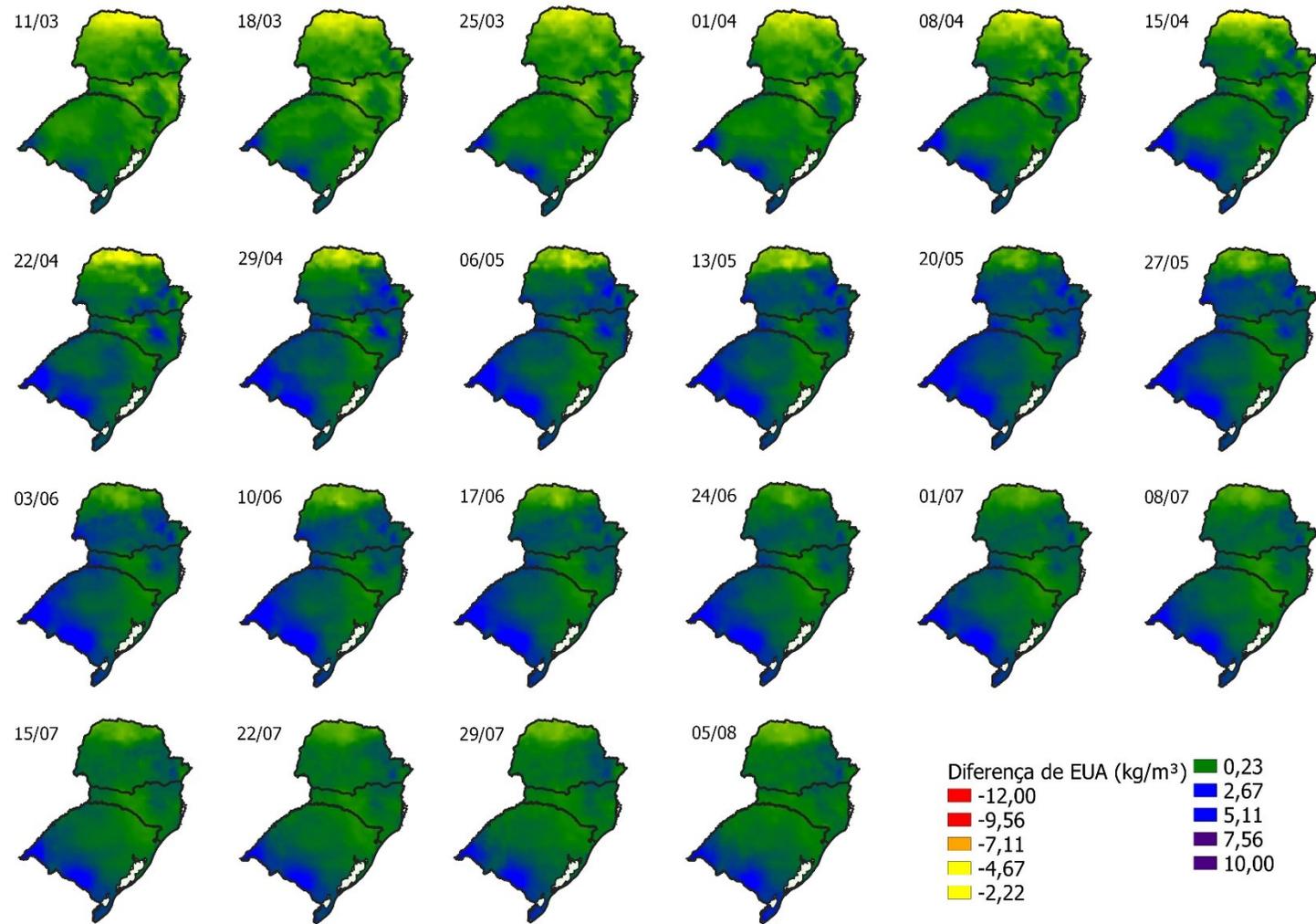
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 106. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 50% .



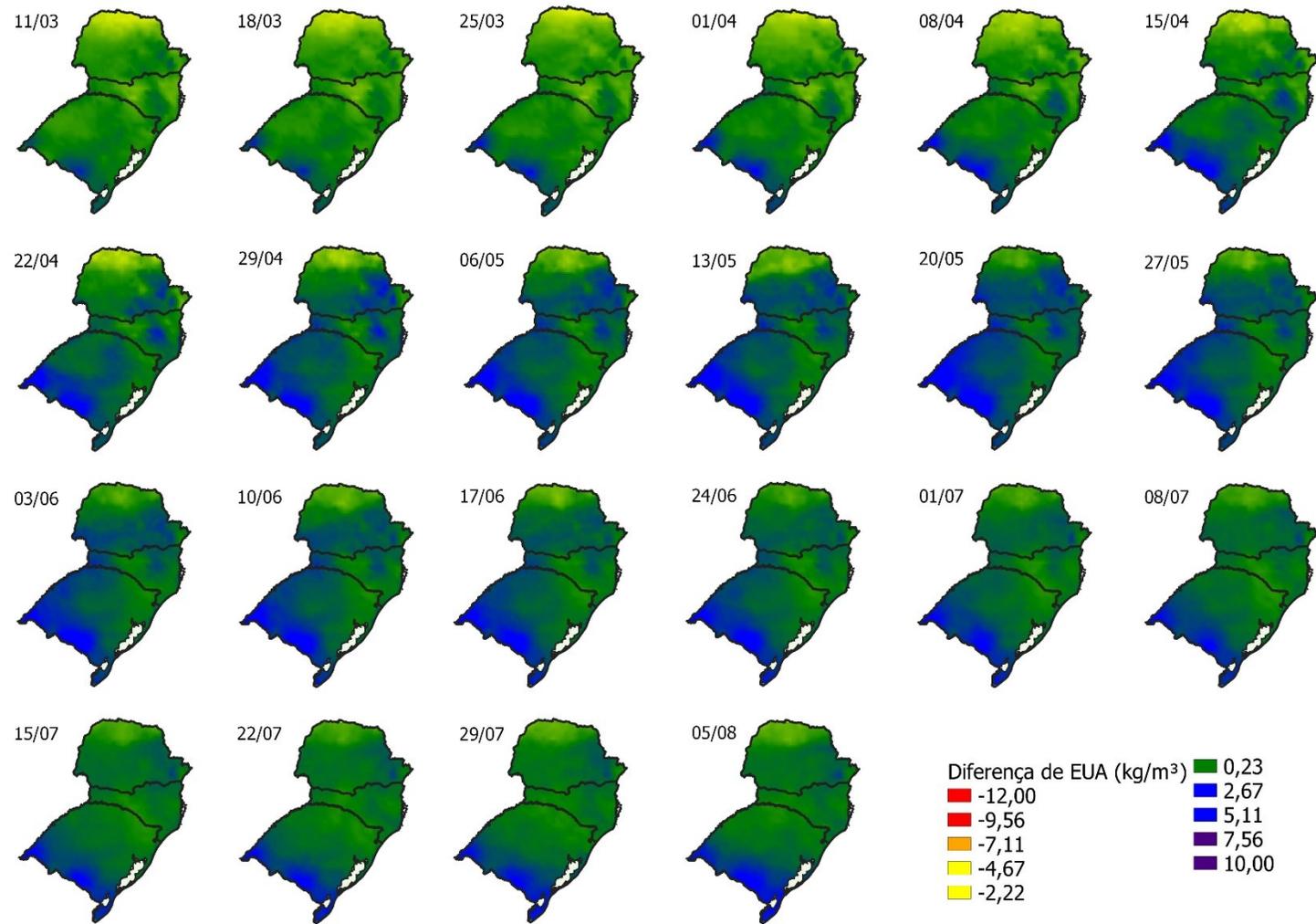
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 107. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 75%.



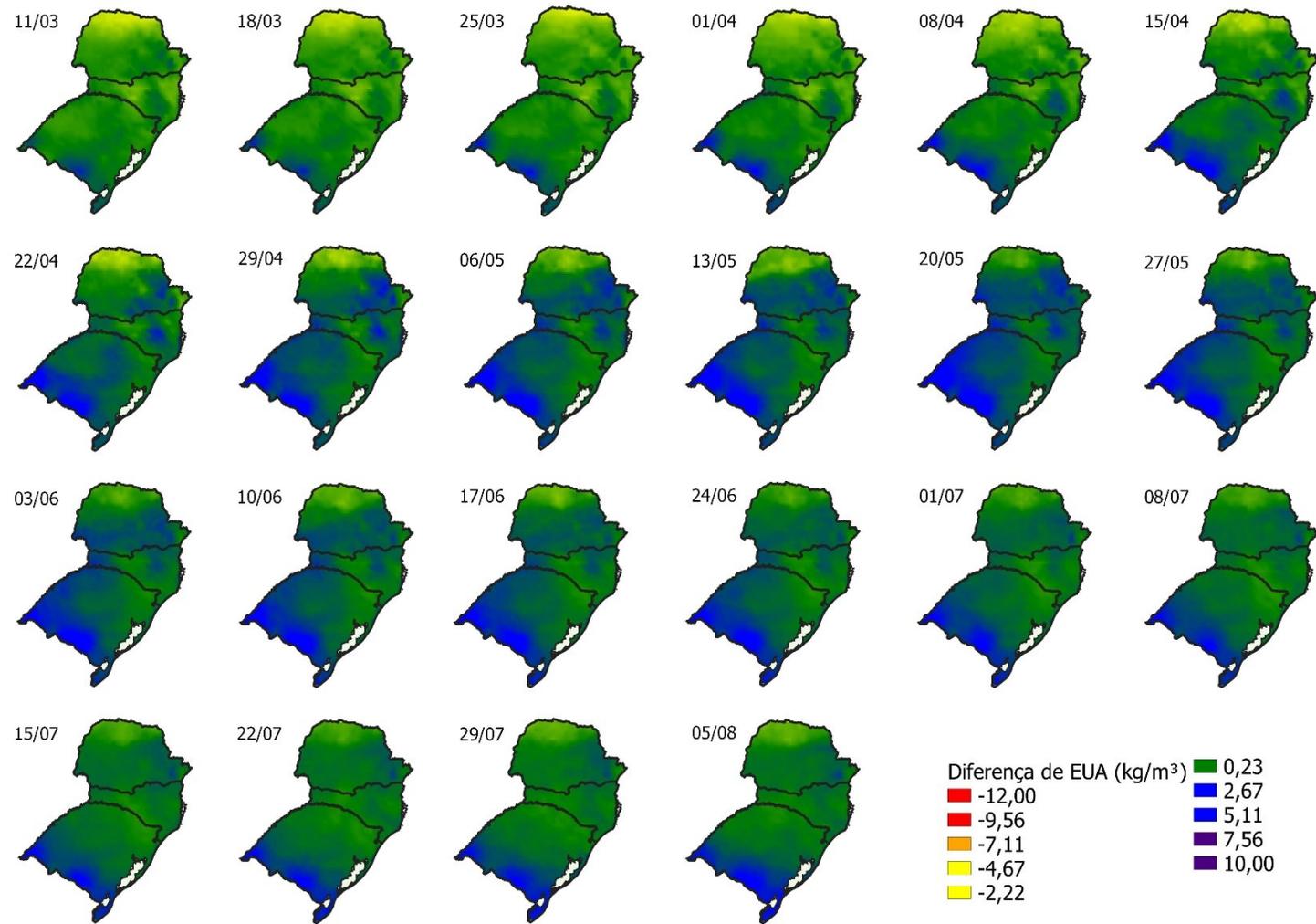
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 108. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 95%.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 109. Eficiência do uso da água considerando a precipitação e irrigação do cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 100%.

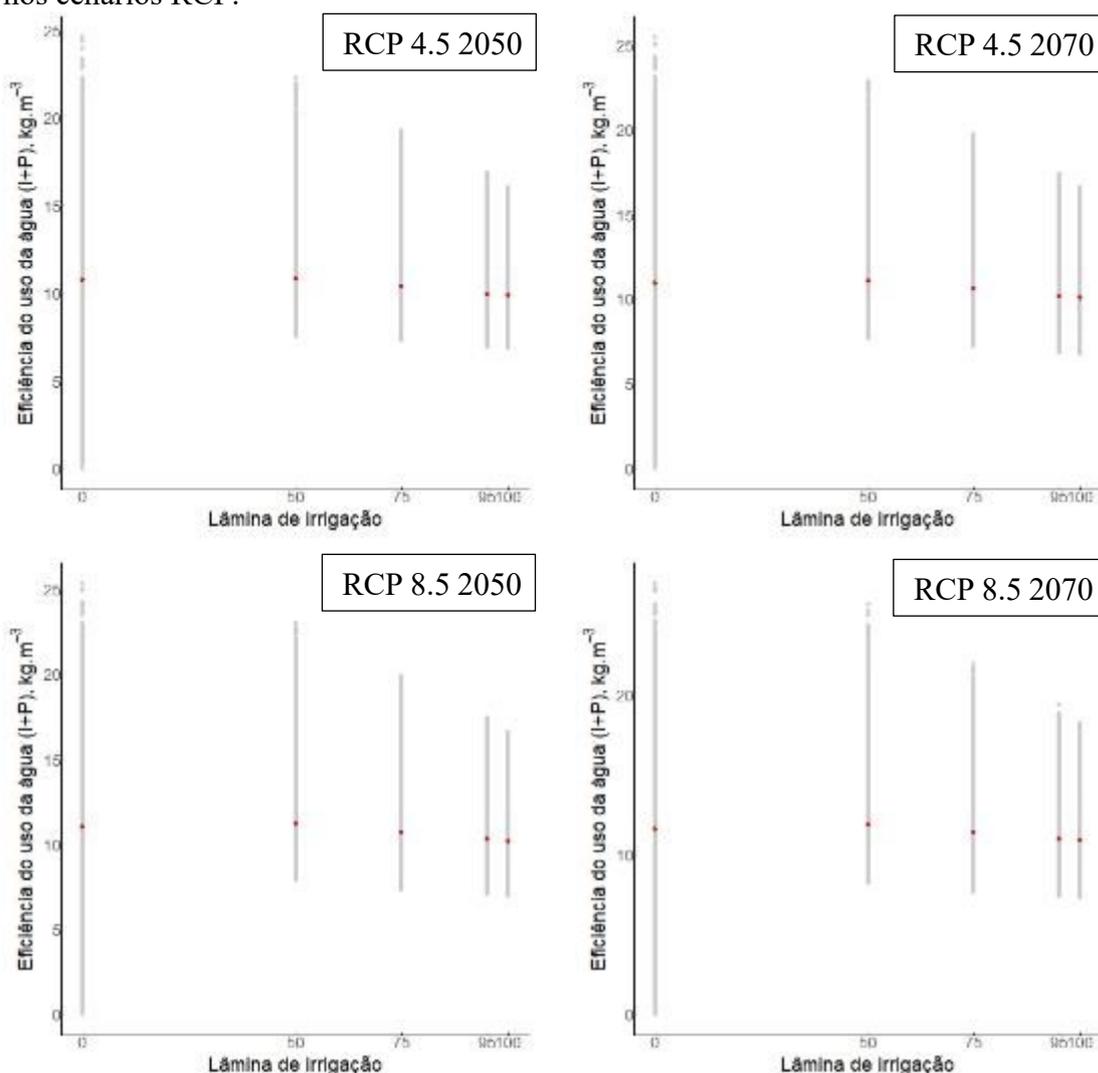


Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Conforme os dados médios de eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) (Figura 110), foi observado em todos os cenários sem irrigação a ocorrência de maior variação da eficiência do uso da água, enquanto os tratamentos irrigados tiveram em média uma eficiência de uso da água superior a  $5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  para todos os cenários projetados. Ao aumentar a lâmina de irrigação se teve uma menor eficiência do uso da água para o trigo. Este fato se justifica que a planta não usou a água disponibilizada via irrigação para converter em produtividade da cultura.

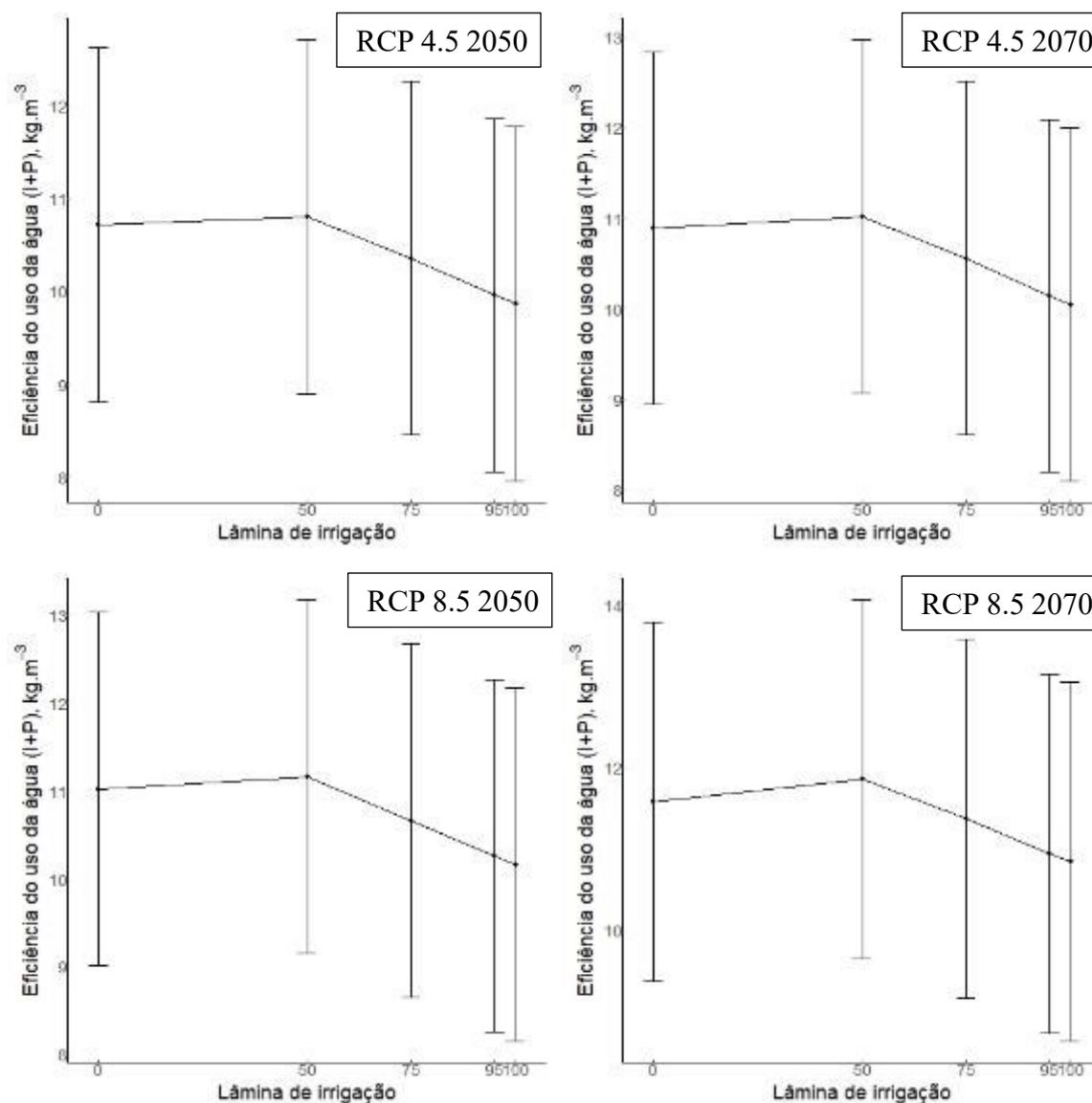
A lâmina mais indicada para a área de estudo baseada em eficiência do uso da água foi a lâmina de 50%. Quando observada as lâminas de 95% e 100% observassem que mesmo disponibilizando água à mais, a planta não respondeu em aumento de produtividade. Contudo, está água disponibilizada a mais se perde por processos de evaporação ou por percolação processos de percolação ou por evaporação. É necessário otimizar o manejo da irrigação que o modelo permite, resulte em redução de água a agricultura irrigada.

Figura 110. Eficiência do uso da água média (I+P) ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários RCP.



Observando a eficiência do uso da água em relação com a média e o desvio padrão os cenários RCP 4.5 2070 e 8.5 2070 foram observados os maiores valores de média e desvio padrão, respectivamente chegaram a 13 e 14  $\text{kg.m}^{-3}$  na lâmina de 50% (Figura 111)

Figura 111. Eficiência do uso da água média $\pm$ desvio-padrão (I+P -  $\text{kg.m}^{-3}$ ) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários RCP.

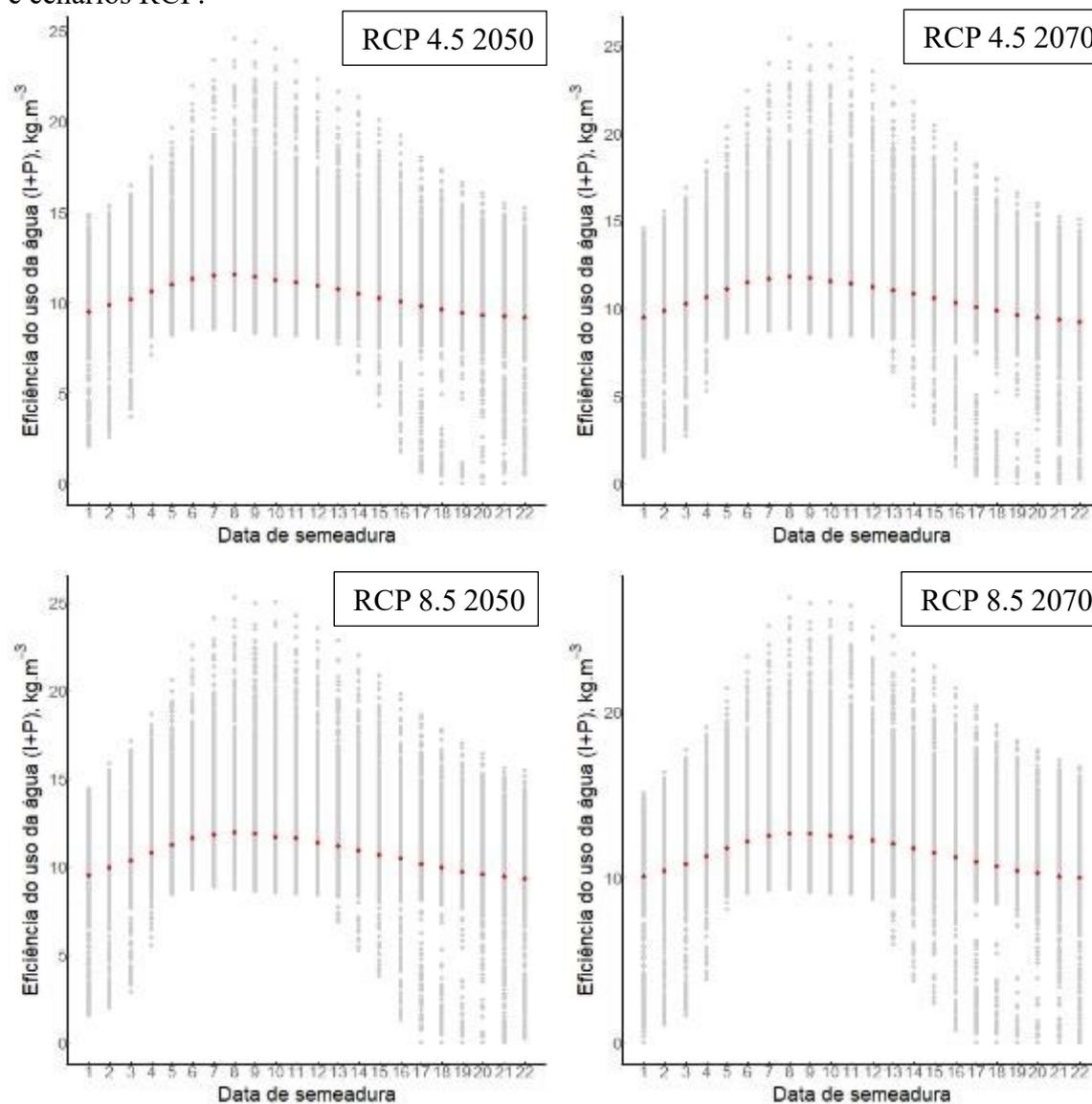


Fonte: Elaborado pela autora, 2021

Para os dados referentes à data de semeadura, para diferentes cenários simulados, as melhores datas de semeaduras variam entre as datas de 22/04, 29/04 e 6/05 (Tabela 5, 6, 7 e 8, Apêndice D). Visto que comparando as médias para os cenários RCP 4.5 2050, 4.5 2070, e 8.5 2050, verificou-se uma similaridade entre as datas de plantio para a cultura do trigo que se destaca as datas de semeadura de 22/04, 29/04 e 06/05. Enquanto, para o RCP 8.5 2070 a data de semeadura mais indicada conforme as médias foi a data de 22/04 e 29/04 (Figura 112). Nas

melhores datas de semeadura para o plantio de trigo verificou as menores variações de eficiência do uso da água.

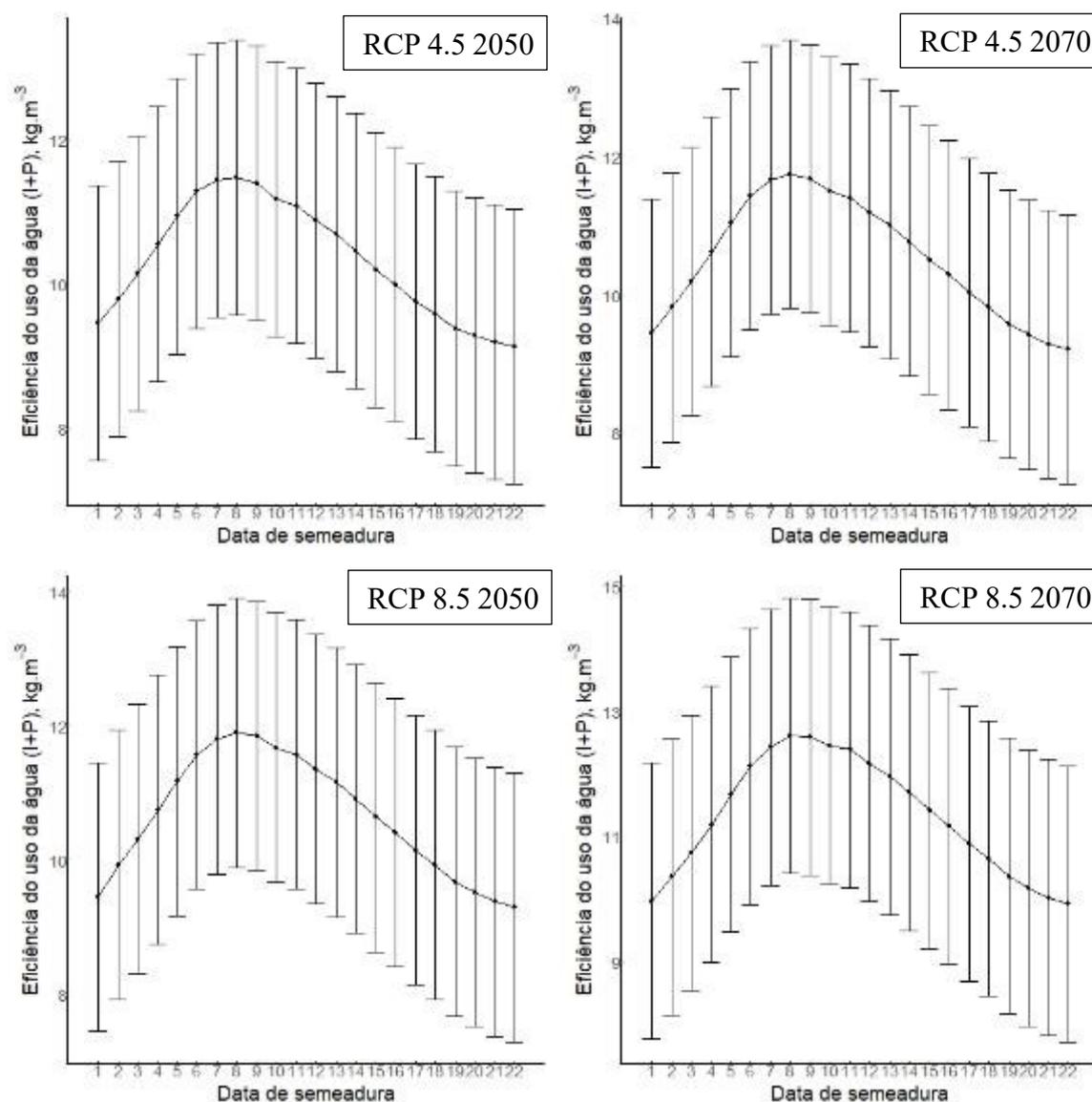
Figura 112. Eficiência do uso da água média (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) para diferentes datas de semeadura e cenários RCP.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Conforme as médias e o desvio padrão da eficiência do uso da água as datas de semeadura mais indicadas variam entre as datas de 22/04, 29/04 e 6/05. Contudo, foi observada nas barras de desvio padrão da eficiência do uso da água (Figura 113) uma amplitude em todas as datas de semeadura. Os desvios padrões são praticamente iguais, tendo variabilidade em todas as datas simuladas em relação à média.

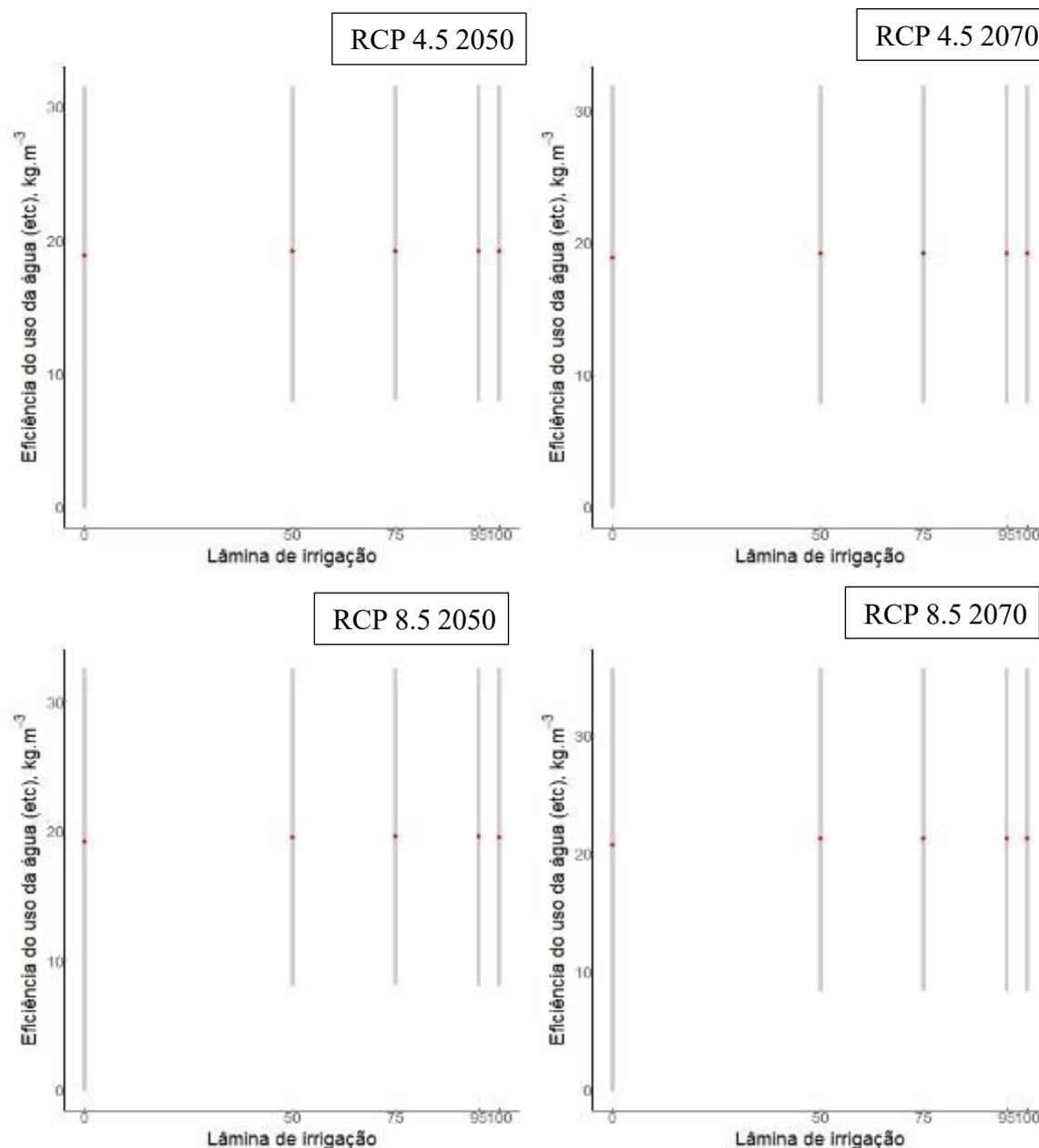
Figura 113. Eficiência do uso da água média±desvio padrão (I+P -  $\text{kg.m}^{-3}$ ) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários RCP.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021

As médias da eficiência do uso da água com base na evapotranspiração da cultura ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) (Figura 114) para as lâminas de irrigação de 50, 75, 95 e 100% não apresentaram diferença entre os valores de eficiência do uso da água, logo, confirmou que não houve conversão dessa água aplicado via irrigação em aumento de produção (Tabela 9, 10, 11 e 12). Neste estudo, a lâmina de irrigação 50% se mostrou melhor que a de 100%, uma vez que se aplica uma menor lâmina de água sem alterar a produção da cultura de trigo.

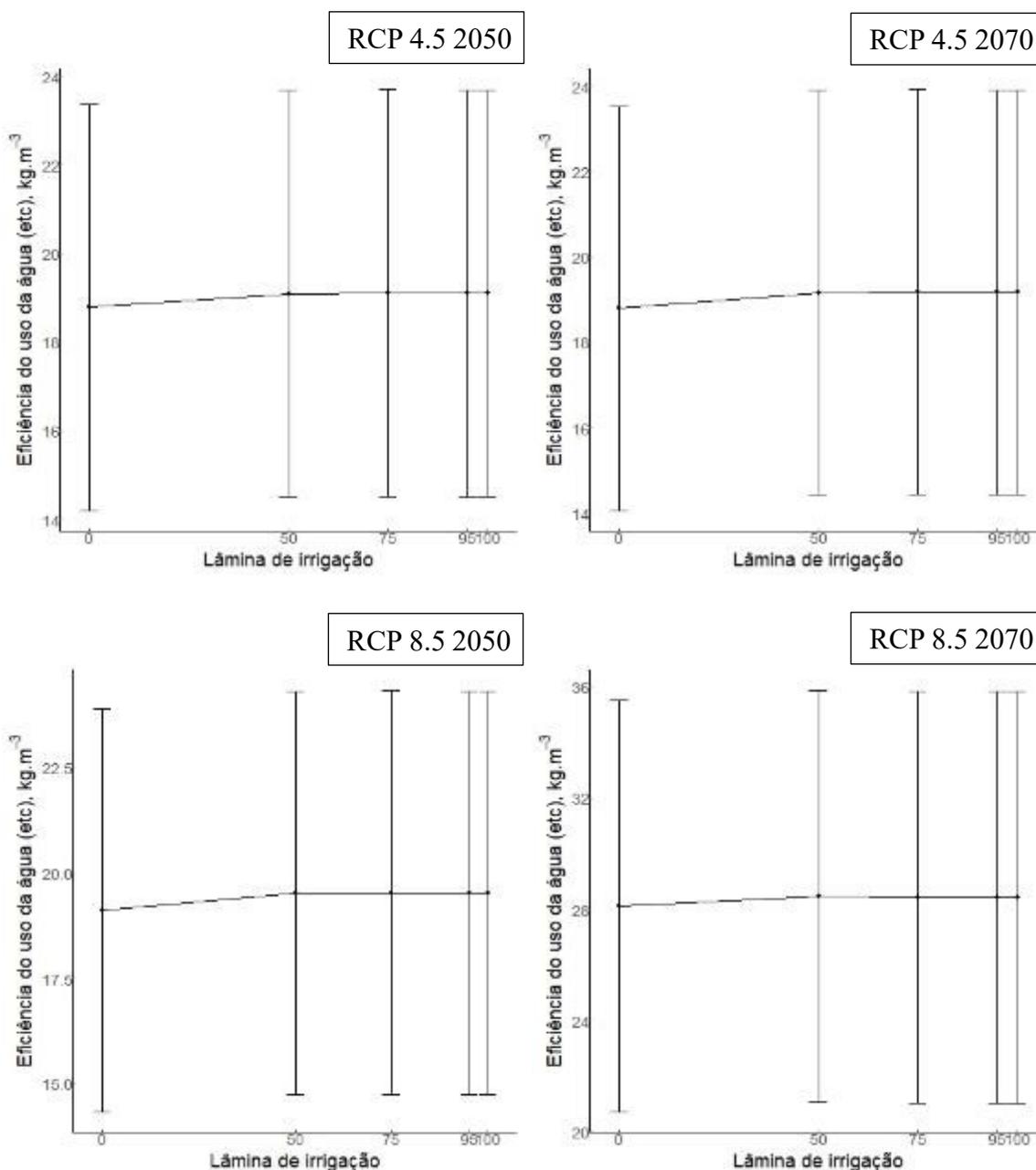
Figura 114. Eficiência do uso da água média (ETc) ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) para diferentes lâminas de irrigação e respectivos cenários RCP 4.5 2050, RCP 4.5 2070, RCP 8.5 2050 e RCP 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

As médias para os diferentes cenários nos tratamentos 75, 95 e 100% mantiveram muito semelhante, assim como, o desvio padrão. Avaliando os diferentes cenários (Figura 115) a eficiência do uso da água em relação a evapotranspiração da cultura fica muito evidente o aumento da eficiência do uso da água no cenário mais péssima em relação ao desvio padrão fica muito próximo de 20 e  $36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

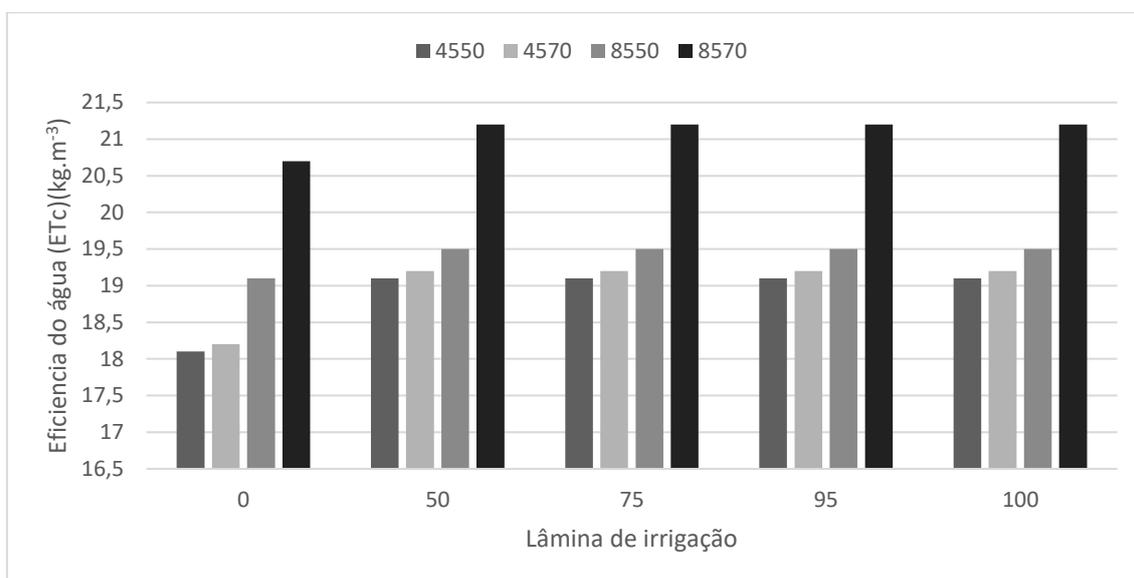
Figura 115. Eficiência do uso da água média  $\pm$  desvio padrão ( $ET_c - \text{kg.m}^{-3}$ ) para diferentes lâminas de irrigação e respectivos cenários 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

No cenário descrito como mais pessimistas, RCP 8.5, foi o cenário em que se observou a maior eficiência do uso da água (Figura 116). Este fato se explica devido ao CO<sub>2</sub> influenciar diretamente na eficiência do uso da água no trigo. Até mesmo com o aumento da evapotranspiração da cultura, em consequência da elevação da temperatura comparado ao cenário mais otimista.

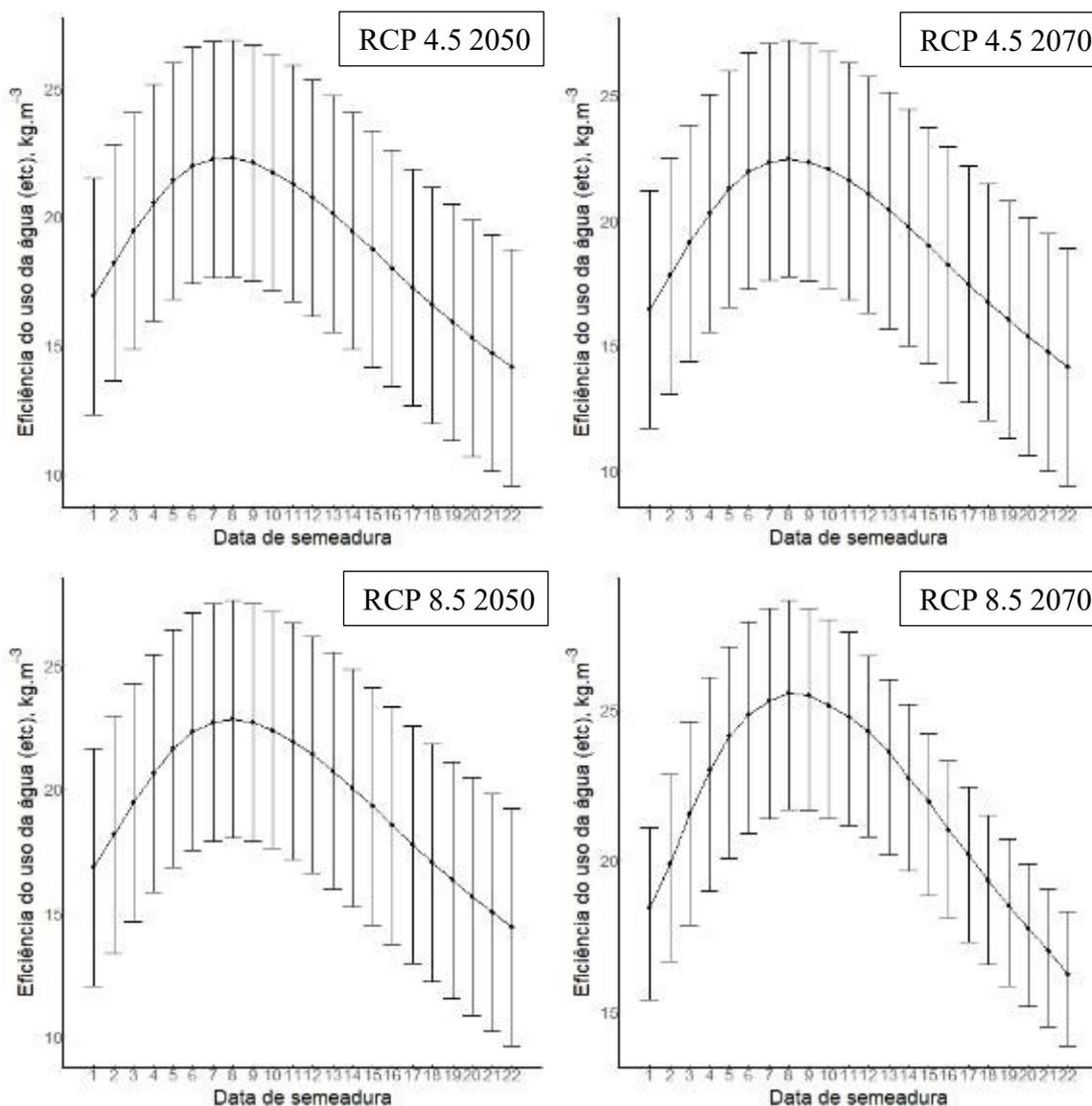
Figura 116. Eficiência do uso da água (ETc - kg.m<sup>-3</sup>) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Conforme as médias das datas de semeadura as datas mais indicadas foram semelhantes ao método que considerou a irrigação e precipitação variando entre as datas de 22/04, 29/04 e 6/05 (Tabelas 9, 10, 11 e 12). As datas de semeaduras seguiram o mesmo padrão de desvio padrão muito semelhantes (Figura 117).

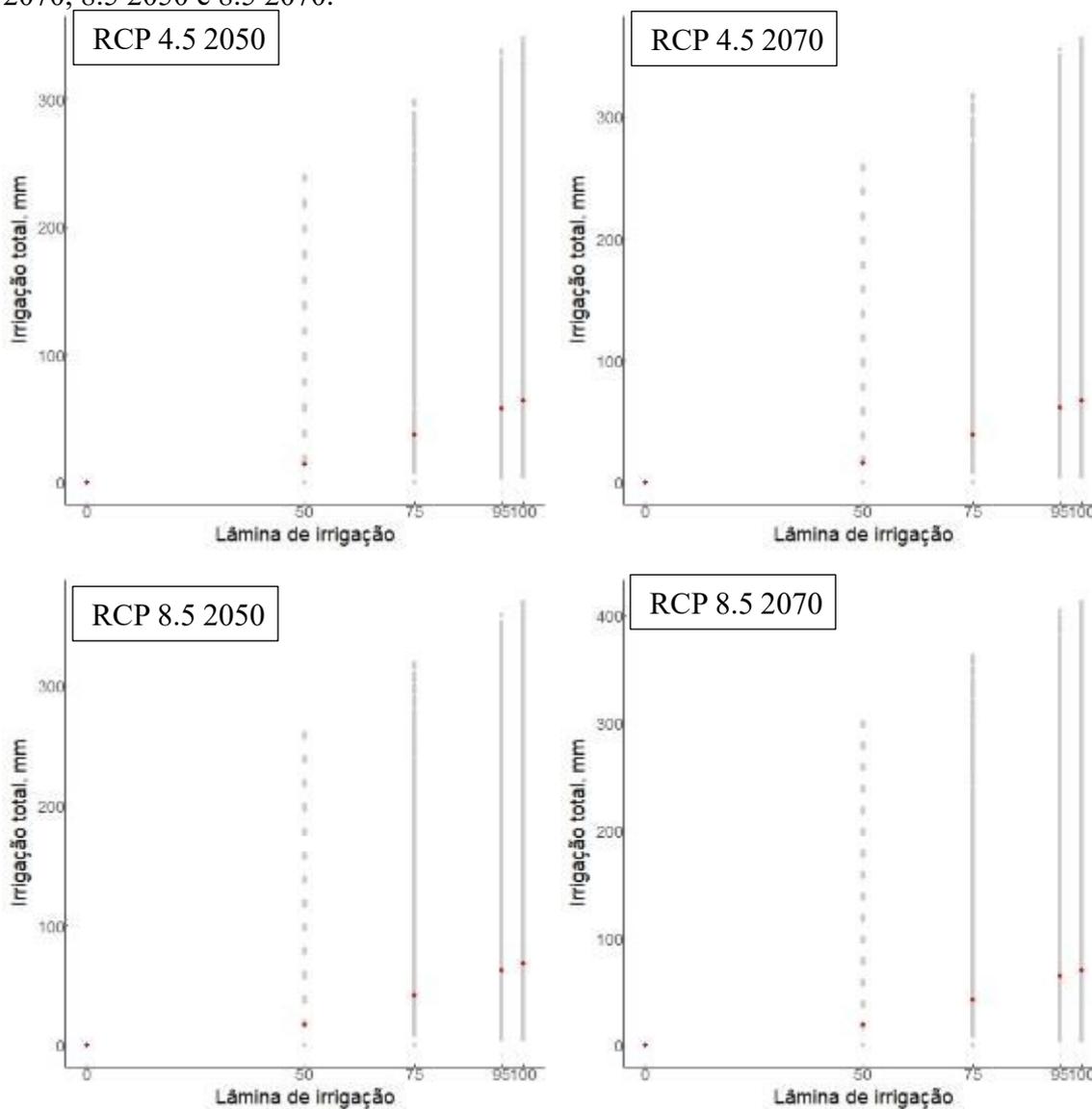
Figura 117. Eficiência do uso da água média (ETc -  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) para diferentes datas de semeadura nos cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

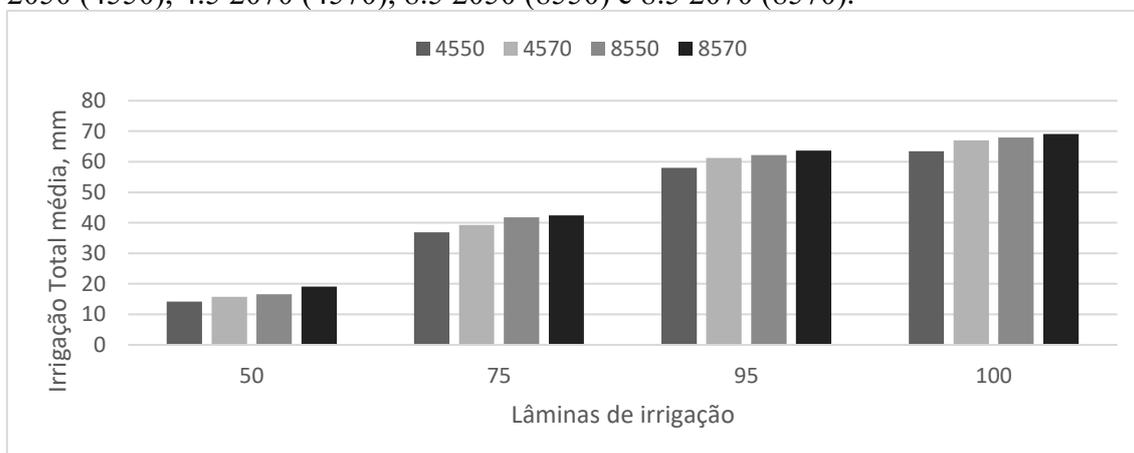
Em um contexto de mudanças climáticas, a irrigação total vai aumentar. Nos cenários modelados a irrigação consome mais água no cenário RCP 8.5 2070. As lâminas de 50,75, 95 e 100 %, respectivamente tem um consumo máximo de 300 mm, 362 mm, 404 mm, 412 mm (Figura 118). As médias de irrigação no mesmo cenário foi de 63,5, 67, 67,9 e 69,1 mm (Figura 119). Os tratamentos de 75, 95 e 100% não apresentaram aumento de produtividade da cultura em  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Sendo que foi observado uma diferença entre de 42 e 50 mm, no manejo da irrigação adotando a lâmina de 75% a nível de propriedades consegue se ter uma diminuição do consumo de água em escala de propriedade rural.

Figura 118. Irrigação total (mm) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

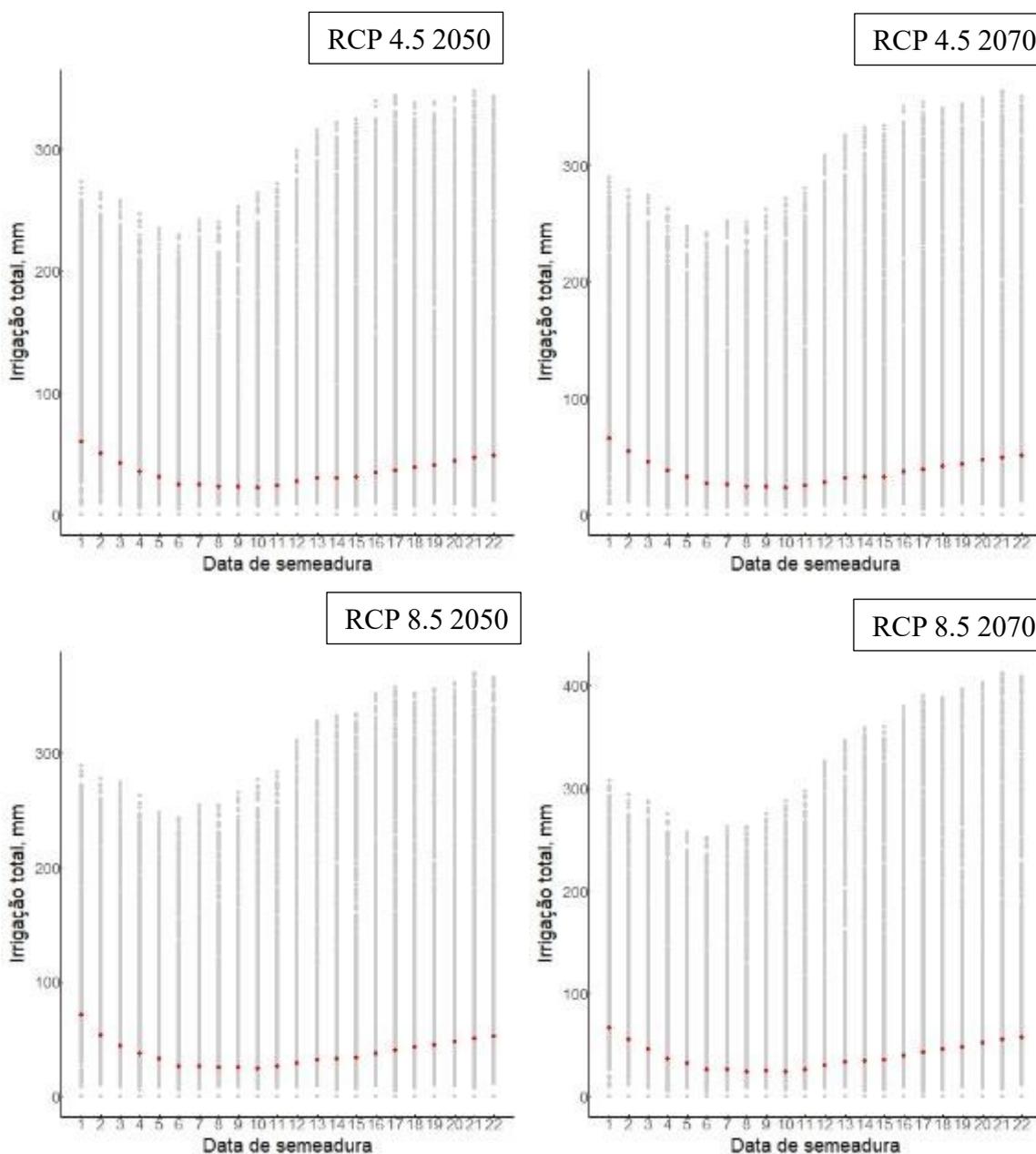
Figura 119. Irrigação total média (mm) para diferentes lâminas de irrigação nos cenários 4.5 2050 (4550), 4.5 2070 (4570), 8.5 2050 (8550) e 8.5 2070 (8570).



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

As datas de semeaduras podem influenciar na quantidade de irrigação total para a cultura do trigo (Figura 120 e 121). Na simulação destes dados, independente do cenário futuro, as datas entre 15/04, 22/04, 29/04, 06/05, 13/05 e 20/05 consome menos água destinada a irrigação, se comparado as outras datas de semeadura. Visto que quanto mais tardio o plantio se tem maior consumo de irrigação, que ocorre em cultivares de ciclo precoce, que podem ser usadas como estratégia para as mudanças climáticas para escapar de eventos extremos por estar menos tempo a campo. A escolha de uma data com maiores precipitações resulta em menor consumo de água por via de irrigação, otimizando a eficiência do uso da água.

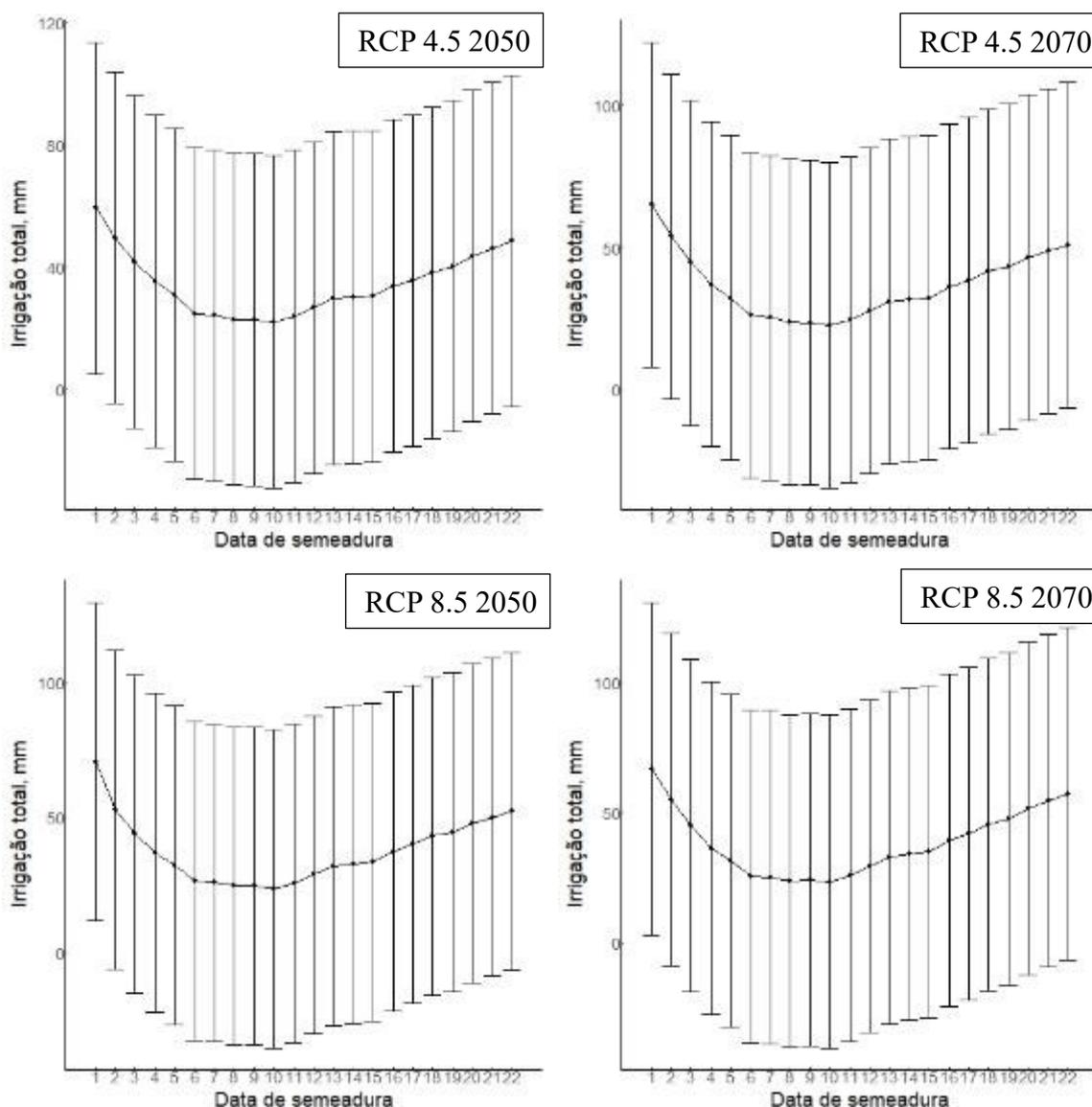
Figura 120. Irrigação total média (mm) para diferentes datas de semeaduras nos cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A maior média e desvio padrão foi observado na primeira data de semeadura, ao longo das datas de semeadura simuladas observasse uma redução da média de irrigação (mm) até as datas 15/04, 22/04, 29/04, 06/05, 13/05 e 20/05, em seguida começa a aumentar o consumo total de água via irrigação por ciclo da cultura (Figura 121).

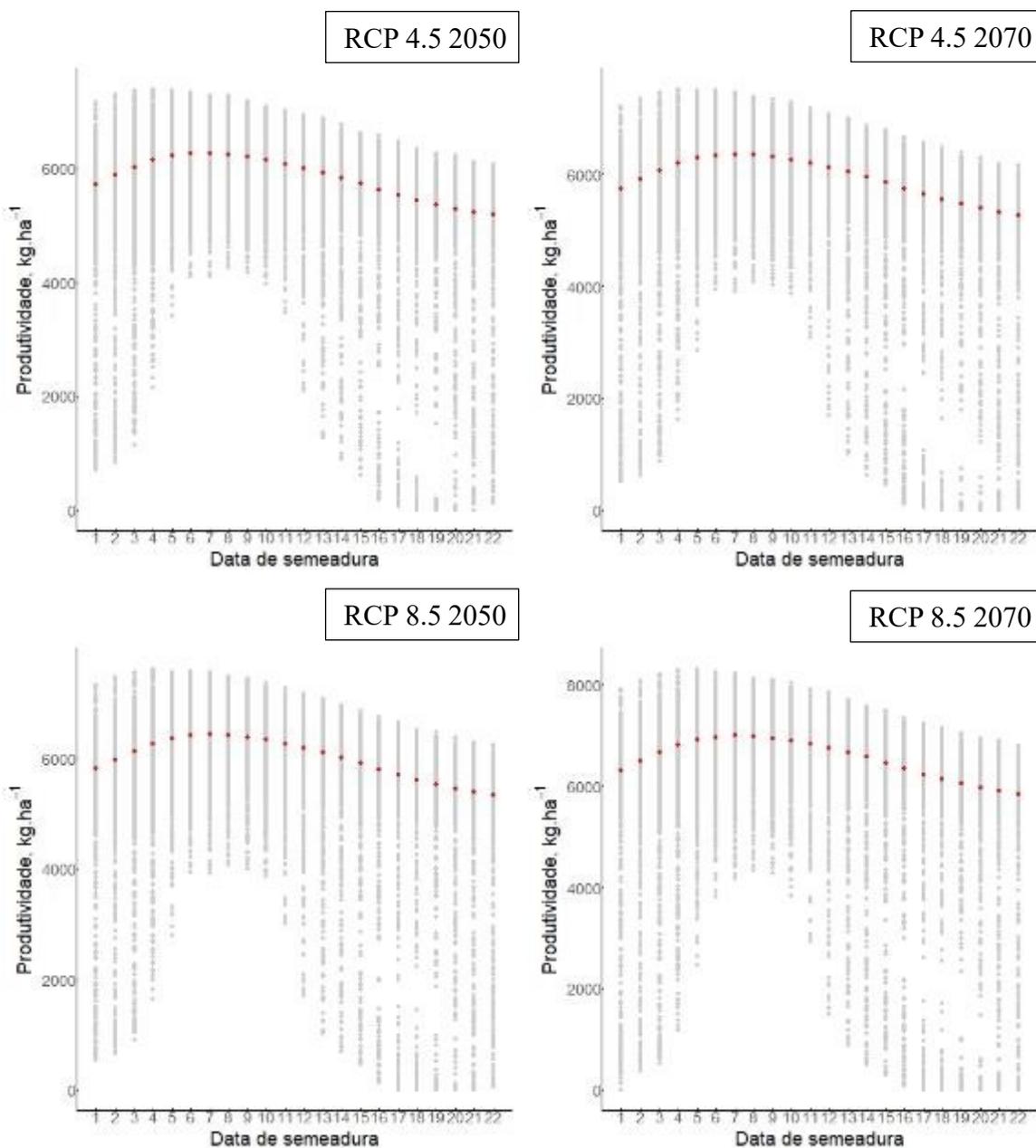
Figura 121. Irrigação média $\pm$ desvio padrão (mm) para diferentes datas de semeaduras para a para os cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Conforme a Figura 122 as médias da produtividade da cultura têm variabilidade entre as datas de semeaduras, porém, as datas 20/04 a 13/05 foi observado as menores variabilidade de produção para o Sul do Brasil.

Figura 122. Produtividade da cultura do trigo ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) para diferentes datas de semeadura nos cenários RCP: 4.5 2050, 4.5 2070, 8.5 2050 e 8.5 2070.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A propensão para irrigação em um cenário RCP 8.5 2070 é múltipla para o Sul do Brasil em diferentes eventos de lâmina de irrigação e data de semeadura (Figura 123, 124, 125 e 126). À medida que aumenta a lâmina de irrigação aplicada se verifica uma maior necessidade de água no cenário futuro (Figura 129), que pode estar relacionado a evaporação da água mais rápida por causa do aumento da temperatura da água. Conforme os dados modelados neste trabalho o Rio grande do Sul pode ser beneficiado com as mudanças climáticas com mais eventos de chuva e/ou aumento da precipitação, sendo assim, a lâmina total aplicada no ciclo

da cultura fica negativa, como se observa no Sul do estado uma maior intensidade de uma menor irrigação aplicada na cultura para as datas de semeaduras a partir do dia 10 de junho.

Na lâmina de 50% (Figura 126), se verifica os maiores índices de aumento de irrigação para o Sul do Brasil entre as datas de semeadura de a 11/03 a 15/04. Numa questão de redução de água aplicada por irrigação, são datas menos favoráveis para o plantio de trigo irrigado por requerer mais água que as outras datas quando comparado o cenário futuro com o atual.

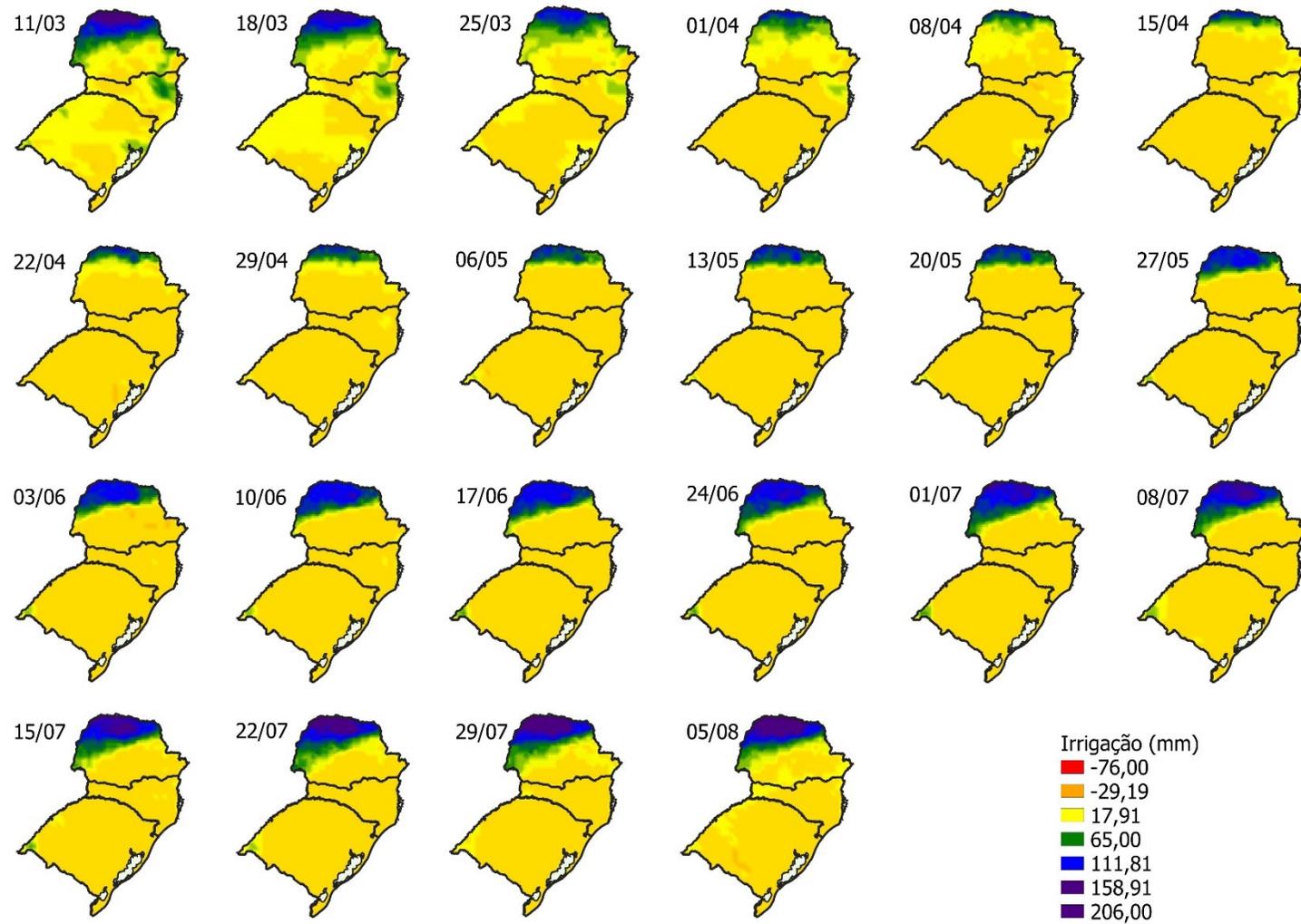
No manejo da irrigação com 75, 95 e 100 % (Figura 124, 125 e 126) observou-se que as datas mais propensas a economia de água para o estado de Santa Catarina e Rio Grande do Sul são entre os dias 24/04 a 03/06, com os excessos para o Rio Grande do Sul das datas a partir do dia 10/06, como mencionado para a lâmina de 50% para o Sul do estado (Figura 123).

A data de semeadura para o estado do Paraná foi muito heterogênea nas análises, sendo que cada localidade responde muito diferente ao manejo da irrigação. Porém, o padrão observado é influenciado pelo clima que cada região possui. No Norte sempre ocorrerão os maiores índices de irrigação no cenário futuro, mas deve se ressaltar que sem a irrigação em algumas regiões não conseguirá produzir trigo, ou estará muito suscetível a quebra de safras que não é interessante ao produtor. As datas de semeaduras 11/03 a 8/04 e 17/06 e 05/08 estão as mais variadas as necessidades de aumento de água para a cultura irrigada em condições de aplicação de lâmina de 50, 75, 95 e 100% (Figura 123, 124, 125 e 126).

Esse tipo de modelagem traz informações relevantes sobre um possível cenário, em que quanto e quando irrigar ainda é muito negligenciado pelos agricultores principalmente em picos de veranicos que acreditam que quanto mais água no sistema melhor para a produção para que não ocorra déficit hídrico para a planta. Como esperado as maiores lâminas são as que vão ter aumento em um cenário futuro comparado ao atual, mas isso não quer dizer que a planta vai aproveitar essa água para converter em grão, ou seja, produção. Como observado nesta modelagem a lâmina de 75% produziu a mesma quantidade que a de 95 e 100%. Visto que em termos de produção não foi observado grande diferença entre uma lâmina de 50 e 75%.

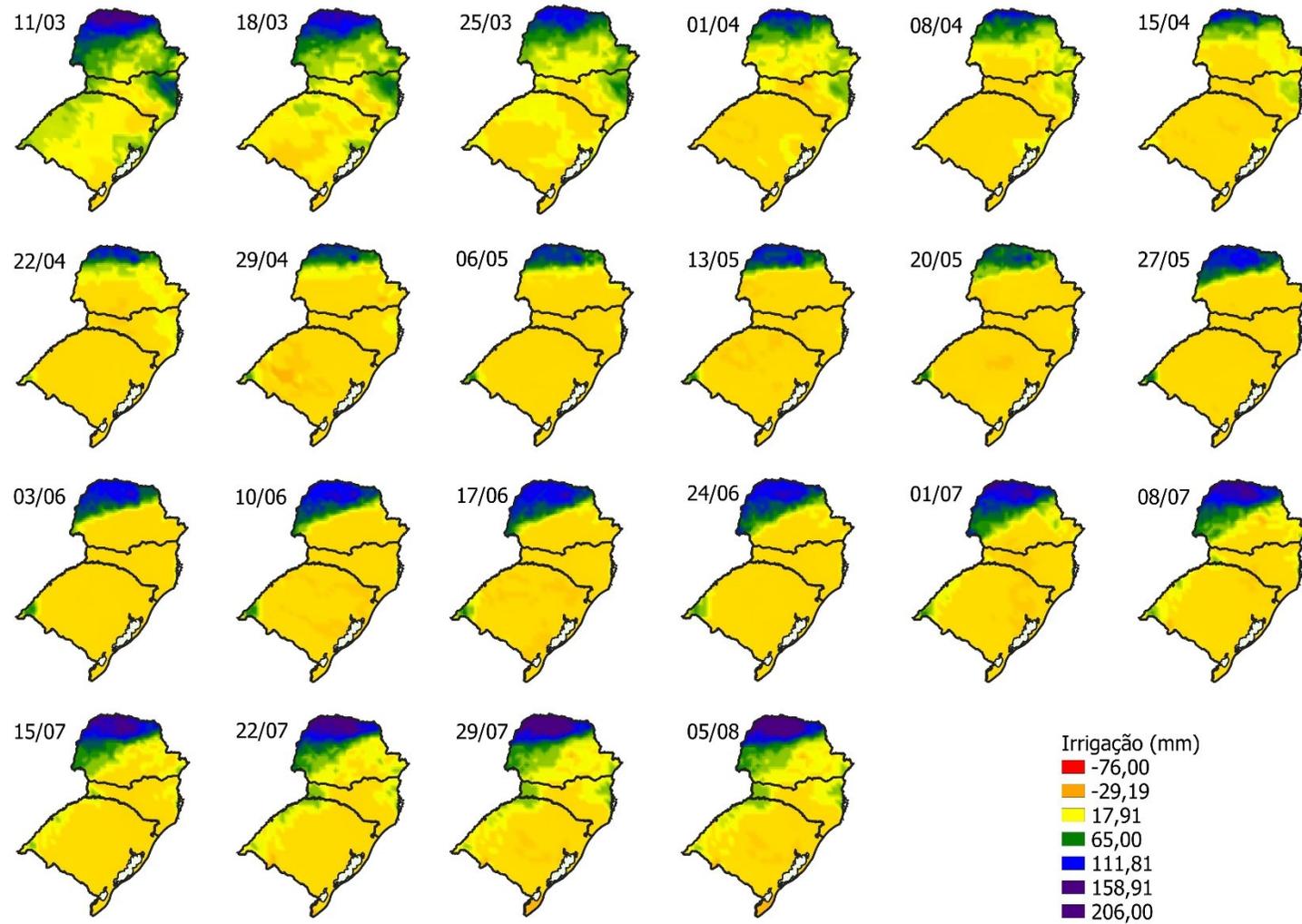
Em um cenário onde possa haver escassez de água para o consumo urbano e, conseqüentemente, para a agricultura irrigada, é de suma importância realizar simulações coerentes para a geração de informação e posteriormente aplicá-las a campo. Conforme os dados obtidos neste trabalho verificasse que a lâmina de 75% utilizada na cultura do trigo responde melhor em termos de produção. Aplicar uma lâmina de 95 e 100% em termos de produção levou aos mesmos resultados, contudo, em um contexto em que o recurso hídrico possa ser limitado deve ser otimizado a irrigação com uma aplicação de uma lâmina ideal.

Figura 123. Diferença entre a irrigação na cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 50%.



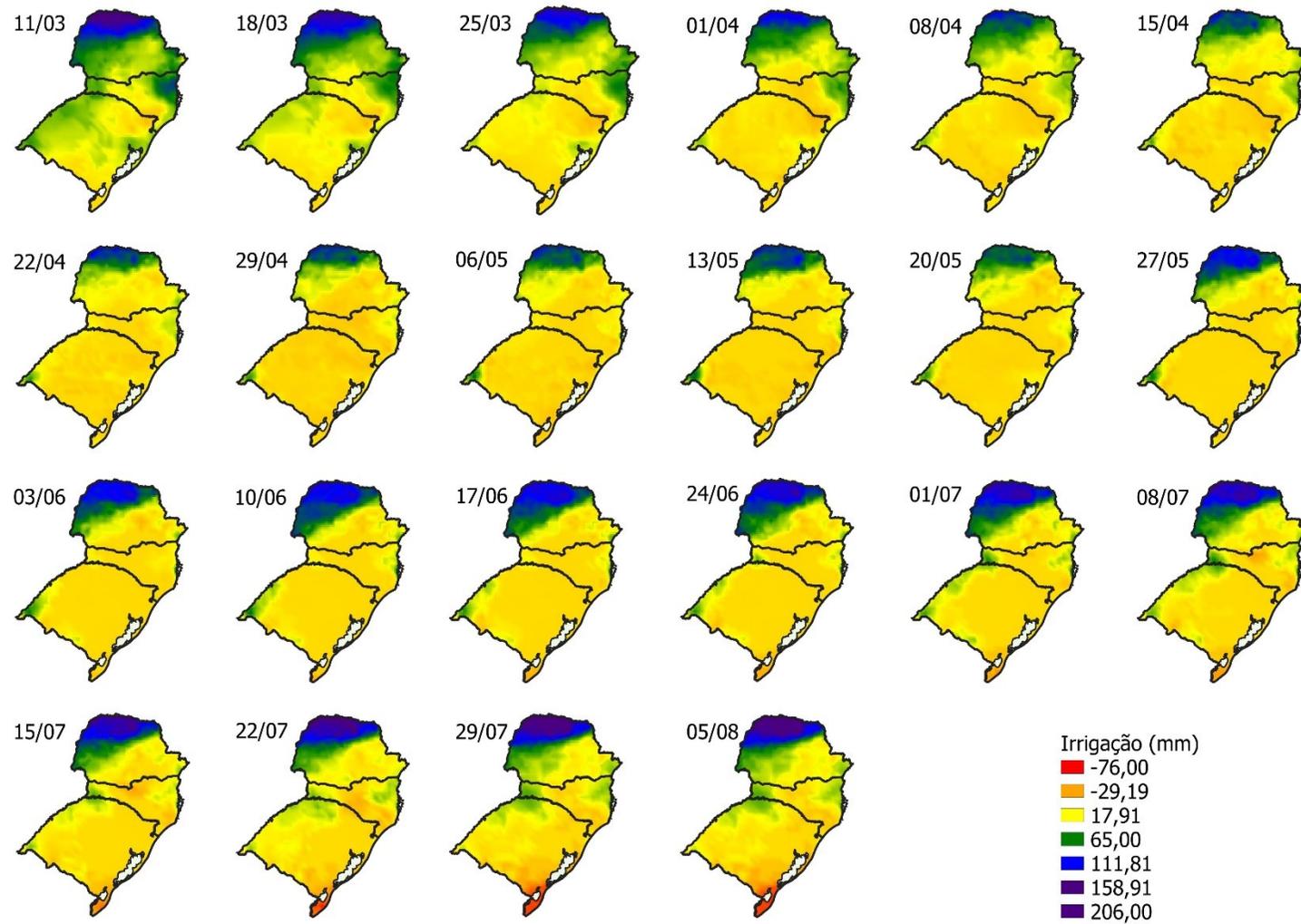
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 124. Diferença entre a irrigação na cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 75%.



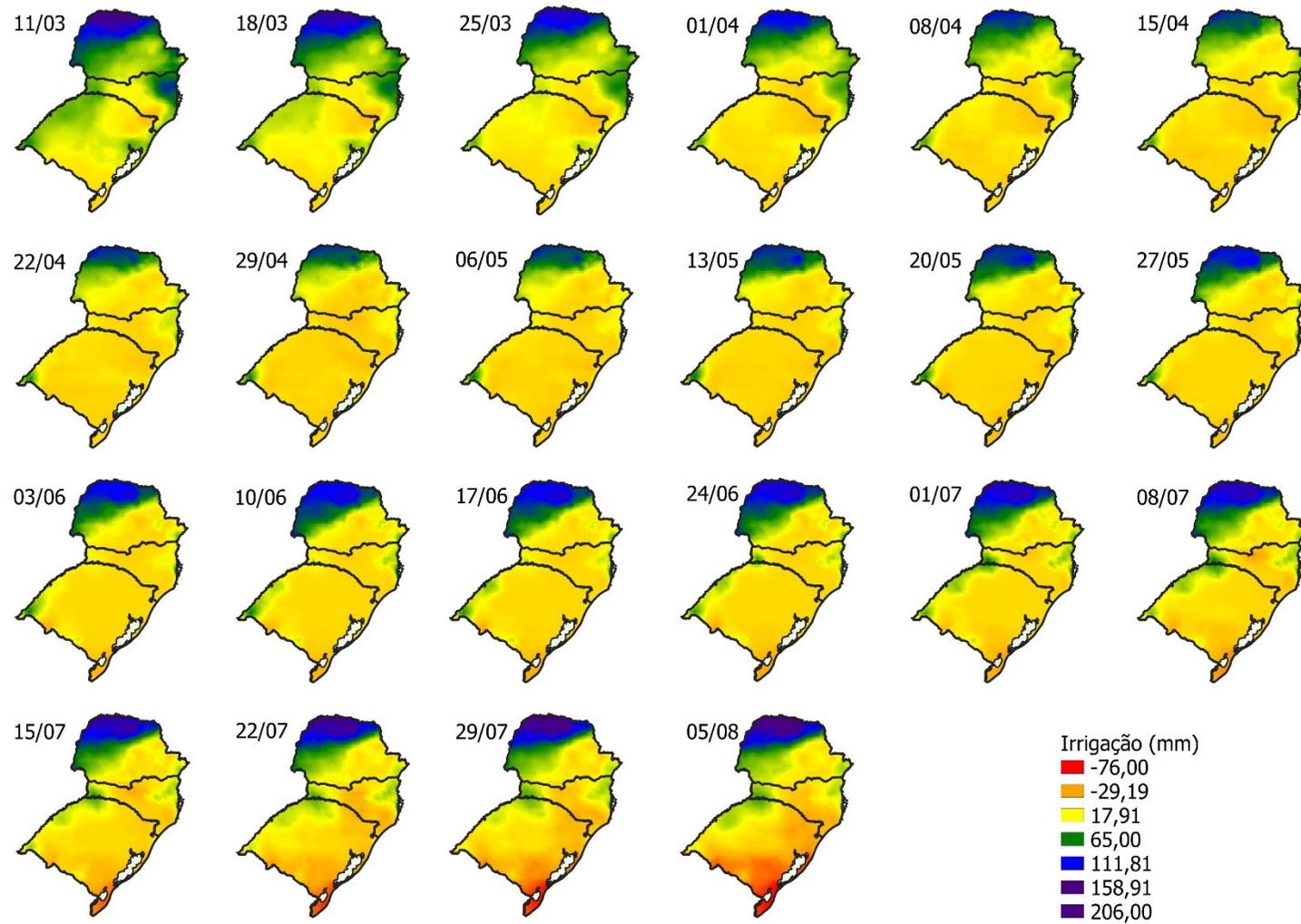
Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 125. Diferença entre a irrigação na cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 95%.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Figura 126. Diferença entre a irrigação na cultura (%) no cenário RCP 8.5 2070 e atual com irrigação de 100%.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

## 8 DISCUSSÃO

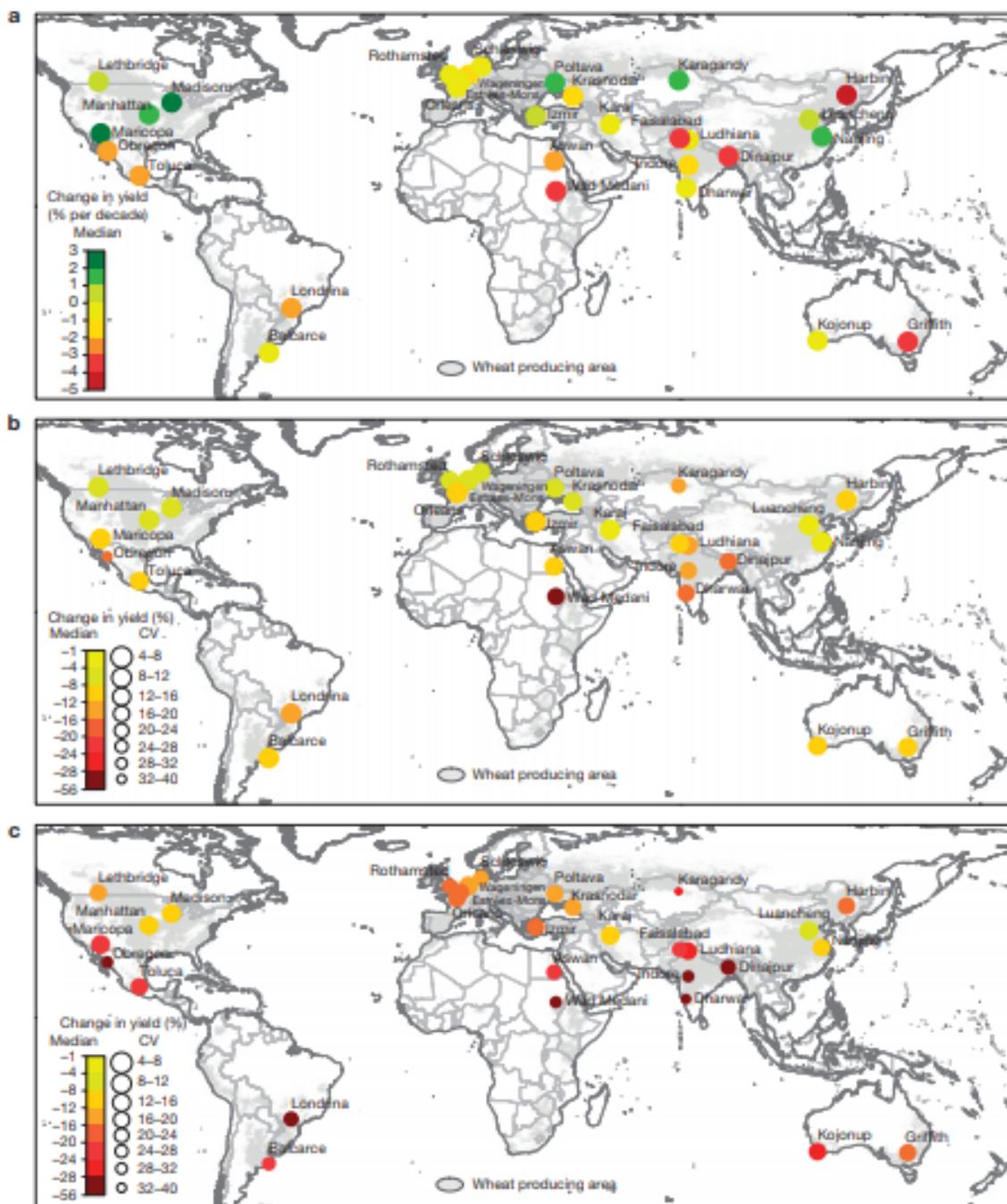
Existem quatro fatores que, ao mudarem no clima, afetarão a cultura do trigo, conseqüentemente, o uso de água pelas plantas. Esses fatores são: aumento de temperatura, aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), precipitação mais variável e variações na umidade do solo.

O aumento de temperatura é conhecido por diminuir a produtividade das culturas, especialmente em locais onde ultrapasse a faixa ideal. Em locais de latitudes médias e altas onde a baixas temperaturas é um limitante, as mudanças climáticas podem aumentar o rendimento do trigo (GORNALL et al., 2010), uma vez que ocorrerá o aumento da temperatura mínima e o risco de geada no período de antese pode ser minimizado (MARENGO; CAMARGO, 2008). O índice de risco de geada é determinado na frequência de ocorrência, no período crítico, de faixa de temperaturas mínimas absolutas entre os valores de 2 a -2, sendo que o período mais crítico é na floração (CUNHA et al., 1999).

Um estudo que analisou as tendências das anomalias das temperaturas máximas, mínimas e amplitude térmica de 27 estações meteorológicas da Região Sul do Brasil no período de 1960 – 2002, em escalas anual e estacional (verão e inverno), observou um aumento da temperatura mínima no ano, no verão e no inverno. No período de 1990-2002 houve o maior aumento da temperatura mínima para os estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul (MARENGO; CAMARGO, 2008). Também é observado que amplitude térmica diária, onda de frio e dias de geadas severas estão diminuindo significativamente (IPCC, 2001; IPCC, 2007; IPCC, 2013). Para a cultura do trigo pode ser favorável, uma vez que no Sul do Brasil um dos fatores que limita a cultura é a geada no final do ciclo, que pode ocasionar a perda da produção parcial ou total.

Já em latitudes baixas, há perda de produtividade porque a temperatura mais alta foi mais acentuada do que as latitudes altas, uma vez que tem temperaturas de referências mais altas, assim como mostra na cidade de Londrina no Paraná (Figura 127). Projeta-se que a produção global de trigo caia 6% a cada 1°C de aumento na temperatura, e se torne mais variável com o tempo e espaço (ASSENG et al., 2015). Os autores escolheram locais chave em regiões com características de usar o sistema irrigado para o trigo ou com altos índices de chuvas, verificou-se perdas de rendimento mediano em todos os locais em média ao longo de 30 com aumento de temperaturas (Figura 127).

Figura 127. a , Tendências de rendimento de grãos para 1981–2010 com base no rendimento médio de um conjunto de 30 modelos. Rendimento de grãos mediano relativo para aumentos de temperatura de +2 ° C ( b ) e +4 ° C ( c ) impostos no período de 1981 a 2010.



Fonte: Asseng et al., 2015.

Gornall et al. (2010) comentam que um aquecimento de 2°C nas latitudes médias pode aumentar a produção em trigo em quase 10%. Em contrapartida, em latitudes baixas a mesma escala de aumento de temperatura resulta em redução de rendimento em torno de 10%. No entanto, o aumento da temperatura resultará em uma fenologia acelerada que leva a um período

de crescimento mais curto e menos dias de uso da água da cultura dentro de uma estação de cultivo (ZHAO et al., 2017).

Devido ao aumento da temperatura e mudança temporal e espacial na precipitação, mudanças na taxa de evaporação e transpiração (YOO et al., 2012) e crescente escassez de água, os agricultores não apenas precisam usar a água disponível com mais sabedoria, mas também desenvolver opções alternativas para lidar com a escassez de água. A irrigação por déficit pode ser uma das opções para mitigar os impactos adversos da escassez de água na produção agrícola (JALIL; AKHTAR; AWAN, 2020).

Diferentes modelos na literatura são utilizados para a simulação de produtividade da água da cultura (WP) sob irrigação deficitária. O modelo do *AquaCrop* tem como diferencial o usuário que entra com os dados de clima, sendo assim, a modelagem é específica para uma região. Outrossim, o modelo leva em conta os processos envolvidos na produtividade das culturas em respostas a cenários de déficit do ponto de vista fisiológico como agrônomo. (RAES et al., 2009). Foi proposta a calibração do modelo *AquaCrop* para o trigo (*Triticum aestivum*) na região dos Campos Gerais no Sul do Brasil e obtiveram bons resultados (ROSA; DE SOUZA; TSUKAHARA, 2020). Greaves & Wang (2016) usaram o modelo *AquaCrop* para avaliar a eficácia das estratégias de gerenciamento de irrigação propostas. Eles usaram este modelo para a análise de desempenho do *AquaCrop* para milho sob irrigação total e deficitária em ambiente tropical e tiveram boas respostas. Mostra a adequação do modelo *AquaCrop* para simular o WP da cultura em diferentes condições climáticas.

Jalil et al (2020) propuseram um estudo com o modelo *AquaCrop* para a cultura do trigo calibrando e validando o modelo. Os autores modelaram diferentes cenários de escassez de água para avaliar e analisar os rendimentos. Também pode ser concluído a partir dos valores mais altos de eficiência do uso da água (EUA) e produtividade da água (PA) da irrigação convencional que menos água está sendo utilizada de forma benéfica no sistema de irrigação convencional e há grande potencial para melhorar a EUA. Destaca-se o potencial para a expansão da irrigação, adaptando as opções de otimização da irrigação para o trigo.

O impacto do aquecimento global na precipitação regional é difícil de prever devido às fortes dependências das mudanças na circulação atmosférica, embora haja uma confiança crescente nas projeções de um aumento geral na precipitação em altas latitudes, especialmente no inverno, e uma diminuição geral em muitas partes dos trópicos e sub-trópicos (IPCC, 2007).

A disponibilidade de água não é influenciada só pela precipitação. A elevação da demanda evaporativa em virtude do aumento da temperatura (KHALIL, 2013) podem aumentar a necessidade de irrigação nas lavouras globalmente entre 5 a 20%, ou possivelmente mais, por

volta de 2070 ou 2080 (FISCHER et al., 2007), sendo que as lavouras irrigadas produzem cerca de 40% da produção agrícola total, seus rendimentos são o dobro ou triplo se comparado as safras em sequeiro (FAO). No dia-a-dia são previstos eventos de precipitação mais intensa, mesmo em algumas regiões onde a precipitação média tende a diminuir (SOLOMON; QIN; MANNING, 2007). Contudo, não é interessante para a cultura, uma vez que as altas precipitações resultam em escoamento subsuperficial ou percolação e em solos descobertos podem ocasionar erosão.

Estudo realizado na região bacia hidrográfica do rio Ijuí (RS) para um cenário futuro A1B, referente ao período atual (1961 - 1990) e futuro (2011 - 2100) em modelos unidimensional SWAP para a simulação da demanda de água para fins de irrigação mostrou que no futuro a necessidade de irrigação será menor nas culturas analisadas - trigo, feijão, milho e soja- sendo observadas no período de 2041 – 2100 haverá maiores reduções na demanda por água para irrigação (SILVA et al., 2018). As demandas de irrigação podem variar muito de local a local, sendo importante os estudos de casos nas localidades.

Vários estudos procuram compreender os efeitos das mudanças climáticas na agricultura irrigada na forma de mudanças nas necessidades líquidas de irrigação, ou seja, a quantidade de água requerida pelas culturas. Isso se justifica em um contexto que o maior usuário de água doce do mundo é a agricultura irrigada (70%), sendo que em países em desenvolvimento chega-se a 95%. A nível global projetaram que até 2080 dois terços do aumento da necessidade de irrigação podem ser atribuídos ao aumento da temperatura e mudança nos padrões espacial e temporal de precipitação, todavia, o terço restante é justificado pelas estações de cultivo prolongadas em temperaturas e regiões subtropicais (FISCHER et al., 2007)

Um estudo de caso na bacia hidrográfica no Rio Jaguaribe, Recife, em um contexto de mudança climática, mostrou que a água para irrigação aumentará entre 8 e 9% em meados do século 21 usando projeções climáticas mensais, devido à diminuição na precipitação (11 a 18%) e aumentos de evapotranspiração (6,5 a 8%) (GONDIM et al., 2012). É muito importante entender que a precipitação pode alterar espacialmente e temporalmente com as mudanças climáticas. Thomas (2008) estudou a demanda de irrigação em toda a China para 2030, projetando aumentos e diminuição das demanda dependendo da região. O autor verificou que a alguns locais da China terá uma diminuição da evapotranspiração, no entanto, em outros locais mais seco no oeste da China podem ocorrer o aumento da demanda por irrigação.

A seca afetará a produtividade agrícola, em contrapartida, é necessário explorar mecanismos para aumentar a eficiência do uso da água dos sistemas agrícolas para tirar proveito

de um cenário futuro em que a água será um limitante (HATFIELD; DOLD, 2019). Plantas C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> respondem diferente ao nível da folha em EUA devido ao padrão distintos dependendo da via de carboxilação, ou seja, fotossíntese C<sub>3</sub>, fotossíntese C<sub>4</sub> e metabolismo do ácido crassuláceo (CAM). Há uma resposta diferente ao aumento de CO<sub>2</sub> entre as plantas de fotossíntese C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>. Para as plantas C<sub>3</sub> o aumento de CO<sub>2</sub> tem uma resposta positiva, uma vez que o CO<sub>2</sub> é um fator limitante devido ao funcionamento da via de carboxilação. Já as plantas C<sub>4</sub> mostram pouco efeito ao aumento do CO<sub>2</sub> (TAYLOR et al., 2010).

O enriquecimento atmosférico de CO<sub>2</sub> pode favorecer o crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que o CO<sub>2</sub> é componente suma importância no processo de fotossíntese. O aumento do CO<sub>2</sub> da atmosfera pode aumentar o rendimento das plantas, destacando-se as plantas com metabolismo fotossintético C<sub>3</sub>. Todavia, só será benéfico se o aumento da temperatura não reflita em estresse térmico para a planta (PRASAD; DJANAGUIRAMAN, 2014). O autor destaca que os agroecossistemas até podem ser benéficos, uma vez que o aumento da taxa de CO<sub>2</sub> influencia diretamente na fotossíntese e economia água no solo, gerando um maior rendimento para as culturas.(PRASAD; DJANAGUIRAMAN, 2014; STRECK, 2005). Em culturas C<sub>3</sub>, a duplicação do CO<sub>2</sub> atmosférico acima dos níveis atuais, foi previsto uma resposta em crescimento e área foliar em quase 30% sobre temperatura e disponibilidade de água ideal (KIMBALL, 2007).

Em estudo realizado na simulação de mudanças climáticas para Santa Maria para os próximos 100 anos foi observado que vai influenciar no balanço hídrico de água no solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho. Com o aumento de CO<sub>2</sub> e da temperatura de até 6°C, as culturas terão maior demanda hídrica, mesmo com o aumento da precipitação, como observado nos dados do IPCC. As culturas de verão serão as mais impactadas, do que a cultura do trigo.(STRECK; ALBERTO, 2006).

As interações de CO<sub>2</sub>, temperatura e regime de água são de suma importância para entender a EUA em um contexto de mudança climática (YOO et al., 2009). A eficiência do uso da água é definida como a quantidade de carbono assimilado como biomassa ou grão produzido por unidade de água utilizada pela cultura. As mudanças esperadas na concentração no CO<sub>2</sub> em um contexto de mudanças climáticas resultarão que a planta minimizará a transpiração, consequentemente, otimizando a eficiência do uso da água que está diretamente relacionada as mudanças de condutância estomática(HATFIELD; DOLD, 2019).

Rashid et al. (2019) afirmam que o uso de cobertura morta no solo em um cenário de mudanças climáticas tem a capacidade de reduzir a evaporação em 60%. Essa prática junto com a irrigação deficitária tem o potencial de otimizar a EUA na cultura do trigo, sem impactar a

produtividade da cultura na China na planície do Norte. Nesta região o trigo se mostra menos vulnerável as mudanças climáticas do que em outras partes do mundo. Em um estudo realizado na China avaliou a EUA para as culturas do milho (*Z. mays* L.), trigo de primavera(*Triticum aestivum* L.) e da batata (*Solanum tuberosum* L.), foi constatado que nos últimos 50 anos se teve um aumento, o qual foi atribuído ao aumento da temperatura e a diminuição na precipitação (XIAO et al., 2013).

Ainda ocorre a irrigação excessiva aplicada pelos agricultores no NCP em busca de altos rendimentos, particularmente para o trigo. Todavia, acaba resultando em uma baixa eficiência do uso da água devido as práticas de gestão de irrigação inadequadas. Só que como consequência se tem a diminuição de 20m nas águas subterrâneas em 30 anos e 10 m em 10 anos (IQBAL et al., 2014).

Mubeen et al. (2020) comentam que para a cultura do trigo em regiões semiáridas do Sul de Punjab, a água é fundamental para o ótimo desenvolvimento do trigo, a irrigação é um estratégia adaptativa para a cultura. Com a simulação de diferentes lâminas de irrigação consegue-se melhor eficiência do uso da água, e a safra se mantivesse com alta produtividade sob o aumento de CO<sub>2</sub> e suas consequências associadas no futuro.

Há muito que se preocupar com a forma como a eficiência do uso da água das culturas responde as mudanças climáticas. A maioria das pesquisas existentes enfatizou o impacto do fator climático único, mas prestou menos atenção ao efeito das medidas agronômicas aplicadas na cultura. Por exemplo, a utilização de cobertura morta minimiza a evaporação da água do solo, conseqüentemente, a planta terá mais água para processos como a transpiração (HATFIELD; DOLD, 2019). Em um estudo de caso a utilização de cobertura morta no trigo irrigado, reduziu o número de irrigação em 50% ,devido a conservação da umidade do solo como resultado da supressão da evaporação do solo (BALWINDER-SINGHA et al., 2016).

A irrigação suplementar garante altas produtividades, principalmente por evitar períodos de déficit hídrico (LOREGIAN et al., 2019). A cultura do trigo em locais que sofre de estresse hídrico, a cultura irrigada pode ter um aumento de 20% em produtividade. Ajuste da data de semeadura, que pode ser baseada em uma maior eficiência do uso da água e se obter um maior rendimento da cultura(AHMAD et al., 2015).

A escolha de data de semeadura sequeira a planta não deve sofrer com estresse hídrico no estágio inicial de crescimento, sendo assim, pode compensar a extensão da produção de biomassa e rendimento de grão. Para otimizar a produção, semeadura no momento adequado para a cultivar e de suma importância, levar a duração da maturidade e a estação de crescimento que são críticas. O conhecimento preciso da janela de semeadura de qualquer variedade

particular em um determinado local é fundamental para o alto rendimento de grão (ANDARZIAN et al., 2008, 2015). Com as mudanças climáticas a janela de semeadura pode sofrer alterações, sendo assim, e de suma importância a modelagem no cenário mais realista para que não se perda produtividade.

Andarzian et al (2011) simulou a produtividade do trigo em condições de pleno suprimento de água, assim como, com déficit hídrico na localidade do Sul do Irã que é caracterizado como um ambiente quente e seco. O modelo foi capaz de determinar a quantidade mínima de água necessária para suprir a demanda da planta e obter alta eficiência do uso da água para anos úmidos, normais e secos. Pesquisas assim como de Andarzian et al (2011) são importantes em locais de restrição hídrica e em locais que potencial de restrição hídrica. Uma vez que determinar a necessidade mínima de água para ótimo desenvolvimento da cultura. Quantificação da necessidade hídrica é importante no planejamento agrícola em qualquer região e fornece informações importantes para a toma de decisão de quando e quanto irrigar.

Avaliar a resposta de rendimento a diferentes aplicações de água em experimento de campo e, ou controlados e trabalhoso e caro. Conforme a limitação citada anterior, a modelagem pode ser uma ferramenta útil para estudar e desenvolver estratégias promissoras de irrigação (GEERTS; RAES, 2009). Como o modelo *AquaCrop* permite distinguir os processos de evaporação do solo e transpiração e dividir a produção agrícola em diferentes submodelos (GEERTS; RAES, 2009; RAES et al., 2009, 2018a) que pode ajudar a desenvolver a melhor eficiência do uso da água sob irrigação deficitária em um contexto de mudança do clima.

Algumas alterações do clima já são notadas no Paraná que afetam a cultura do trigo, onde foi proposto um novo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) para a cultura do trigo para a safra 2019/2020. As mudanças foram definidas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento em dezembro de 2019, visto que este trabalho levou em conta os fatores de temperatura, balanço hídrico e as possibilidades de geadas em cada município do Paraná. Os locais da data de semeadura de 21 de março já foram alterados para 1 de abril (MAPA, 2019). As variáveis de manejo no campo podem contrabalancear o efeito das mudanças climáticas

## 9 CONCLUSÃO

Devido aos múltiplos efeitos socioeconômicos e ecológicos da irrigação e para fornecer informações sobre possíveis ameaças à segurança alimentar global, é necessária uma avaliação dos impactos da mudança climática global prevista na demanda e disponibilidade de água para irrigação para a cultura do trigo. A magnitude e a direção dos impactos das mudanças climáticas sobre a produção agrícola na cultura do trigo são complexos e em muitos detalhes incertos. Há muito que se preocupar com a forma como a eficiência do uso da água no trigo responde as mudanças climáticas.

Nesta simulação, foi observado que as mudanças climáticas para a cultura do trigo favorecerão a cultura. Para os diferentes cenários, a lâmina de irrigação mais indicada foi a lâmina de 50%. As datas mais propícias para a semeadura no Sul do Brasil foram 22/04, 29/04 e 06/05 para maior eficiência do uso da água e produtividade. Verifica-se uma tendência de aumento de janela de semeadura quando se analisa por localidade, uma vez que foram simuladas datas de semeaduras que não abrangem o atual zoneamento climático.

O cenário RCP 8.5 2070 se mostra o menos favorável para a cultura de sequeiro no Paraná, considerando as datas de semeadura. Em contrapartida, foi o cenário que apresentou maior produção, chegando a produzir até 29% a mais que o cenário atual. O cenário RCP 4.5 2070 obteve um aumento de até 17%. A maior eficiência do uso da água se obteve no cenário RCP 8.5 na data de semeadura do dia 29/04, em que se obteve uma eficiência de uso da água superior a  $14 \text{ kg.m}^{-3}$ , que pode ser justificada pelo aumento da produtividade da cultura.

A escolha combinada de data de semeadura e lâmina ideal resultou em uma maior eficiência do uso da água. Em um contexto que a falta de água pode afetar a agricultura e necessário criar estratégias para otimizar o uso da água. Em alguns locais, como o Norte do Paraná, ocorreu a necessidade do aumento de água para fins de irrigação. Em contrapartida, no Rio Grande do Sul, no cenário RCP 8.5 2070, verificou-se um menor consumo de água pela agricultura irrigada.

O trigo se mostra uma cultura resiliente às mudanças do clima. As medidas agronômicas podem amenizar os impactos das mudanças climáticas e otimizar a produção. Os dados gerados neste trabalho podem auxiliar o manejo da cultura em um contexto de mudança climática, sem que o produtor perda produtividade por hectares. A máxima produtividade permite que a fronteira agrícola não seja expandida.

Por meio de simulações computacionais conseguimos projetar diferentes cenários e nos adaptarmos as mudanças que o clima vem sofrendo. As diferentes simulações fornecem

informações de como melhorar o manejo da cultura e otimizar os recursos, principalmente o recurso hídrico que é fundamental para a vida.

## REFERÊNCIAS

- AHMAD, A. et al. Impact of climate change on weeds in the rice-wheat cropping system. In: **Current Science**. p. 219–258.
- AHMED, M. et al. Novel multimodel ensemble approach to evaluate the sole effect of elevated CO<sub>2</sub> on winter wheat productivity. n. February, p. 1–15, 2019.
- AIDAM, P. W. The impact of water-pricing policy on the demand for water resources by farmers in Ghana. **Agricultural Water Management**, v. 158, p. 10–16, 2015.
- FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. n. 56, 2006.
- ANDARZIAN, B. et al. WheatPot: A simple model for spring wheat yield potential using monthly weather data. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 4, p. 487–495, 2008.
- ANDARZIAN, B. et al. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 100, n. 1, p. 1–8, 2011.
- ANDARZIAN, B. et al. Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 2, p. 189–199, 2015.
- ASSENG, S. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, n. June, p. 627–632, 2013.
- ASSENG, S. et al. Rising temperatures reduce global wheat production. **Nature Climate Change**, v. 5, n. February, p. 143–147, 2015.
- BALWINDER-SINGHA et al. Evaluation of the effects of mulch on optimum sowing date and irrigation management of zero till wheat in central Punjab, India using APSIM. **Field Crops Research**, v. 197, p. 83–96, 2016.
- BHATTACHARYA, A. Global Climate Change and Its Impact on Agriculture. In: **Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants**. p. 1–50.
- BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v. 14, n. 3, p. 369-374, 1990.
- BULATEWICZ, T. et al. Accessible integration of agriculture, groundwater, and economic models using the Open Modeling Interface (OpenMI): Methodology and initial results. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 3, p. 521–534, 2010.
- CONAB, C. N. de A. A cultura do Trigo: Análise dos custos de produção e da rentabilidade nos anos-safras 2009 a 2017. **Compêndio de estudos Conab**, v. 15, p. 51, 2018.
- CUNHA, G. R. Da et al. Zoneamento Agrícola E Época De Semeadura Para Trigo No Rio Grande Do Sul. In **Embrapa Trigo-Artigo em anais de congresso**. In: **REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE TRIGO**, 18., p. 636–641, 1999.

DE SOUZA, J. L. M. et al. Calibration and validation of the aquacrop model to estimate maize production in campos gerais, paraná state, brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia** , v. 35, n. 2, p. 243–253, 2020.

DISSANAYAKE, S.; MAHADEVAN, R.; ASAFU-ADJAYE, J. Is there a role for trade liberalization in mitigating the impacts of climate change on agriculture? **Economic Analysis and Policy**, v. 62, p. 307–324, 2019.

DJAMAN, K. et al. Evaluation of FAO-56 Penman-Monteith Model with Limited Data and the Valiantzas Models for Estimating Grass-Reference Evapotranspiration in Sahelian Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 11, p. 04016044, 2016.

DJAMAN, K. et al. Impact of Air Temperature and Relative Humidity Measured over Rice and Grass Canopies on Penman-Monteith Reference Evapotranspiration Estimates. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 145, n. 1, p. 06018008, 2019.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield Response to water. In: **Food and Agriculture Organization of the United Nations.**, 1979.

FAO. **Water for Sustainable Food and Agriculture.**

FERRAGINA, E. The Water Issue in the Mediterranean. **Environment and Sustainable Development in the Mediterranean**, p. 53–77, 2010.

FISCHER, G. et al. Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 74, n. 7, p. 1083–1107, 2007.

FOSTER, T. et al. AquaCrop-OS: An open source version of FAO’s crop water productivity model. **Agricultural Water Management**, v. 181, p. 18–22, 2017.

FRANKS, P. J. et al. Increasing water-use efficiency directly through genetic manipulation of stomatal density. **New Phytologist**, v. 207, n. 1, p. 188–195, 2015.

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 9, p. 1275–1284, 2009.

GIRARD, C. et al. An interdisciplinary modelling framework for selecting adaptation measures at the river basin scale in a global change scenario. **Environmental Modelling and Software**, v. 69, p. 42–54, 2015.

GONDIM, R. S. et al. Climate Change Impacts on Irrigation Water Needs in the jaguaribe River Basin. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 2, p. 355–365, 2012.

GORNALL, J. et al. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 365, p. 2973–2989, 2010.

GREAVES, G. E.; WANG, Y. M. Assessment of fao aquacrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. **Water (Switzerland)**, v. 8, n. 12, 2016.

GU, L. et al. The contribution of internal climate variability to climate change impacts on

droughts. **Science of The Total Environment**, v. 684, p. 229–246, 2019.

HARMSSEN, E. W. et al. Seasonal climate change impacts on evapotranspiration, precipitation deficit and crop yield in Puerto Rico. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 7, p. 1085–1095, 2009.

HASANUZZAMAN, M. **Agronomic crops**. v. 2

HATFIELD, J. L.; DOLD, C. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. February, p. 1–14, 2019.

HESS, A.; WADZUK, B.; WELKER, A. Predictive Evapotranspiration Equations in Rain Gardens. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 145, n. 7, p. 04019010, 2019.

IGLESIAS, A.; GARROTE, L. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. **Agricultural Water Management**, v. 155, p. 113–124, 2015.

IAT. Clima - Estado do Paraná. Disponível em: <[http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-07/mapa\\_climas\\_a3.pdf](http://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mapa_climas_a3.pdf)>. Acessado em : 23 nov. 2020.

IBGE. Banco de Dados de Informações Ambientais. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>>. Acesso em: 23 nov. 2020.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014. Synthesis report. Versión inglés.**

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 03 jan 2021.

IQBAL, M. A. et al. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. **Agricultural Water Management**, v. 135, p. 61–72, 2014.

JALIL, A.; AKHTAR, F.; AWAN, U. K. Evaluation of the AquaCrop model for winter wheat under different irrigation optimization strategies at the downstream Kabul River Basin of Afghanistan. **Agricultural Water Management**, v. 240, n. March, p. 106321, 2020.

KEREMANE, G. B.; MCKAY, J. Successful wastewater reuse scheme and sustainable development : a case study in Adelaide Overview of Virginia Pipeline Scheme. v. 21, p. 83–91, 2006.

KHALIL, A. A. Effect of climate change on evapotranspiration in Egypt. **Researcher**, v. 55, n. 11, p. 7–12, 2013.

KIMBALL, B. A. Global Change and Water Resources. In: **Irrigation of Agricultural Crops Monograph**. p. 627–653.

KNOX, J. W.; KAY, M. G.; WEATHERHEAD, E. K. Water regulation, crop production, and agricultural water management—Understanding farmer perspectives on irrigation efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 108, p. 3–8, 2012.

KÖPPEN, W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. *Petermanns Mitt*, v. 64, pp. 193-203, 1918.

LEE, L. Y.; ANCEV, T.; VERVOORT, W. Evaluation of environmental policies targeting irrigated agriculture: The case of the Mooki catchment, Australia. **Agricultural Water Management**, v. 109, p. 107–116, 2012.

LONG, S. P. et al. RISING ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE: Plants FACE the Future. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, n. 1, p. 591–628, 2004.

LOREGIAN, M. V. et al. DESEMPENHO PRODUTIVO DO TRIGO EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DE SEMEADURA E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO SUPLEMENTAR. **Revista Cultura Agrônômica**, v. 28, p. 299–315, 2019.

MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. **International Journal of Climatology**, v. 28, n. March 2008, p. 893–904, 2008.

McCloud, D.E., 1955. Water requirements of field crops in Florida as influenced by climate. **Proc. Soil Sci. Soc. Fla.** 15, 165–172.

MINUZZI, R. B.; LOPES, F. Z. Desempenho agrônômico do milho em diferentes cenários climáticos no Centro-Oeste do Brasil Agronomic performance of maize in different climatic scenarios in the Central West of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 734–740, 2015.

MORENO, J.A. Clima do Rio Grande do Sul. Seção de Geografia. Secretaria da Agricultura. Porto Alegre, 1961. 42p

MUBEEN, M. et al. Evaluating the climate change impact on water use efficiency of cotton-wheat in semi-arid conditions using DSSAT model. **Journal of Water and Climate Change**, p. 1–15, 2020.

MURGUE, C.; THEROND, O.; LEENHARDT, D. Toward integrated water and agricultural land management: Participatory design of agricultural landscapes. **Land Use Policy**, v. 45, p. 52–63, 2015.

NASCIMENTO, A. . et al. Effects of irrigation uniformity on yield response and production economics of maize in a semiarid zone. **Agricultural Water Management**, v. 211, p. 178–189, 2019.

PEREIRA, H.; FIGUEIRA, J. R.; MARQUES, R. C. Multiobjective Irrigation Model : Alqueva River Basin Application. v. 145, n. 1, 2020.

PIRMORADIAN, N.; DAVATGAR, N. Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 97–106, 2019.

- PRASAD, P. V. V.; DJANAGUIRAMAN, M. Response of floret fertility and individual grain weight of wheat to high temperature stress: Sensitive stages and thresholds for temperature and duration. **Functional Plant Biology**, v. 41, n. 12, p. 1261–1269, 2014.
- 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.
- RAES, D. et al. Chapter 3: Calculation Procedures. **Aquacrop Reference Manual verion 6.0**, n. May, p. 141, 2018. a.
- RAES, D. et al. AquaCrop: Refrence Manual Annexes. **Fao**, n. May, p. 87, 2018. b.
- RASHID, M. A. et al. Climate change is expected to increase yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, v. 222, p. 193–203, 2019.
- RESHMIDEVI, T. V. et al. Estimation of the climate change impact on a catchment water balance using an ensemble of GCMs. **Journal of Hydrology** , v. 556, p. 1192–1204, 2018.
- RODRIGUEZ, A. V. C.; OBER, E. S. AquaCropR: Crop growth model for R. **Agronomy**, v. 9, n. 7, p. 0–9, 2019.
- ROSA, S. L. K.; DE SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y. Performance of the AquaCrop model for the wheat crop in the subtropical zone in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 55, 2020.
- SEUNG-HWAN, Y. et al. Climate change impacts on water storage requirements of an agricultural reservoir considering changes in land use and rice growing season in Korea. **Agricultural Water Management**, v. 117, p. 43–54, 2013.
- SHAHID, S. Impact of climate change on irrigation water demand of dry season Boro rice in northwest Bangladesh. **Climatic Change**, v. 105, n. 3–4, p. 433–453, 2011.
- SHARMA, V. et al. Large-Scale Spatial and Temporal Variability in Evapotranspiration, Crop Water-Use Efficiency, and Evapotranspiration Water-Use Efficiency of Irrigated and Rainfed Maize and Soybean. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 3, p. 04015063, 2016.
- SILVA, V. de P. R. Da et al. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Motopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, v. 48, n. 1, p. 1–8, 2018. a.
- SILVA, K. K. et al. Future irrigation water requirements in the Ijuí River basin , RS Demandas futuras de água para irrigação na bacia hidrográfica do rio Ijuí , RS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 57–62, 2018. b.
- SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M. A report accepted by Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change but not approved in detail. **Technical Summary TS.1**, p. 20–87, 2007.
- STEDUTO, P. et al. Crop yield response to water. **FAO Irrigation and Drainage Paper No.66**, n. January, p. 505, 2012.

STRECK, N. A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 730–740, 2005.

STRECK, N. A.; ALBERTO, C. M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 424–433, 2006.

TAYLOR, S. H. et al. A phylogenetically controlled comparison of leaf nitrogen content in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> grasses. **New Phytologist**, v. 185, p. 780–791, 2010.

TERRY A. HOWELL; ROBERT L. MCCORMICK; CLAUDE J. PHENE. Design and Installation of Large Weighing Lysimeters. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 1, p. 106–112, 1985.

THOMAS, A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. **Global and Planetary Change**, v. 60, n. 3–4, p. 306–326, 2008.

TRAJKOVIC, S. Temperature-Based Approaches for Estimating Reference Evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 4, p. 316–323, 2005.

VARGA, B. et al. Effects of the Elevated Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration on the Water Use Efficiency of Winter Wheat. **Procedia Environmental Sciences**, v. 29, n. Agri, p. 180–181, 2015.

VENABLES, W. N.; SMITH, D. M. An Introduction to R. **An Introduction to R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics**, , p. 99, 2020.

VU, S. H.; WATANABE, H.; TAKAGI, K. Application of FAO-56 for evaluating evapotranspiration in simulation of pollutant runoff from paddy rice field in Japan. **Agricultural Water Management**, v. 76, n. 3, p. 195–210, 2005.

WANG al. **The Effects of Mulch and Nitrogen Fertilizer on the Soil Environment of Crop Plants**. 1. ed.: Elsevier Inc., 2019. v. 153 Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2018.08.003>>

WATSON, R. T. et al. Climate Change 1995: The IPCC Second Assessment Report Scientific-Technical Analyses of Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change Contribution of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, forming part of the IPCC Seco. 1995.

WATTO, M. A.; MUGERA, A. W. Measuring groundwater irrigation efficiency in Pakistan: A DEA approach using the sub-vector and slack-based models. **57th Annual AARES Conference**, , n. 2007, p. 4–9, 2013.

WWAP. **The united nations world water development report 2018: nature-based solutions for water**.

WORDCLIM. Maps, graphs, tables, and data of the global climate. Disponível em: <[www.wordclim.org/](http://www.wordclim.org/)>. Acessado em: 02/01/2021.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

XIAO, G. et al. Impact of climate change on water use efficiency by wheat, potato and corn in semiarid areas of China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 181, p. 108–114, 2013.

XU, M. The optimal atmospheric CO<sub>2</sub> concentration for the growth of winter wheat (*Triticum aestivum*). **Journal of Plant Physiology**, v. 184, p. 89–97, 2015.

YIGEZU, Y. A. et al. Implications of a shift in irrigation technology on resource use efficiency: A Syrian case. **Agricultural Systems**, v. 118, p. 14–22, 2013.

YOO, C. Y. et al. Regulation of transpiration to improve crop water use. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 28, n. 6, p. 410–431, 2009.

YOO, S. et al. Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea. **Agricultural Water Management**, v. 112, p. 33–42, 2012.

ZHANG, H. et al. Impacts of future climate change on water resource availability of eastern Australia: A case study of the Manning River basin. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 573, n. October 2018, p. 49–59, 2019. a.

ZHANG, L. et al. Determining the influence of irrigation efficiency improvement on water use and consumption by conceptually considering hydrological pathways. **Agricultural Water Management**, v. 213, n. June 2018, p. 674–681, 2019. b.

ZHAO, C. et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 114, n. 35, p. 9326–9331, 2017.

## APÊNDICE A – FUNÇÃO COEFICIENTE DA CULTURA

Quadro 1. Função Coeficiente da cultura

```

#kc - coeficiente da cultura
#variaveis
#kcini - fase inicial
# n - numero de dias da fase inicial
#kc - kc medio
#ni - numero de dias da fase de crescimento
#nc - numero de dias da fase de pleno desenvolvimento
#kcend - kc final
# nf - numero de dias da fase de maturidade

kc <- function(kcini, n, kc, ni, nc, kcend, nf){
  # ciclo inicial em dias e kc ini
  kcini<-rep(kcini,n)
  # curva crescendo

  kcs <- c()
  m = 0
  for ( j in 1:ni){
    m = m + 1
    kcs[j] <- (kcini+((kc - kcini)/ni)*m)
  }

  kc <-rep(kc,nc)

  l = 0
  kcc <- c()
  for (i in 1:nf){
    l = l + 1
    kcc[i] <- (kc+((kcend - kc)/nf)*l)
  }

  a <- c()
  a<-c(kcini, kcs, kc,kcc)
  return(list(kc = a,
             kcs))
}

```

## Quadro 2. Função Coeficiente da cultura

```
kc <- kc(kcini=0.4, n= 15, kc=1.20, ni=35, nc = 40, kcentd=0.25, nf=35)

#salvar em png o gráfico
png("meugrafico%02d.png", width = 712, height = 300)
plot(kc$kc, bty="l", tcl=0.4,ann=FALSE)
mtext(expression(bold('Coeficiente de Cultivo')), 2, cex=1.3, line = 2.5)
mtext(expression(bold('Dias')), 1, cex=1.3,line=2.5 )
legend("topright", legend="Coeficiente de Cultivo",
       lty=1, col=2, bty="n",cex=0.7)
rect(50,1.23,90,1)
#text(20,40,"texto")
lines(kc$kc, lwd = 3, col = "red")
dev.off()
```

## APÊNDICE B – FUNÇÃO BALANÇO HÍDRICO

Quadro 3. Função Balanço Hídrico

```

bh <- function(z, f, ks) {
  ##Balanço hídrico
  ## Z = criar uma coluna com o valor ou usar um unico?
  #z <- 0.30

  # novo de capacidade de campo
  #cc <-0.23
  #novo de ponto de murcha permanente

  #pmp <- 0.18

  #fator de planta
  #f <- 0.60

  #ks <- 1
  #kc <- 1.05
  #novo calcular o ks
  #CTA <- 1000*(cc-pmp)*z
  #LAA<-CTA-kc
  #Ks = ln(LAA+1)/ln(CTA+1)

  # calcular a primeira linha
  CTA <- 1000*(0.23-0.18)*z
  CRA <- 1000*(0.23-0.18)*z*f

  #declarar vetores
  retfim <- c()
  retini <- c()
  ETC <- c()
  irrig <- c()
  retfimc <- c()
  bh <- list()
  databh <- c()
  pe <- c()

  retini[1] = CRA

```

#### Quadro 4. Função Balanço Hídrico

```

# primeira linha
retini[1] = CRA
irrig[1] <- 0
ETC[1] <- ks*kc$kc[1]*novo$ETo[1]
retfim[1] = retini - novo$pre[1] + ETC[1]
pe[1] <- -(novo$pre[1] - retini - ETC[1]) # novvoo
if(retfim >= CRA){
  retfim = 0}

i = 0

#linha um do BH
for ( i in 1:124){
  i= i+1
  retini[i] <- retfim[i-1]
  ETC[i] <- ks*kc$kc[i]*novo$ETo[i]
  retfim[i] <- retini[i] - novo$pre[i] + ETC[i]
  retfimc[i] <- retfim[i]
  irrig[i] <- retfim[i]

  #novo
  if (retfim[i] <= 0){
    retfim[i]= 0}

  if (retfim[i] >= CRA){
    retfim[i]= 0}

  if(irrig[i] <= CRA){
    irrig[i] = 0}

  pe[i] <- novo$pre[i] + irrig[i] - retini[i] - ETC[i]

  if(pe[i]<=0 ){
    pe[i] = 0}

  #bh <- data.frame(ETC, retini,retfimc,retfim, irrig, pe)
  #bh}

```

## Quadro 5. Função Balanço Hídrico

```
ETC.soma <- sum(ETC)
Precipitacao.mm <- sum(novo$pre)
perco <- (sum(pe)*100)/Precipitacao.mm
irriga <- (sum(irrig))
Precipitacao.Efetiva.mm <- Precipitacao.mm - sum(pe)
Precipitacao.Total.mm <- sum(irrig) + Precipitacao.Efetiva.mm

return(list("#bh" = bh,
  "ETC" = ETC,
  "retini" = retini,
  "retfimc" = retfimc,
  "retfim" = retfim,
  "irrig" = irrig,
  "pe" = pe,
  "ETC.soma" = ETC.soma,
  "Precipitacao.mm" = Precipitacao.mm,
  "perco" = perco,
  "irriga" = irriga,
  "Precipitacao.Efetiva.mm" = Precipitacao.Efetiva.mm,
  "Precipitacao.Total.mm" = Precipitacao.Total.mm))
}
```

## APÊNDICE C – FUNÇÃO BALANÇO HÍDRICO COM LOOP PARA 914 PONTOS

Quadro 6. Função Balanço Hídrico com loop para 914 pontos

```

TI <- Sys.time()
## Corte da linhas
setwd("D:/Fabio - xavier dados clima/output")

#vetor
Precipita <- c()
ETC <- c()
PE <- c()
Pt <- c()
irriga <- c()
tab <- c()

#vetor
Precipita <- list()
ETC <- c()
Pe <- c()
Pt <- c()
irriga <- c()

#vetor
Precipita.ponto <- c()
ETC.ponto <- c()
PE.ponto <- c()
Pt.ponto <- c()
irriga.ponto <- c()

#novo <- list()
#BH <- list()

for (i in 1:914){
  #setwd("C:/Users/Fernanda/Desktop/dados_processados")
  dados <- read.csv(paste("all_", as.character(i), ".csv", sep = ""))
  #print (dados)
  #}
  dados$TIMESTAMP <- as.Date(dados$TIMESTAMP)
  novo <- list()
  BH <- list()
}

```

### Quadro 7. Função Balanço Hídrico com loop para 914 pontos

```

x = 1984 # começa um ano antes, e tem que ir até 2015
for (j in 1:30){
  x = x + 1
  #print(x)
  data.inicial <- as.Date(paste0("05/08/",x), "%d/%m/%Y")
  ##print(data.inicial)
  data.final <- as.Date(paste0("12/12/",x), "%d/%m/%Y")
  novo <- subset(dados, TIMESTAMP >= data.inicial & TIMESTAMP <=
data.final)
  novo<-data.frame(novo)
  BH[[j]] <- bh(z = 0.30, f = 0.60, ks= 1)
}
BH

#print(BH)B
#write.table(BH, file="dados.txt", row.names= F, dec=',', sep=';',
quote=F)
#calcula para os anos
Precipita <- c()
#valor dos 30 anos
for (m in 1:30) {
  Precipita[[m]] <- mean(BH[[m]]$Precipitacao.mm)
  #print(Precipita[[m]])
  ETC[[m]] <- mean(BH[[m]]$ETC.soma)
  print(ETC[[m]])
  Pe[[m]] <- mean(BH[[m]]$Precipitacao.Efetiva.mm)
  Pt[[m]] <- mean(BH[[m]]$Precipitacao.Total.mm)
  irriga[[m]] <- mean(BH[[m]]$irriga)}

#Loop dos pontos
Precipita.ponto[i] <- mean(Precipita)
#print(Precipita.ponto[i])
#saber a media da evapotranspiração diaria
ETC.ponto[i] <- mean(ETC)/125
PE.ponto[i] <- mean(Pe)
Pt.ponto[i] <- mean(Pt)
irriga.ponto[i] <- mean(irriga)

```

Quadro 8. Função Balanço Hídrico com loop para 914 pontos

```
return(list("BH" = BH,
           "Precipita.ponto" = Precipita.ponto,
           "ETC.ponto" = ETC.ponto,
           "PE.ponto" = PE.ponto,
           "Pt.ponto" = Pt.ponto,
           "irriga.ponto" = irriga.ponto))

TF <- Sys.time()
TT <- (TF - TI)
print(c('Total total time was', TT))
#}

coord<- read.csv("C:/Users/Fernanda/Desktop/coordenadas_regiao_sul.csv",
sep=";")
tab<-data.frame(coord$Latitude, coord$Longitude, coord$Ponto, PE.ponto,
irriga.ponto, ETC.ponto, Precipita.ponto)
tab

PATH <- "D:/mapas_dissertação/trigo_dados/dados_finais/"
write.csv(tab,
          paste0(PATH,
                 "trigo_i",
                 ".csv"),
          row.names = FALSE)
```

## APÊNDICE D – TABELAS ESTATÍSTICAS.

Tabela 6. Eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) para o cenário RCP 4.5 2050.

	Lâminas de irrigação					Média	
	0	50	75	95	100		
Data de semeadura	11/06	9,76	10,12	9,53	9,00	8,94	9,47 kl
	18/03	10,10	10,42	9,85	9,85	9,28	9,80 j
	25/03	10,48	10,71	10,20	9,73	9,65	10,15 h
	01/04	11,02	11,06	10,58	10,12	10,03	10,56 g
	08/04	11,51	11,39	10,94	10,48	10,39	10,94 e
	15/04	11,85	11,72	11,32	10,84	10,72	11,29 bc
	<b>22/04</b>	<b>12,05</b>	<b>11,88</b>	<b>11,43</b>	<b>11,01</b>	<b>10,88</b>	<b>11,45 a</b>
	<b>29/04</b>	<b>12,11</b>	<b>11,89</b>	<b>11,49</b>	<b>11,04</b>	<b>10,91</b>	<b>11,49 a</b>
	<b>06/05</b>	<b>12,03</b>	<b>11,80</b>	<b>11,36</b>	<b>10,96</b>	<b>10,83</b>	<b>11,40 ab</b>
	13/05	11,79	11,54	11,15	10,79	10,67	11,19 cd
	20/05	11,70	11,43	11,02	10,70	10,58	11,09 d
	27/05	11,48	11,24	10,82	10,50	10,39	10,89 e
	03/06	11,25	11,08	10,64	10,32	10,22	10,70 f
	10/06	10,93	10,83	10,45	10,13	10,03	10,47 g
	17/06	10,57	10,56	10,18	9,91	9,82	10,21 h
	24/06	10,25	10,41	9,98	9,71	9,62	9,99 i
	01/07	9,90	10,19	9,82	9,48	9,39	9,76 j
	08/07	9,73	10,08	9,67	9,29	9,22	9,60 k
	15/07	9,46	9,90	9,46	9,09	9,03	9,39 lm
	22/07	9,33	9,85	9,39	8,98	8,91	9,29 mn
29/07	9,24	9,77	9,30	8,86	8,79	9,19 no	
05/08	9,27	9,70	9,23	8,81	8,71	9,14 o	
Média	10,72 b	10,80 a	10,35 c	9,96 d	9,86 e		

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Tabela 7. Eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 4.5 2070.

	Lâminas de irrigação					Média	
	0	50	75	95	100		
Data de semeadura	11/06	9,59	10,15	9,54	9,00	8,93	9,44 k
	18/03	10,03	10,47	9,89	9,37	9,31	9,81 i
	25/03	10,47	10,79	10,26	9,77	9,70	10,20 g
	01/04	11,04	11,15	10,67	10,19	10,10	10,63 f
	08/04	11,61	11,51	11,06	10,58	10,48	11,05 d
	15/04	12,01	11,89	11,47	10,97	10,85	11,44 b
	<b>22/04</b>	<b>12,27</b>	<b>12,10</b>	<b>11,65</b>	<b>11,21</b>	<b>11,08</b>	<b>11,66 a</b>
	<b>29/04</b>	<b>12,38</b>	<b>12,17</b>	<b>11,75</b>	<b>11,29</b>	<b>11,15</b>	<b>11,75 a</b>
	<b>06/05</b>	<b>12,33</b>	<b>12,10</b>	<b>11,65</b>	<b>11,23</b>	<b>11,10</b>	<b>11,69 a</b>
	13/05	12,12	11,87	11,47	11,10	10,97	11,51 b
	20/05	12,03	11,77	11,34	11,00	10,87	11,40 b
	27/05	11,79	11,56	11,13	10,80	10,68	11,19 c
	03/06	11,55	11,41	10,96	10,62	10,51	11,01 d
	10/06	11,23	11,17	10,77	10,41	10,31	10,78 e
	17/06	10,87	10,90	10,49	10,19	10,10	10,51 f
	24/06	10,53	10,74	10,30	9,98	9,89	10,29 g
	01/07	10,18	10,52	10,12	9,73	9,64	10,04 h
	08/07	9,95	10,34	9,90	9,50	9,42	9,82 i
	15/07	9,64	10,11	9,65	9,27	9,20	9,57 j
	22/07	9,43	10,01	9,53	9,11	9,04	9,42 k
29/07	9,28	9,88	9,40	8,97	8,90	9,28 l	
05/08	9,27	9,78	9,31	8,89	8,80	9,21 l	
Média	10,91 b	11,04 a	10,58 c	10,17 d	10,07 e		

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 8. Eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 8.5 2050.

	Lâminas de irrigação					Média	
	0	50	75	95	100		
Data de semeadura	11/06	9,71	10,27	9,11	9,11	9,04	9,45 lm
	18/03	10,14	10,58	10,00	9,48	9,41	9,92 j
	25/03	10,58	10,91	10,38	9,88	9,80	10,31 h
	01/04	11,17	11,27	10,79	10,29	10,20	10,75 g
	08/04	11,75	11,64	11,19	10,69	10,59	11,17 e
	15/04	12,16	12,03	11,61	11,07	10,96	11,57 c
	<b>22/04</b>	<b>12,45</b>	<b>12,26</b>	<b>11,79</b>	<b>11,32</b>	<b>11,18</b>	<b>11,80 ab</b>
	<b>29/04</b>	<b>12,59</b>	<b>12,34</b>	<b>11,90</b>	<b>11,41</b>	<b>11,27</b>	<b>11,90 a</b>
	<b>06/05</b>	<b>12,56</b>	<b>12,28</b>	<b>11,81</b>	<b>11,36</b>	<b>11,22</b>	<b>11,84 a</b>
	13/05	12,35	12,05	11,63	11,24	11,10	11,67 bc
	20/05	12,25	11,95	11,50	11,15	11,01	11,57 c
	27/05	11,98	11,74	11,28	10,94	10,82	11,35 d
	03/06	11,71	11,57	11,10	10,76	10,64	11,16 e
	10/06	11,37	11,31	10,90	10,54	10,43	10,91 f
	17/06	11,00	11,04	10,62	10,31	10,22	10,64 g
	24/06	10,63	10,89	10,42	10,09	10,00	10,41 h
	01/07	10,24	10,65	10,23	9,83	9,74	10,14 i
	08/07	10,00	10,47	10,01	9,60	9,52	9,92 j
	15/07	9,68	10,24	9,76	9,37	9,30	9,67 k
	22/07	9,47	10,13	9,63	9,21	9,14	9,52 l
29/07	9,34	10,00	9,49	9,07	8,99	9,38 mn	
05/08	9,33	9,89	9,39	8,97	8,89	9,29 n	
Média	11,02 b	11,16 a	10,66 c	10,26 d	10,16 e		

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 9. Eficiência do uso da água (I+P) ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 8.5 2070.

	Lâminas de irrigação					Média	
	0	50	75	95	100		
Data de semeadura	11/06	9,86	10,74	10,13	9,59	9,53	9,97 m
	18/03	10,36	11,05	10,49	9,98	9,91	10,36 k
	25/03	10,82	11,37	10,84	10,37	10,30	10,74 ij
	01/04	11,47	11,74	11,28	10,79	10,71	11,20 h
	08/04	12,16	12,14	11,70	11,24	11,14	11,68 f
	15/04	12,68	12,57	12,16	11,66	11,54	12,13 d
	22/04	13,06	12,88	12,42	11,96	11,83	12,43 c
	<b>29/04</b>	<b>13,29</b>	<b>13,05</b>	<b>12,61</b>	<b>12,12</b>	<b>11,98</b>	<b>12,61 a</b>
	<b>06/05</b>	<b>13,31</b>	<b>13,03</b>	<b>12,55</b>	<b>12,10</b>	<b>11,96</b>	<b>12,59 ab</b>
	13/05	13,15	12,84	12,42	12,01	11,88	12,46 bc
	20/05	13,09	12,78	12,32	11,95	11,81	12,39 c
	27/05	12,80	12,57	12,10	11,75	11,62	12,17 d
	03/06	12,50	12,41	11,91	11,55	11,44	11,96 e
	10/06	12,13	12,14	11,71	11,33	11,23	11,71 f
	17/06	11,71	11,86	11,42	11,10	11,00	11,42 g
	24/06	11,27	11,69	11,21	10,88	10,78	11,16 h
	01/07	10,83	11,45	11,02	10,61	10,52	10,89 i
	08/07	10,57	11,26	10,78	10,36	10,28	10,65 j
	15/07	10,23	11,00	10,50	10,10	10,02	10,37 k
	22/07	9,96	10,86	10,34	9,90	9,84	10,18 l
29/07	9,79	10,72	10,21	9,75	9,68	10,03 m	
05/08	9,76	10,60	10,08	9,64	9,55	9,93 m	
Média	11,58 b	11,85 a	11,37 c	10,94 d	10,84 e		

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 10 Eficiência do uso da água ( $ET_c$ ) ( $kg.m^{-3}$ ) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 4.5 2050.

	Lâminas de irrigação					Média	
	0	50	75	95	100		
Data de semeadura	11/06	16,32	17,02	17,08	17,07	17,07	16,91 k
	18/03	17,72	18,29	18,34	18,33	18,33	18,20 i
	25/03	19,07	19,50	19,54	19,54	19,53	19,44 g
	01/04	20,34	20,56	20,59	20,58	20,58	20,53 e
	08/04	21,33	21,40	21,41	21,40	21,40	21,39 d
	15/04	21,95	21,98	21,99	21,99	21,98	21,98 bc
	<b>22/04</b>	<b>22,21</b>	<b>22,24</b>	<b>22,24</b>	<b>22,23</b>	<b>22,23</b>	<b>22,23 ab</b>
	<b>29/04</b>	<b>22,27</b>	<b>22,28</b>	<b>22,28</b>	<b>22,27</b>	<b>22,27</b>	<b>22,28 a</b>
	<b>06/05</b>	<b>22,09</b>	<b>22,09</b>	<b>22,09</b>	<b>22,08</b>	<b>22,08</b>	<b>22,09 ab</b>
	13/05	21,72	21,73	21,73	21,73	21,73	21,73 c
	20/05	21,26	21,29	21,29	21,29	21,29	21,28 d
	27/05	20,67	20,75	20,76	20,76	20,76	20,74 e
	03/06	19,99	20,14	20,14	20,14	20,14	20,11 f
	10/06	19,28	19,49	19,49	19,49	19,49	19,45 g
	17/06	18,53	18,78	18,78	18,78	18,78	18,73 h
	24/06	17,67	18,07	18,07	18,07	18,07	17,99 i
	01/07	16,84	17,35	17,36	17,36	17,36	17,25 j
	08/07	16,13	16,68	16,68	16,68	16,68	16,57 l
	15/07	15,42	16,02	16,03	16,03	16,03	15,91 m
	22/07	14,74	15,41	15,43	15,42	15,42	15,28 n
29/07	14,15	14,82	14,85	14,85	14,84	14,70 o	
05/08	13,66	14,26	14,28	14,28	14,28	14,15 p	
Média	18,79 b	19,11 a	19,11 a	19,11 a	19,11 a		

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 11. Eficiência do uso da água (ET<sub>c</sub>) (kg.m<sup>-3</sup>) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 4.5 2070.

	Lâminas de irrigação					Média	
	0	50	75	95	100		
Data de semeadura	11/06	15,67	16,59	16,66	16,66	16,65	16,4 k
	18/03	17,17	17,87	17,94	17,93	17,93	17,8 i
	25/03	18,63	19,16	19,20	19,20	19,20	19,1 g
	01/04	20,04	20,32	20,35	20,35	20,35	20,3 e
	08/04	21,16	21,27	21,28	21,27	21,27	21,2 d
	15/04	21,91	21,96	21,98	21,97	21,97	22,0 b
	<b>22/04</b>	<b>22,30</b>	<b>22,33</b>	<b>22,33</b>	<b>22,33</b>	<b>22,33</b>	<b>22,5 a</b>
	<b>29/04</b>	<b>22,45</b>	<b>22,47</b>	<b>22,47</b>	<b>22,46</b>	<b>22,46</b>	<b>22,3 a</b>
	<b>06/05</b>	<b>22,31</b>	<b>22,33</b>	<b>22,32</b>	<b>22,31</b>	<b>22,31</b>	<b>22,3 a</b>
	13/05	22,00	22,02	22,02	22,01	22,01	22,0 b
	20/05	21,53	21,57	21,57	21,57	21,57	21,6 c
	27/05	20,93	21,04	21,05	21,05	21,05	21 d
	03/06	20,23	20,43	20,43	20,43	20,43	20,4 e
	10/06	19,50	19,76	19,76	19,76	19,76	19,7 f
	17/06	18,73	19,04	19,05	19,05	19,04	19 g
	24/06	17,84	18,30	18,31	18,31	18,31	18,2 h
	01/07	16,99	17,56	17,57	17,57	17,56	17,5 j
	08/07	16,24	16,84	16,84	16,84	16,84	16,7 k
	15/07	15,50	16,14	16,15	16,15	16,15	16 l
	22/07	14,76	15,48	15,50	15,50	15,50	15,3 m
29/07	14,11	14,86	14,88	14,88	14,88	14,7 n	
05/08	13,58	14,26	14,29	14,28	14,28	14,1 o	
Média	18,80 b	19,16 a	19,18 a	19,18 a	19,17 a		

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 12. Eficiência do uso da água (ET<sub>c</sub>) (kg.m<sup>-3</sup>) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 8.5 2050.

	Lâminas de irrigação					Média	
	0	50	75	95	100		
Data de semeadura	11/06	16,07	16,97	17,04	17,04	17,03	16,8 k
	18/03	17,56	18,26	18,32	18,31	18,31	18,2 i
	25/03	19,01	19,54	19,58	19,58	19,58	19,5 g
	01/04	20,40	20,69	20,73	20,72	20,72	20,7 e
	08/04	21,53	21,64	21,65	21,65	21,65	21,6 d
	15/04	22,30	22,35	22,36	22,35	22,35	22,3 b
	<b>22/04</b>	<b>22,68</b>	<b>22,72</b>	<b>22,72</b>	<b>22,71</b>	<b>22,71</b>	<b>22,7 a</b>
	<b>29/04</b>	<b>22,83</b>	<b>22,85</b>	<b>22,85</b>	<b>22,84</b>	<b>22,84</b>	<b>22,8 a</b>
	<b>06/05</b>	<b>22,69</b>	<b>22,71</b>	<b>22,71</b>	<b>22,70</b>	<b>22,69</b>	<b>22,7 a</b>
	13/05	22,37	22,40	22,40	22,39	22,39	22,4 b
	20/05	21,89	21,94	21,94	21,94	21,94	21,9 c
	27/05	21,27	21,41	21,42	21,42	21,42	21,4 d
	03/06	20,56	20,79	20,79	20,79	20,79	20,7 e
	10/06	19,80	20,11	20,12	20,12	20,11	20,1 f
	17/06	19,02	19,39	19,39	19,39	19,39	19,3 g
	24/06	18,10	18,64	18,64	18,64	18,64	18,5 h
	01/07	17,21	17,88	17,89	17,89	17,88	17,8 j
	08/07	16,46	17,16	17,17	17,17	17,16	17 k
	15/07	15,72	16,46	16,47	16,47	16,47	16,3 l
	22/07	14,98	15,80	15,82	15,82	15,82	15,7 m
29/07	14,35	15,17	15,20	15,20	15,19	15,0 n	
05/08	13,83	14,57	14,60	14,59	14,59	14,4 o	
Média	19,12 b	19,52 a	19,54 a	19,53 a	19,53 a		

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Tabela 13. Eficiência do uso da água (ET<sub>c</sub>) (kg.m<sup>-3</sup>) por datas de semeadura e lâmina de água para o RCP 8.5 2070.

	Lâminas de irrigação					Média	
	0	50	75	95	100		
Data de semeadura	11/06	16,88	18,19	18,28	18,28	18,27	18,0 m
	18/03	18,60	19,59	19,68	19,67	19,66	19,4 k
	25/03	20,25	21,02	21,07	21,07	21,06	20,9 i
	01/04	21,88	22,32	22,36	22,35	22,35	22,2 g
	08/04	23,21	23,40	23,41	23,41	23,40	23,4 e
	15/04	24,13	24,22	24,23	24,22	24,22	24,2 cd
	<b>22/04</b>	<b>24,62</b>	<b>24,67</b>	<b>24,67</b>	<b>24,66</b>	<b>24,66</b>	<b>24,7 ab</b>
	<b>29/04</b>	<b>24,86</b>	<b>24,89</b>	<b>24,89</b>	<b>24,88</b>	<b>24,88</b>	<b>24,9 a</b>
	<b>06/05</b>	<b>24,74</b>	<b>24,76</b>	<b>24,76</b>	<b>24,74</b>	<b>24,74</b>	<b>24,7 ab</b>
	13/05	24,41	24,45	24,44	24,44	24,43	24,4 bc
	20/05	23,91	23,98	23,98	23,97	23,97	24 d
	27/05	23,20	23,39	23,40	23,39	23,39	23,4 e
	03/06	22,40	22,71	22,72	22,71	22,71	22,7 f
	10/06	21,56	21,98	21,98	21,98	21,98	21,9 h
	17/06	20,66	21,16	21,16	21,16	21,16	21,1 i
	24/06	19,61	20,32	20,33	20,33	20,33	20,2 j
	01/07	18,61	19,48	19,49	19,49	19,49	19,3 k
	08/07	17,77	18,68	18,69	18,69	18,69	18,5 l
	15/07	16,95	17,91	17,92	17,92	17,92	17,7 m
	22/07	16,10	17,17	17,20	17,19	17,19	17,0 n
29/07	15,37	16,48	16,51	16,51	16,51	16,3 o	
05/08	14,78	15,81	15,84	15,84	15,83	15,6 p	
Média	20,66 b	21,21 a	21,23 a	21,22 a	21,22 a		

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.