



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/04.04.15.21-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DA ATIVIDADE AGRÍCOLA DE
PIVÔS CENTRAIS POR MEIO DE SÉRIES TEMPORAIS
DE IMAGENS SENTINEL-2 PARA ESTIMATIVAS DE
USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA**

Aline Casassola

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Thales Sehn Körting,
e Leila Maria Garcia Fonseca,
aprovada em 08 de abril de 2022.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46L4DML>

INPE
São José dos Campos
2022

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/04.04.15.21-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DA ATIVIDADE AGRÍCOLA DE
PIVÔS CENTRAIS POR MEIO DE SÉRIES TEMPORAIS
DE IMAGENS SENTINEL-2 PARA ESTIMATIVAS DE
USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA**

Aline Casassola

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. Thales Sehn Körting,
e Leila Maria Garcia Fonseca,
aprovada em 08 de abril de 2022.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46L4DML>

INPE
São José dos Campos
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Casassola, Aline.

C264c Caracterização da atividade agrícola de pivôs centrais por meio de séries temporais de imagens Sentinel-2 para estimativas de uso da água na agricultura irrigada / Aline Casassola. – São José dos Campos : INPE, 2022.

xxi + 157 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/04.04.15.21-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022.

Orientadores : Drs. Thales Sehn Körting, e Leila Maria Garcia Fonseca.

1. MSI. 2. Irrigação. 3. Classificação. 4. Distância Euclidiana. I.Título.

CDU 528.8:631.67



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE ALINE CASASSOLA
REG 408052/2020, BANCA Nº 081/2022

No dia 08 de abril de 2022, às 09h, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Novo Título: “CARACTERIZAÇÃO DA ATIVIDADE AGRÍCOLA DE PIVÔS CENTRAIS POR MEIO DE SÉRIES TEMPORAIS DE IMAGENS SENTINEL-2 PARA ESTIMATIVAS DE USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA IRRIGADA”

Membros da banca:

Dra. Ieda Del’ Arco Sanches – Presidente e Membro Interno – INPE

Dr. Thales Sehn Körting – Orientador – INPE

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca – Orientadora – INPE

Dr. Hugo do Nascimento Bendini – Membro Interno – INPE

Dr. Júlio César Dalla Mora Esquerdo – Membro Externo – Embrapa Agricultura Digital



Documento assinado eletronicamente por **Leila Maria Garcia Fonseca, Tecnologista**, em 08/04/2022, às 13:39 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ieda Del Arco Sanches, Chefe da Divisão de Pós-Graduação**, em 08/04/2022, às 14:16 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thales Sehn Korting, Pesquisador**, em 08/04/2022, às 15:00 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julio cesar dalla mora esquerdo (E), Usuário Externo**, em 12/04/2022, às 17:48 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hugo do nascimento bendini (E), Usuário Externo**, em 12/04/2022, às 17:50 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **9618854** e o código CRC **592032EB**.

Referência: Processo nº 01340.002260/2022-45

SEI nº 9618854

“Water does not resist. Water flows. When you plunge your hand into it, all you feel is a caress. Water is not a solid wall, it will not stop you. But water always goes where it wants to go, and nothing in the end can stand against it. Water is patient. Dripping water wears away a stone. Remember that, my child. Remember you are half water. If you can't go through an obstacle, go around it. Water does”.

Margaret Atwood

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lourdes e Fiorentino Casassola, a quem eu devo a vida e que sempre motivaram meus estudos com as melhores intenções. À minha irmã, Alice Casassola, que foi meu exemplo de pessoa e de profissional por toda minha vida. Aos meus amigos, João Manoel Borges, Bárbara Fornari e Deivis Medina, pelo apoio ilimitado e imensurável.

Ao Dr. Thales Sehn Körting, pela paciência, pela excelente orientação científica e humana ao longo desses dois anos. À Dra. Leila Maria Garcia Fonseca, pelo incentivo e contribuições para este trabalho.

À Dra. Ieda Del'Arco Sanches, pela amizade e inspiração. Ao colega Felipe Rafael de Sá Menezes Lucena, por todo o suporte técnico e companheirismo.

Finalmente, o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A agricultura irrigada é o maior e mais dinâmico setor usuário de recursos hídricos no Brasil e na média global. A prática de irrigar traz inúmeros benefícios, como maior produção, produtividade e qualidade dos produtos agrícolas, mas o uso intensivo da mesma também traz a necessidade de monitoramento do uso da água. Prevê-se que o sistema de irrigação por pivô central será a principal forma de irrigação no país até 2030. Porém, embora esteja crescendo em importância, ainda existem lacunas de conhecimento acerca das áreas efetivamente irrigadas e das diferentes formas de manejo dos pivôs. Neste estudo, foram utilizadas séries temporais do satélite Sentinel-2 para determinar a ociosidade e a intensidade da atividade de pivôs centrais presentes em Cruz Alta, Palmeira das Missões e Santo Antônio das Missões, noroeste do Rio Grande do Sul, para a realização de estimativas de uso da água na região entre 2017 e 2019. A metodologia é formada por duas etapas: (i) a caracterização da inatividade e número de ciclos agrícolas dos pivôs, através do uso de uma adaptação da Distância Euclidiana para analisar séries temporais EVI e NDWI, e (ii) estimativas de uso da água realizadas em possíveis cenários agrícolas por meio de dados de lâmina de irrigação do SISDAGRO. A metodologia adaptada da Distância Euclidiana forneceu uma classificação com 83,4% de exatidão global, sendo que 92,63% dos pivôs se apresentaram uniformemente cultivados, majoritariamente com dois e três ciclos agrícolas anuais e baixa ocorrência de inatividade. A estimativa do cenário agrícola de maior consumo de água resultou em um uso de mais de 135 milhões de m³, 6x mais do que a quantidade de água utilizada para o consumo humano direto nos três municípios de estudo. Estes resultados reforçam a necessidade de monitoramento do uso da água na agricultura irrigada e, dessa forma, com este trabalho, espera-se contribuir com a otimização desse processo em áreas de pivôs centrais.

Palavras-chave: MSI. Irrigação. Classificação. Distância Euclidiana.

CHARACTERIZATION OF AGRICULTURAL ACTIVITY OF CENTER PIVOTS WITH TIME SERIES OF SENTINEL-2 IMAGES FOR ESTIMATES OF WATER USE IN IRRIGATED AGRICULTURE

ABSTRACT

Irrigated agriculture is the largest and most dynamic sector using water resources in Brazil and in the global average. The practice of irrigation brings numerous benefits, such as greater production, productivity and quality of agricultural products, but its intensive use also brings the need for monitoring the water use. It is predicted that the center pivot irrigation system will be the main form of irrigation in the country by 2030. However, although it is growing in importance, there are still gaps in knowledge about the effectively irrigated areas and the different forms of pivot management. In this study, time series from the Sentinel-2 satellite were used to determine the idleness and intensity of the activity of center pivots present in Cruz Alta, Palmeira das Missões and Santo Antônio das Missões, northwest of Rio Grande do Sul, to carry out estimates of water use in the region between 2017 and 2019. The methodology consists of two steps: (i) characterization of inactivity and number of agricultural cycles of the pivots, through the use of an adaptation of the Euclidean Distance to analyze EVI and NDWI time series, and (ii) water use estimates in possible agricultural scenarios using irrigation blade data from SISDAGRO. The methodology adapted from the Euclidean Distance provided a classification with 83.4% of global accuracy, with 92.63% of the pivots being uniformly cultivated, mostly with two and three annual agricultural cycles and low occurrence of inactivity. The estimate of the agricultural scenario of higher water consumption resulted in a use of more than 135 million m³, 6x more than the amount of water used for direct human consumption in the three study municipalities. These results reinforce the need for monitoring the use of water in irrigated agriculture and, therefore, with this work, it is expected to contribute to the optimization of this process in areas of central pivots.

Keywords: MSI. Irrigation. Classification. Euclidean Distance.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Sistema de irrigação por Pivô Central.	9
Figura 2.2 – Representação esquemática dos parâmetros do solo relacionados à irrigação.....	12
Figura 2.3 – Representação dos processos ligados à irrigação.	13
Figura 2.4 – Exemplo de séries temporais NDVI e EVI de área florestal do Cerrado.	17
Figura 2.5 – Distância Euclidiana entre dois pontos bidimensionais.	18
Figura 2.6 – Diferença de alinhamento entre DE (<i>Euclidean</i>) e DTW.	19
Figura 2.7 – Exemplos de pivôs centrais irregulares.....	21
Figura 3.1 – Mapa de localização dos municípios de Santo Antônio das Missões, Palmeira das Missões e Cruz Alta.....	24
Figura 4.1 – Fluxo metodológico empregado na classificação dos pivôs e estimativas do uso da água.....	26
Figura 4.2 – Exemplos de pontos amostrados em pivôs de Cruz Alta em composição verdadeira do sensor MSI (R(4)-G(3)-B(2))......	30
Figura 4.3 – Exemplos de séries referência.	31
Figura 4.4 – Exemplo de funcionamento da janela móvel.	32
Figura 4.5 – Esquema da classificação da atividade dos pivôs centrais por meio da DE.	33
Figura 5.1 – Pontos classificados como número de ciclos agrícolas anuais. ...	37
Figura 5.2 – Exemplos de pontos classificados de acordo com ciclos agrícolas anuais.....	38
Figura 5.3 – Região em Cruz Alta com predominância de dois ciclos agrícolas em 2019 em composição verdadeira do sensor MSI (R(4)-G(3)-B(2))......	40
Figura 5.4 – Exemplos de pontos classificados de um pivô de Cruz Alta 100% classificado como dois ciclos agrícolas em 2019.	41
Figura 5.5 – Precipitação e NDWI de cinco pontos de pivô em Cruz Alta entre 05/12/2019 e 10/04/2020 (safra de soja).....	42

Figura 5.6 – Exemplos de pontos de pivô 100% inativo de Santo Antônio das Missões em 2018. 43

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Épocas de plantio (P) e colheita (C) das principais culturas do Rio Grande do Sul.	15
Tabela 4.1 – Bandas espectrais das plataformas Sentinel-2A e 2B.....	27
Tabela 4.2 – Verdade de campo de pivôs presentes nas áreas de estudo.....	29
Tabela 4.3 – Cenários utilizados nas estimativas de uso da água.	35
Tabela 5.1 – Matriz de confusão da classificação.	37
Tabela 5.2 – Número de pivôs uniformemente classificados.	39
Tabela 5.3 – Número de pivôs com frações inativas por ano.....	40
Tabela 5.4 – Estimativas de uso da água de pivôs com informações de campo do ano agrícola de 2019.....	43
Tabela 5.5 – Estimativas de uso da água em diferentes cenários.	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BDC	<i>Brazil Data Cube</i>
BHCI	Balanço Hídrico Sequencial de Cultivo para Irrigação
CAD	Capacidade de Água Disponível
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CC	Capacidade de Campo
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
Da	Densidade Aparente do solo
DE	Distância Euclidiana
DTW	<i>Dynamic Time Warping</i>
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESA	<i>European Space Agency</i>
ET	Evapotranspiração
ETc	Evapotranspiração potencial da Cultura
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
ETo	Evapotranspiração de cultura de referência
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FAD	Água Facilmente Disponível
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Kc	Coeficiente de Cultura
MidIR	<i>Mid-Wave Infrared</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>

MSI	<i>MultiSpectral Instrument</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Moisture Index</i>
NIR	<i>Near-Infrared</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
PMP	Ponto de Murcha Permanente
RS	Rio Grande do Sul
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SENIR	Secretaria Nacional de Irrigação
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SISDAGRO	Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária
SM	<i>Small</i>
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

C_n	Coeficiente da equação do EVI
G	Fator de ganho da equação do EVI
ha	Hectares
km	Quilômetros
km ²	Quilômetros quadrados
L	Fator de ajuste para solos da equação do EVI
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
Mha	Milhões de hectares
mm	Milímetros
nm	Nanômetros
X_N	Coordenada indefinida
Y_N	Coordenada indefinida
Z	Profundidade efetiva do sistema radicular da cultura
θ_{CC}	Umidade do solo na capacidade de campo
θ_{PMP}	Umidade do solo no ponto de murcha permanente

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Irrigação e produção sustentável de alimentos	5
2.2 Sistema de irrigação por pivô central	8
2.3 Manejo da água na agricultura irrigada.....	10
2.4 Agricultura e clima no Rio Grande do Sul	14
2.5 Índices de vegetação e séries temporais.....	15
2.6 Monitoramento de pivôs por satélite	20
3 ÁREA DE ESTUDO	24
4 METODOLOGIA	26
4.1 Fluxo metodológico.....	26
4.2 Dados	26
4.3 Atualização e amostragem dos dados vetoriais.....	30
4.4 Classificação da atividade dos pivôs	31
4.5 Estimativas de uso da água.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 Caracterização dos pivôs.....	36
5.2 Classificação da atividade dos pivôs	36
5.3 Estimativas de uso da água.....	43
6 CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola no Brasil é essencial para a economia do país. Em 2020, de acordo com dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA), em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), o PIB do agronegócio representou uma parcela de 26,6% do PIB brasileiro total, 6,1% a mais que em 2019 (CNA, 2020) e com avanço de 10,79% nos primeiros nove meses de 2021 (CEPEA, 2021). No entanto, ainda mais importante que sua representação na economia, a produção agrícola visa principalmente a geração de alimentos para a população mundial crescente, prevista pela Organização das Nações Unidas (ONU) para aumentar de 7,7 bilhões de pessoas, em 2020, para 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2019).

Devido a essa importância, existe uma demanda de informações frequentes e confiáveis sobre a produção agrícola. Estas informações auxiliam iniciativas que controlam a balança comercial dos produtos e mantém um apropriado abastecimento do mercado interno. Além disso, interferem na avaliação privada de seguradoras e agentes do agronegócio, sendo indispensáveis para orientar financiamentos agrícolas e o agricultor, já que este também deve ser preciso na hora de tomar decisões referentes a plantios e comercialização (SILVA, 2018).

As informações e estimativas agrícolas são geradas principalmente através de entidades nacionais relacionadas ao setor, como por exemplo, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Porém, considerando a vasta extensão do território brasileiro e sua grande dinâmica espaço temporal, algumas técnicas empregadas podem envolver muita mão de obra e um alto custo.

Sendo assim, a obtenção de dados confiáveis pode ser difícil, lenta e onerosa. O Sensoriamento Remoto, neste sentido, surge como uma ferramenta que colabora com o mapeamento, identificação, monitoramento, estimativas de áreas e previsão de safras de forma mais rápida, precisa e com menor custo, especialmente com o uso de séries temporais (várias observações ao longo do tempo) (GUSSO et al., 2012; KUPLICH et al., 2013; PAGEOT et al., 2020).

No que diz respeito à produção agropecuária, vários insumos são necessários e utilizados, sendo a água um dos que merece destaque. No Brasil, compete à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) produzir e atualizar informações sobre o balanço hídrico quantitativo nacional e, segundo a agência, a agricultura irrigada é o maior e mais dinâmico setor usuário de recursos hídricos no país e na média global. No entanto, ainda existem importantes lacunas de conhecimento acerca das áreas efetivamente irrigadas, do seu potencial de expansão e das diferentes formas de manejo do uso da água (ANA, 2019).

Mendes (1998) destaca inúmeros benefícios do uso da irrigação, dentre os quais: aumento de produtividade de duas a três vezes em relação à agricultura de sequeiro (sem irrigação artificial); possibilidade de realização de até três culturas/ano; maior aproveitamento de maquinário e mão de obra; aumento na oferta de alimentos e outros produtos agrícolas; atenuação de fatores de risco como sazonalidade climática; preços mais favoráveis; maior qualidade e padronização dos produtos agrícolas; abertura de novos mercados; elevação da renda do produtor rural; modernização dos sistemas de produção; conservação do solo e da água, entre outros.

Os métodos de irrigação podem ser por superfície, subterrânea, por aspersão ou localizada. O uso de pivôs centrais (um tipo de irrigação por aspersão), onde a água é aplicada acima do solo na forma de chuva artificial, ganha destaque pela sua uniformidade de distribuição de água, alto grau de automação, versatilidade de implantação (diferentes tipos de solo) e capacidade de aplicação de outros insumos agrícolas como fertilizantes e defensivos (EVANS, 2001).

O Brasil possui 8,2 milhões de hectares (Mha) equipados para irrigação. As projeções, por outro lado, indicam a incorporação de 4,2 milhões de hectares irrigados até 2040 – cerca de 200 mil hectares ao ano –, aproximando o País da área total de 12,4 milhões de hectares irrigados: 30% do potencial efetivo e 7% do potencial total. Os métodos mais eficientes no uso da água, irrigação localizada e a aspersão por pivô central, deverão ser responsáveis por cerca de 75% desse crescimento (ANA, 2021).

No entanto, embora o aumento da área irrigada possa trazer vários benefícios à produção agrícola, também traz um alerta à necessidade de monitoramento do uso da água. Com o incremento estimado dessas áreas, a ANA (2019) também prevê um aumento na demanda hídrica da ordem de 30 mil litros/segundo a cada ano, equivalente ao abastecimento de uma cidade de 10 milhões de habitantes, evidenciando a importância do uso correto da água destinada à irrigação.

Dessa forma, manter a sustentabilidade se faz cada vez mais importante. As técnicas de Sensoriamento Remoto já têm sido utilizadas no monitoramento e na estimativa do consumo da água das culturas irrigadas e têm se mostrado mais ágeis e mais baratas do que os métodos tradicionais *in situ* (OZDOGAN et al., 2010; CHEN et al., 2018; ANA, 2019).

Várias informações podem ser extraídas desses monitoramentos, estando incluídas estimativas de quantidade de água utilizada. Porém, para que seja possível realizar tais estimativas, mais aspectos devem ser considerados: além da identificação das áreas irrigadas, também se faz necessária a avaliação da atividade da irrigação, uma vez que um mesmo pivô pode realizar até três safras no mesmo ano-safra e, pode, por exemplo, não ter a área utilizada em sua totalidade, ter mais de uma cultura diferente simultaneamente cultivadas ou, até mesmo, estar totalmente inativo, dificultando as estimativas.

Além disso, dada a identificação de um pivô e a sua atividade, é necessário identificar a espécie agrícola cultivada. Cada espécie de planta possui uma demanda hídrica específica que depende de fatores como o coeficiente de cultura (K_c), e das condições de evapotranspiração, diretamente influenciadas pelas condições climáticas (OLIVEIRA et al., 2007). Uma vez conhecida a cultura e a quantidade de chuva em uma determinada área, é possível estimar a quantidade de água necessária para irrigação.

Dentro deste contexto, o objetivo principal desta pesquisa consiste em determinar a ociosidade e a sazonalidade de pivôs centrais presentes em três municípios da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, utilizando

séries temporais do satélite Sentinel-2, para estimar o uso da água nas culturas irrigadas por pivô central.

Os objetivos específicos são:

- a) caracterizar os pivôs centrais presentes nos municípios de Santo Antônio das Missões, Cruz Alta e Palmeira das Missões;
- b) classificar a ociosidade de pivôs centrais, assim como determinar a intensidade de uso anual (número de ciclos agrícolas);
- c) estimar a quantidade de água usada na irrigação por pivôs centrais na área de estudo.

Este documento está organizado de modo a apresentar um Capítulo de Fundamentação Teórica (Capítulo 2), onde será feita uma revisão sobre a histórico da irrigação no Brasil e o funcionamento do método de irrigação por pivô central, uma abordagem sobre as características da produção agrícola do Rio Grande do Sul, assim como sobre índices de vegetação de dados de Sensoriamento Remoto e como a irrigação vem sendo monitorada por satélites. Nos Capítulos seguintes, apresenta-se a proposta metodológica para determinar a atividade dos pivôs centrais presentes na área de estudo e estimar a quantidade de água utilizada para irrigação. Finalmente, nos Capítulos 4 e 5 são apresentados os resultados alcançados e as conclusões, respectivamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Irrigação e produção sustentável de alimentos

A crescente população mundial cria a necessidade de um grande aumento na produção de alimentos. Porém, o desafio de aumentar a produtividade agrícola vem acompanhado de algumas dificuldades. Dentre elas, estão incluídas a redução da disponibilidade de terras aráveis, as assimetrias no crescimento populacional, na produção de alimentos e na oferta hídrica, a multifuncionalidade da agricultura, as mudanças climáticas, entre outras (RODRIGUES et al., 2017).

Além dessas dificuldades, aumentar a produção de alimentos deve ser uma atividade avaliada em uma abordagem mais ampla, que leva em consideração os aspectos de sustentabilidade ambiental. A intensificação da produção deve gerar ganhos de produtividade e melhorar a qualidade dos produtos ao mesmo tempo que não perde de vista a resiliência dos sistemas naturais, minimizando os danos.

Segundo levantamento da safra brasileira de grãos 2019/20 realizado pela Conab, a área plantada nessa safra aumentou em 4% em relação à safra 2018/19. No entanto, a produtividade aumentou em 4,5% (Conab, 2020), o que significa que o aumento de produtividade não foi explicado somente pelo aumento da área plantada, mas também pelo aumento de produção, que é também devido ao aumento do uso da irrigação.

Por outro lado, na última safra de grãos (2020/21), foi estimada uma redução na produtividade de 1,8% sobre a safra 2019/20. Tal redução se deve aos danos causados pela seca prolongada nas principais regiões produtoras, principalmente nas culturas de segunda safra, aliada às baixas temperaturas com eventos de geadas ocorridas nos estados da Região Centro-Sul do país (CONAB, 2021). Nesse caso, o longo período de seca e a redução da disponibilidade hídrica inclusive nas áreas de captação de água prejudicou também a prática da irrigação, evidenciando ainda mais o impacto da água na produtividade das culturas.

Dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) (2011) mostram que, de maneira geral, nos países em desenvolvimento, os sistemas agrícolas baseados no cultivo de sequeiro são caracterizados por baixas produtividades, comprometendo a capacidade de atender as demandas sociais e econômicas. Na produção de sequeiro, cujo resultado é dependente de variações climáticas, também há maiores incertezas nas previsões.

Na agricultura irrigada, por sua vez, as demandas hídricas das culturas são supridas pela água da chuva e/ou de irrigação, sendo a produção não influenciada pela incerteza temporal e locacional das chuvas, podendo-se produzir em qualquer época do ano e viabilizando assim a escala de produção e os padrões de qualidade mundialmente requeridos (RODRIGUES et al., 2017). Nesse contexto, fica evidente que a agricultura de sequeiro, unicamente, não permite que se pense em escala de produção e em segurança alimentar e nutricional.

A definição de irrigação, segundo Rodrigues et. al (2017), é de complementar, por meio da aplicação racional de água, as necessidades hídricas da cultura, minimizando os impactos do clima sobre o seu rendimento. Iniciou há cerca de 6 mil anos, na Mesopotâmia, região que hoje compreende o Iraque e parte do que é chamado Crescente Fértil, onde foram construídos canais e desviada a água do Rio Eufrates para as plantações locais (ROUX, 1993).

No caso do Brasil, a irrigação teve início por volta do ano de 1900 para a produção de arroz no Estado do Rio Grande do Sul, importante polo de irrigação desde então. A expressiva intensificação da atividade em outras regiões do país ocorreu a partir dos anos de 1970 e 1980, impulsionada pela expansão da agricultura para regiões menos favoráveis e pelos próprios benefícios observados nessa prática, porém, com crescimento forte e persistente, novos polos vêm surgindo nas últimas décadas (ANA, 2017).

O déficit hídrico é o maior causador da redução na produção das culturas de primavera-verão no Rio Grande do Sul (BERGAMASCHI et al., 2004). No Semiárido brasileiro, região afetada pela escassez contínua de água, uma parte importante da agricultura só se viabiliza mediante a aplicação artificial de

água (ANA, 2017). Outro exemplo é a região do Planalto Central, no Cerrado, onde devido ao período de chuvas, a produção se situa entre os meses de novembro a abril, podendo ser significativamente ampliada se praticada com irrigação (RODRIGUES et al., 2017).

Em 2018, 4,8 bilhões de hectares mundiais foram destinados à agricultura, dos quais 338 milhões de hectares estão equipados com infraestrutura dedicada à irrigação (FAOSTAT, 2018). No Brasil, em 2019, foram identificados 1,556 Mha irrigados por pivôs centrais que ocorrem em polos bem delimitados, notadamente em Minas Gerais (28,8%), Goiás (17,3%), São Paulo (14,6%), Bahia (14,0%), Rio Grande do Sul (9,3%) e Mato Grosso (8,7%). A área atual é 50 vezes maior do que a área mapeada em 1985, e todos esses Estados apresentam crescimento expressivo no médio e curto prazo, especialmente Mato Grosso e Rio Grande do Sul (7% em 2000, 11% em 2010 e 18% em 2019) (ANA, 2021).

Nota-se que a agricultura irrigada apresenta um histórico de desenvolvimento crescente e persistente nas últimas décadas, muitas vezes avançando inclusive em períodos instáveis e negativos da economia brasileira e mundial. Entretanto, de acordo com a ANA (2021), ainda há desafios para sua manutenção nos próximos 20 anos, em especial quanto ao crédito, às mudanças/variabilidades climáticas e à capacidade de suporte ambiental e hídrica dos polos de irrigação. Concomitantemente, práticas sustentáveis podem acelerar essa ampliação, elevando o patamar de crescimento para a ordem de 300 mil ha ao ano, incorporando ao Brasil 6 Mha até 2040 (43% maior do que os 4,2 Mha projetados no cenário tendencial) (ANA, 2021).

Desta forma, é evidente o quanto a irrigação pode contribuir com o aumento de produtividade agrícola em paralelo com o desenvolvimento sustentável. Já é uma prática expressiva na agricultura brasileira e tende a aumentar, gerando uma demanda maior de informações e disponibilidade de dados para que seja empregada adequadamente e aperfeiçoada de forma que seus benefícios sejam cada vez mais expressivos.

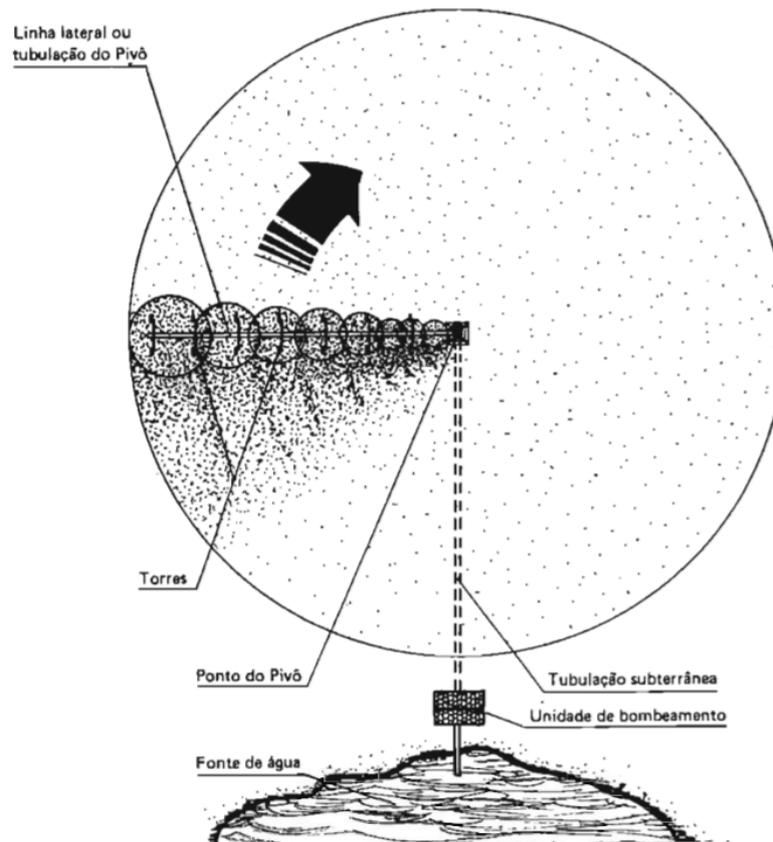
2.2 Sistema de irrigação por pivô central

A agricultura irrigada brasileira é tão dinâmica e diversificada quanto a agricultura tradicional. Em 700 mil hectares outorgados pela ANA, ocorrem 70 culturas diferentes associadas a diferentes tipos de irrigação. A Agência indica padrões de associação entre métodos e culturas, como uma forte correlação entre inundação e arroz, entre gotejamento e café e fruticultura, entre aspersão convencional com carretéis enroladores (*hidro roll*) e a cana-de-açúcar, e entre pivôs centrais e a produção de outros grãos como algodão, feijão, milho e soja (ANA, 2017).

A irrigação por aspersão, que inclui os pivôs centrais, teve seus primeiros ensaios no início do século XX, na Europa e nos Estados Unidos. No início da década de 30, tomou certo impulso com o advento dos tubos leves de aço, para a condução de água. A partir de 1960, com a evolução eletroeletrônica e a automação, foram desenvolvidos sistemas automáticos de irrigação por aspersão, totalmente programados (MARCHETTI, 1983).

O sistema Pivô Central foi desenvolvido por Frank Ziback, no Colorado, perto da cidade de Strasburg, nos Estados Unidos. Após passar por inúmeras adaptações, o sistema foi posto a trabalhar e a patente americana foi solicitada em 1952 (MARCHETTI, 1983). Esse sistema consiste, basicamente, em diversos bocais de distribuição de água, chamados aspersores, que ficam dispostos sobre uma linha lateral suportada por torres que se movimentam sobre o ponto central da área irrigada, chamado Ponto do Pivô. O pivô recebe água sob pressão através de tubulações subterrâneas e uma unidade de bombeamento, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Sistema de irrigação por Pivô Central.



Fonte: Marchetti (1983).

No entanto, existem basicamente três tipos de pivôs. Um deles é o pivô central fixo, como ilustrado na Figura 2.1; outro é pivô central rebocável, que permite a irrigação de várias áreas com o mesmo equipamento e, finalmente, o último é o conhecido por sistema linear (pivô linear), pois se desloca em linha reta, sendo ideal para áreas retangulares (CENTRAL IRRIGAÇÃO, 2018). Além disso, no caso de áreas retangulares, o sistema conhecido por “*Corner Pivot*”, que possui um braço auxiliar para irrigar cantos de áreas, é um exemplo de como nem sempre os pivôs se restringem a áreas perfeitamente circulares.

Atualmente no Brasil, os pivôs centrais representam um total de 19,9% da área irrigada, com previsão de aumento de 8,7% até 2030 (ANA, 2019). O aumento da popularidade desse sistema se deve às inúmeras vantagens proporcionadas por ele, dentre as quais: adaptação tanto em terrenos planos quanto em terrenos ondulados, que reduz o custo de preparação do terreno para irrigação; pode ser rebocável, conferindo versatilidade ao equipamento; permite

aplicações de fertilizantes, herbicidas e inseticidas, evitando a compactação do solo causada pelo trânsito de tratores, além de economizar combustível; distribui a água e os insumos de maneira uniforme, aumentando a eficiência da aplicação e o aproveitamento pelas culturas, assim também a produtividade; proporciona uma aplicação correta da quantidade de água exigida pela cultura (10 a 60% menos água do que irrigação superficial); a semeadura independe das condições pluviométricas (épocas do ano), entre outros (MARCHETTI, 1983).

2.3 Manejo da água na agricultura irrigada

De uma maneira geral, as culturas têm o seu desenvolvimento e rendimento altamente influenciados pelas condições de clima e disponibilidade de água. Em algumas regiões áridas do Brasil, como o Nordeste, a irrigação se faz ainda mais necessária porque a água é um fator limitante de produção. No entanto, sempre que a prática da irrigação for utilizada, é essencial o uso de um manejo eficiente e racional, que exige conhecimentos básicos de uma série de parâmetros relacionados à planta, ao solo e ao clima.

Dentre os parâmetros básicos para este manejo estão a evapotranspiração (ET), a profundidade efetiva do sistema radicular das culturas (Z) e os parâmetros de solo: capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e densidade aparente do solo (D_a) (ANDRADE JÚNIOR, 1992).

ET é o agrupamento de dois fatores distintos, em que a perda de água ocorre por meio da superfície do solo e pela transpiração através dos estômatos das plantas, ambos os processos acontecendo simultaneamente (ALLEN et al. 1998). Visto que cada cultura possui suas particularidades, a evapotranspiração potencial varia de cultura para cultura, fazendo-se necessária a definição de dois termos: evapotranspiração potencial para uma cultura de referência (ET_o) e evapotranspiração potencial da cultura em questão (ET_c).

ET_o é a quantidade de água evapotranspirada de uma superfície coberta por gramíneas com oito a quinze centímetros de altura, em fase de crescimento ativo, sombreando totalmente o solo e sem restrições de umidade

(MAROUELLI et al. 1986). Pode ser estimada por métodos diretos, como lisímetros e controle da umidade do solo, ou métodos indiretos como vaporímetros e equações empíricas que utilizam dados meteorológicos (Blaney-Criddle, Hargreaves e Tanque Classe A) (ANDRADE JÚNIOR, 1992).

ET_c, por sua vez, é a evapotranspiração de determinada cultura quando se tem ótimas condições de umidade e nutrientes no solo de modo a permitir a produção potencial desta cultura nas condições de campo (BERNARDO, 1989). Pode ser estimada utilizando também métodos diretos ou indiretos, sendo o último obtido a partir do produto entre a ET_o e o coeficiente de cultura (K_c) (ET_c = ET_o x K_c), que é a relação entre a ET_c e a ET_o para os diferentes estádios de desenvolvimento, ou seja, representa os efeitos da cultura sobre suas necessidades de água e são normalmente tabelados para cada cultura e região.

Quanto à profundidade efetiva do sistema radicular (Z), tem-se que é a profundidade em que se encontram 80% das raízes da cultura. Na irrigação, o conhecimento do Z é importante porque o uso de valores de Z maiores que o real leva ao irrigante a aplicar mais água que o necessário, elevando também os custos de aplicação. Valores menores de Z, ao contrário, resultam em aplicações deficientes de água, comprometendo a produtividade das culturas (ANDRADE JÚNIOR, 1992).

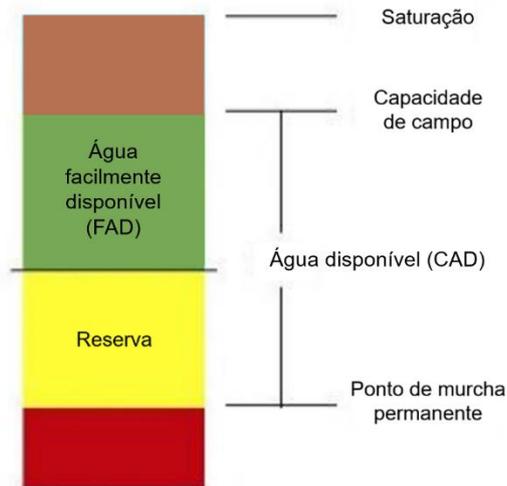
Dentre os parâmetros do solo, tem-se a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e a densidade aparente do solo (D_a). Esses parâmetros fornecem a informação de Capacidade de Água Disponível no solo, ou CAD, calculada através do produto entre a diferença de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente (θ_{CC} e θ_{PMP}), a densidade do solo e a profundidade do sistema radicular, conforme Equação 2.1:

$$CAD = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \times D_a \times Z \quad (2.1)$$

O conhecimento da CAD se faz muito importante para o manejo da irrigação, especialmente quando utilizado o método de balanço de água no solo. Neste

método, todos os parâmetros de solo são utilizados, e também a FAD, ou água facilmente disponível, ilustrados na Figura 2.2.

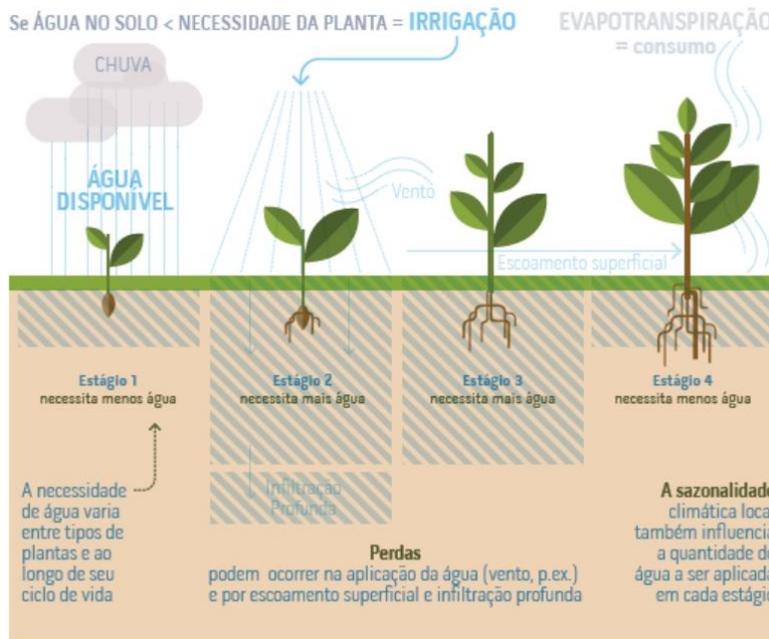
Figura 2.2 – Representação esquemática dos parâmetros do solo relacionados à irrigação.



Fonte: Adaptado de AgroSmart (2021).

No entanto, além do método de balanço de água no solo, os métodos de irrigação podem ser vários: incluem, por exemplo, os baseados no cálculo do turno de rega e na tensão de água no solo, sempre visando a manutenção da demanda hídrica da planta. O esquema da Figura 2.3 representa alguns processos relacionados à irrigação.

Figura 2.3 – Representação dos processos ligados à irrigação.



Fonte: ANA (2017).

Nesse contexto, alguns órgãos de pesquisa nacionais já vêm investindo recursos no monitoramento também da agricultura irrigada. É o caso, por exemplo, do SISDAGRO, ou Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária, um sistema desenvolvido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que visa apoiar usuários do setor agrícola em suas tomadas de decisão, auxiliando no planejamento e manejo agropecuário (SISDAGRO, 2022).

Atualmente, o SISDAGRO disponibiliza ao usuário algumas ferramentas de monitoramento agrometeorológico. Entre elas está incluída a que usa o método de balanço de água no solo, “Balanço Hídrico”, que avalia, dentre outras coisas, o potencial de uso de sistemas de irrigação.

Para isso, o SISDAGRO utiliza o Balanço Hídrico Sequencial de Cultivo para Irrigação (BHCI) baseado na metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), adotando dois tipos de sistemas de cultivo: irrigado com lâmina de água fixa e irrigado com lâmina de água variável. Os tipos de cultivo são fixados pelo usuário, assim como também qual é a cultura analisada e também o tipo de solo, importantes para a definição dos parâmetros básicos do manejo da irrigação através desse método.

2.4 Agricultura e clima no Rio Grande do Sul

A soja, o arroz, o milho e o trigo constituem as principais culturas agrícolas cultivadas no RS em termos de área plantada e quantidade produzida (FEIX et al., 2016). O arroz, que pode ser de sequeiro ou irrigado, quando irrigado, é predominantemente por inundação, não aparecendo em áreas de pivô central. Quanto à área plantada e produção das demais culturas, segundo dados do IBGE do ano de 2020 para o Rio Grande do Sul, 5.996.371 ha foram plantados com soja, com uma produção de 11.294.683 t; no caso do trigo, 953.832 ha plantados e produção de 2.104.160 t; para o milho, 751.573 ha e 4.211.208 t e, por fim, para a aveia, que não é uma cultura de importância econômica expressiva, porém é bastante usada como planta de cobertura no inverno, 324.240 ha plantados e produção de 609.277 t (IBGE, 2020).

A soja plantada no estado tem duração de ciclo de desenvolvimento próxima de 125 a 140 dias (ZANON et al., 2015). O trigo possui um ciclo com duração que pode variar de 100 a 170 dias, a depender de qual a cultivar e das condições edafoclimáticas. O milho destinado à produção de grãos tem seu ciclo variando entre 120 e 150 dias e a aveia, por sua vez, possui o ciclo ainda mais variável, de 120 a mais de 200 dias, dependendo da espécie cultivada e da época de semeadura (FLOSS, 1988). As épocas de semeadura e colheita de cada cultura estão demonstradas na Tabela 2.1.

O clima do Rio Grande do Sul é Temperado do tipo Subtropical, classificado como Mesotérmico Úmido (classificação de Köppen). Com relação às precipitações, em decorrência das massas de ar oceânicas que penetram no Estado, apresenta uma distribuição relativamente equilibrada das chuvas ao longo de todo o ano. No entanto, ao sul do Estado a precipitação média situa-se entre 1.299 e 1.500 mm, e ao norte a média está entre 1.500 e 1.800 mm, sendo que os meses mais úmidos são os de inverno, entre julho e setembro (ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL, 2020).

Ademais, o comportamento da temperatura das águas do Oceano Pacífico tropical associado aos campos de pressão (representados pelo Índice de Oscilação do Sul) altera o padrão de circulação da atmosfera. As anomalias

climáticas mais conhecidas e de maior impacto são as relacionadas com o regime de chuvas, e afetam bastante a região do Sul do Brasil.

No Sul, as anomalias em anos de El Niño (águas do Pacífico tropical quentes e Índice de Oscilação do Sul negativo) estão relacionadas com excesso de chuvas, enquanto que as estiagens surgem em anos de La Niña (águas do Pacífico tropical frias e Índice de Oscilação do Sul positivo). Apesar da influência dar-se durante todo o período de atuação desses eventos, há duas épocas do ano que são mais afetadas: primavera e começo de verão (outubro, novembro e dezembro), no ano inicial do evento, e podendo chegar ao final do outono e começo de inverno (abril, maio e junho), no ano seguinte ao início do evento (CUNHA, 1998; 1999).

Assim, nessas épocas, as chances de chuvas acima do normal são maiores, em anos de El Niño, e chuvas abaixo do normal, em anos de La Niña, afetando diretamente a necessidade de irrigação na agricultura.

Tabela 2.1 – Épocas de plantio (P) e colheita (C) das principais culturas do Rio Grande do Sul.

Cultura	Meses do ano											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Soja	P	C	C	C	C					P	P	P
Milho	P/C	P/C	C	C	C	C	P	P	P	P	P	P
Trigo					P	P	P		C	C	C	
Aveia				P	P	P	P		C	C	C	

Fonte: CONAB (2019).

2.5 Índices de vegetação e séries temporais

O Sensoriamento Remoto vem fornecendo dados para a extração de vários parâmetros biofísicos da vegetação desde a década de 1960. Segundo Jensen (2009), o uso de índices de vegetação tem contribuído com isso de forma significativa, sendo estes definidos como medidas radiométricas adimensionais, as quais indicam a quantidade e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar (IAF), porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde, e radiação fotossinteticamente ativa absorvida.

Os índices de vegetação são inúmeros. Entre eles, alguns dos mais conhecidos estão o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou *Normalized Difference Vegetation Index*), o NDWI (Índice de Umidade por Diferença Normalizada ou *Normalized Difference Moisture Index*) e o EVI (Índice de Vegetação Realçado ou *Enhanced Vegetation Index*).

O NDVI, representado pela Equação 2.2, utiliza as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (*red*), tendo sido desenvolvido por Rouse et al. (1974):

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red} \quad (2.2)$$

Com o NDVI, mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento e na atividade da vegetação podem ser monitoradas, e a razão reduz muitas formas de ruídos como diferenças de iluminação solar, sombras de nuvens, algumas atenuações atmosféricas e algumas variações topográficas. No entanto, também é não-linear, podendo ser influenciado por efeitos ruidosos aditivos, tais como radiância de trajetória atmosférica (JENSEN, 2009; HUETE et al., 2002; WANG et al., 2005).

O NDWI, por sua vez, baseado nas bandas do NIR e do infravermelho médio (MidIR) (Equação 2.3), é altamente correlacionado com o conteúdo de água do dossel vegetal e consegue acompanhar melhor mudanças na biomassa e nos estresses de umidade das plantas do que o índice NDVI (HARDISKY et al., 1983; GAO, 1996).

$$NDWI = \frac{NIR - MidIR}{NIR + MidIR} \quad (2.3)$$

No entanto, o NDWI é frequentemente calculado utilizando a combinação de bandas do NIR e do infravermelho de ondas curtas (SWIR), no lugar de MidIR, visto que a combinação NIR-SWIR evidencia diferenças no conteúdo de água nas folhas das plantas (SENTINEL-HUB, 2022).

Por fim, o EVI, desenvolvido pelo “*MODIS Land Discipline Group*”, é um NDVI modificado que contém um fator de ajuste para solos (*L*), e dois coeficientes (*C*₁ e *C*₂), que descrevem o uso da banda azul (*blue*) para correção da banda

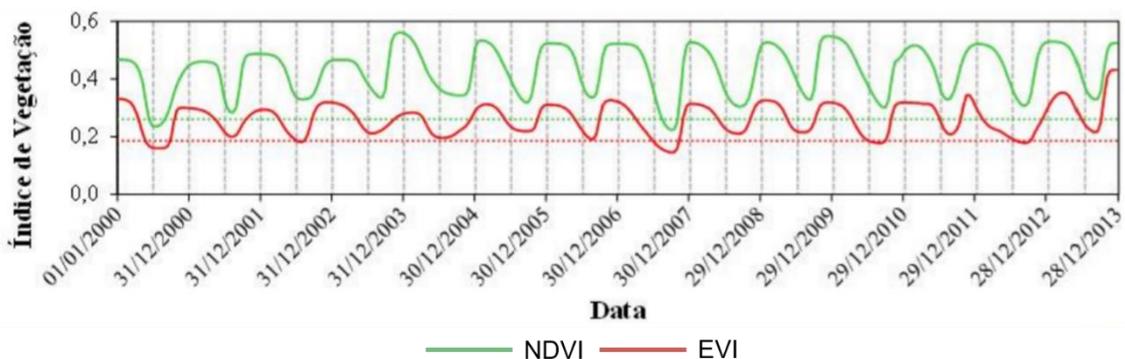
vermelha quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis (Equação 2.4) (JENSEN, 2009).

$$EVI = G \frac{NIR - red}{NIR + C_1 * red + C_2 * blue + L} (1 + L) \quad (2.4)$$

Os coeficientes C_1 , C_2 e L são empiricamente determinados (6,0; 7,5; e 1,0, respectivamente) e G é um fator de ganho ajustado em 2,5. Este algoritmo permite um melhor desempenho do monitoramento da vegetação através da diminuição da influência do sinal proveniente do substrato abaixo do dossel e através da redução da influência atmosférica (HUETE et al., 1997; HUETE e JUSTICE, 1999; HUETE et al., 2002).

Observações sequencias de índices de vegetação podem compor séries temporais (Figura 2.4). Uma série temporal pode ser definida como um conjunto de observações ordenadas no tempo. No Sensoriamento Remoto de áreas agrícolas, as séries temporais são essenciais, visto que a abordagem espectro-temporal explora o curto tempo de revisita de alguns sensores orbitais, tornando possível que a observação das culturas seja mais frequente.

Figura 2.4 – Exemplo de séries temporais NDVI e EVI de área florestal do Cerrado.



Fonte: Adaptado de Bayma e Sano (2015).

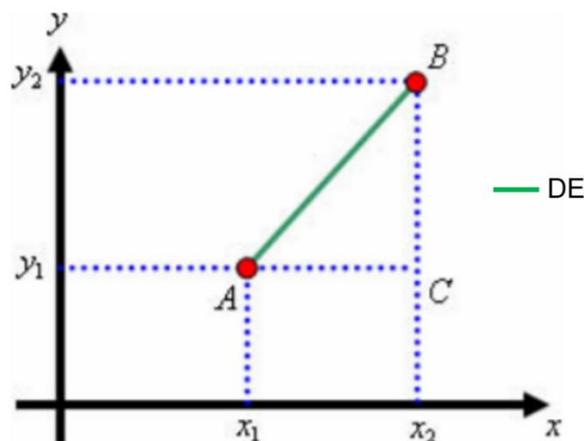
Na Figura 2.4, cada pico, onde os valores de EVI e NDVI são mais elevados, indica condição de maior biomassa da vegetação. Dessa forma, as séries temporais são importantes porque, através de observações sequências da agricultura, ajudam por exemplo na análise da fenologia da vegetação, na previsão de safras, mudanças sazonais, uso e cobertura do solo, monitoramento da irrigação, etc.

Kuplich et al., (2013) afirmam que a identificação da fenologia em ciclos, ou padrões sazonais, realizada através de informações provenientes de séries temporais de vegetação, possibilita a observação de anomalias e efeitos de mudanças climáticas ou ambientais. Quando antecedem ações de conservação e manejo, incluindo as de irrigação, essas informações sobre a dinâmica fenológica dos sistemas agrícolas aumentam as chances de sucesso dessas ações.

Ao analisar séries temporais, são várias as metodologias passíveis de adoção. Uma vez que podemos representar cada série temporal como um ponto multidimensional em um espaço euclidiano, métodos baseados em medidas de distância são exemplos que podem ser usados para saber o quanto distante (diferentes) ou perto (similares) duas séries temporais estão/são entre si.

A Distância Euclidiana (DE) é uma das mais comuns distâncias existentes. Basicamente, a DE retorna a distância entre dois pontos (A, B), onde A é composto pelas coordenadas X_1 e Y_1 e B pelas coordenadas X_2 e Y_2 (Figura 2.5), calculada de acordo com a Equação 2.4.

Figura 2.5 – Distância Euclidiana entre dois pontos bidimensionais.



Fonte: Adaptado de Aguiar (2016).

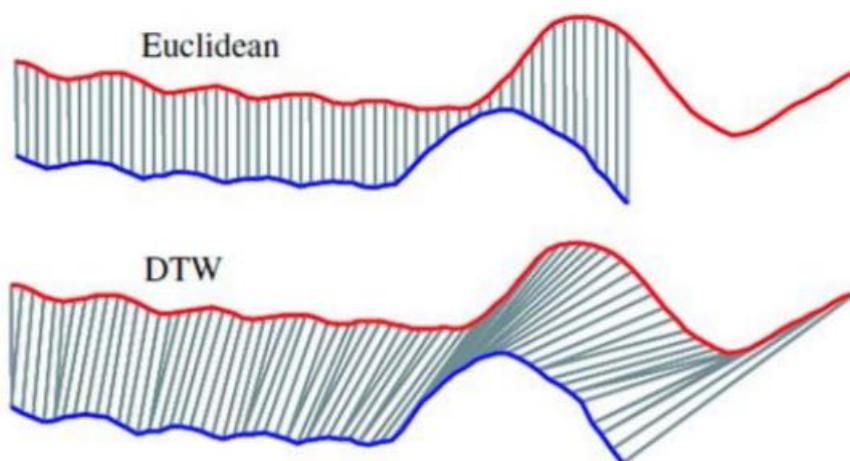
$$DE(A, B) = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad (2.4)$$

Cada ponto de uma série temporal A tem sua distância calculada com apenas um ponto da série temporal B e vice-versa, mantendo assim uma relação de 1 para 1. Por conta disso, a DE acaba não sendo uma boa alternativa para séries temporais de tamanhos diferentes, ao contrário, apresentando bons resultados para séries de mesmo tamanho.

Alternativamente, o *Dynamic Time Warping* (DTW) calcula todas as distâncias entre todos os pontos de cada uma das séries apresentadas, garantindo assim que todos os pontos estejam ligados a pelo menos 1 ponto da outra série apresentada, e vice-versa. Isso ocorre, pois, o DTW suprime o espaço existente entre duas séries temporais de tamanhos diferentes, calculando entre todos os pontos de cada uma das séries temporais em uma relação de m para n onde m e n são os tamanhos de cada uma das séries (AGUIAR, 2016).

Exemplificando, se o ponto X_1 de uma série temporal X tem sua distância euclidiana calculada para cada ponto da série Y ($Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_N\}$), o mesmo processo será repetido para todos os pontos de X.

Figura 2.6 – Diferença de alinhamento entre DE (*Euclidean*) e DTW.



Fonte: Aguiar (2016).

Medidas de distância entre séries temporais de índice de vegetação já vêm ajudando na extração de informações importantes para a agricultura. É o caso, por exemplo, do uso da DE no entendimento da distribuição espacial de dados agrometeorológicos e da produtividade da soja no Paraná (ARAÚJO et al.,

2013), no cálculo das áreas de produção agrícola (SILVA, 2018), e do uso do DTW no mapeamento da cultura do arroz no Vietnã (GUAN et al. 2016).

2.6 Monitoramento de pivôs por satélite

Rudorff e Moreira (2002) afirmam que a tecnologia de Sensoriamento Remoto apresenta um grande potencial para ser utilizada na agricultura, fato que vem sendo demonstrado ao longo dos últimos anos. A partir dela, é possível obter informações sobre: estimativa de área plantada; estimativa de produção agrícola; vigor vegetativo das culturas; manejo agrícola em nível de país, estado, município ou ainda em nível de microbacia hidrográfica ou fazenda.

Como o uso de sistemas de irrigação por pivô central é uma tendência crescente no manejo agrícola, seu mapeamento por Sensoriamento Remoto também vem crescendo nos últimos anos, sendo importante para apoiar uma melhor gestão dos recursos hídricos. Além da ANA, que já vem historicamente monitorando sistemas de irrigação por pivô central por satélite desde 1985 (ANA, 2019), Carlson et al. (1989), por exemplo, também já descrevia o uso do Landsat 5 TM para monitorar pivôs em Nebraska, Estados Unidos, desde a década de 70.

No Cerrado Brasileiro, Lima et al. (2007) desenvolveram um trabalho que objetivou a identificação e a quantificação da área irrigada por pivô-central, em 2002, de forma georreferenciada, com imagens Landsat ETM+. Através de análises visuais, foram identificados 6.001 pivôs-centrais, totalizando 478.632 hectares irrigados na área de estudo (LIMA et al., 2007).

De forma semelhante, também visualmente, Ferreira et al. (2011), utilizando imagens do satélite CBERS 2B, sensor CCD, identificaram 3.781 sistemas de pivôs centrais no Estado de Minas Gerais. Contudo, por terem feito o uso de mais de uma cena do sensor para cobrir todo o estado e, que essas cenas não pertenciam ao mesmo ano, a estimativa final do número total de pivôs pode conter equívocos relacionados a pivôs que podiam estar ativos em um ano, mas inativos em outro.

Ademais, a identificação da presença de pivôs centrais pode ser prejudicada pela assunção de que todos possuem formato perfeitamente circular. Conforme

mostrado em A da Figura 2.7, alguns desses equipamentos de irrigação podem não ter o formato circular, mas assumir uma forma completamente irregular. Ainda, a presença de um pivô não está necessariamente diretamente relacionada com a intensidade do seu uso, pois além de poderem estar inativos por certo período de tempo, ainda podem estar parcialmente inativos, ou seja, parcialmente cultivado e em uso e parcialmente em pousio, em desuso (B da Figura 2.7).

Figura 2.7 – Exemplos de pivôs centrais irregulares.



A: pivô de área irregular; B: pivô parcialmente cultivado.

Fonte: Produção da autora.

Com o mesmo objetivo de identificação de pivôs, Silveira et al. (2013) realizaram o mapeamento de áreas irrigadas pertencentes à bacia hidrográfica Tambaú-Verde, localizada na região Nordeste do Estado de São Paulo. A identificação das áreas irrigadas foi feita também de forma visual a partir de imagens do satélite CBERS 2/CCD, mas, neste caso, as áreas foram ainda verificadas com base em dados de localização de pivôs em campo. A maioria dos equipamentos exibidos nas imagens de 2007 encontrava-se na mesma posição no ano de 2009. Porém, em alguns casos, as coordenadas ficaram próximas aos alvos exibidos na imagem, podendo indicar um rodízio de área irrigada nas proximidades da base (SILVEIRA et al. 2013) e evidenciando a presença de pivôs rebocáveis, assim como, mais uma vez, o fato de as áreas irrigadas por pivô central poderem sofrer alterações de atividade de ano em ano.

Neste sentido, Guimarães e Landau (2015), além do monitoramento de áreas irrigadas através de análises visuais, também determinaram a condição de uso dos pivôs centrais (inativo ou em produção) usando séries temporais de

máximo NDVI do MODIS. As áreas dos pivôs com NDVI superiores a 0,7 foram consideradas como plantadas sob o regime de irrigação. Embora tanto o limiar de NDVI definido, quanto a menor resolução espacial do MODIS possam trazer incertezas, essa análise permitiu a quantificação das áreas irrigadas ao longo do tempo e a determinação de períodos em que a irrigação foi mais intensa.

Nos últimos anos, entretanto, vêm sendo propostas novas metodologias que prometem ser mais rápidas, mais acuradas e aplicáveis em escalas maiores do que quando comparadas com as análises visuais. É o caso, por exemplo, da abordagem baseada em redes neurais convolucionais de classificação de imagens para detectar automaticamente sistemas de irrigação de pivô central (ZHANG et al., 2018), o uso do *deep learning* para sistemas automáticos de mapeamento de pivôs (SARAIVA et al., 2020) ou abordagens baseadas em processamento digital de imagens e *machine learning* (RODRIGUES, 2021).

Ainda, considerando a disponibilidade atual e gratuita de imagens Sentinel-1 e Sentinel-2, poucos estudos utilizam esses dados para fornecer avanços de mapeamento e análises de áreas irrigadas. Em 2019, Bazzi et al. propuseram uma metodologia para mapear áreas irrigadas utilizando séries temporais SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1; Pageot et al. (2020) propuseram o uso de séries temporais de dados ópticos Sentinel-2, de radar Sentinel-1 e dados meteorológicos também para a detecção de áreas irrigadas e de sequeiro. Porém, análises da atividade dessas áreas irrigadas mapeadas permanecem escassas.

O monitoramento de pivôs centrais com vista em uma melhor gestão de recursos hídricos inclui também estimativas de uso de água. Nesta perspectiva, Sano et al. (2005) desenvolveram um trabalho com o objetivo de determinar a variação da área irrigada por pivôs-centrais no Distrito Federal entre os anos de 1992 e 2002 e estimar a demanda hídrica desses sistemas.

Neste trabalho, os autores identificaram áreas irrigadas por pivô-central utilizando imagens de satélite e ferramentas de geoprocessamento, sendo o consumo de água dessas áreas irrigadas estimado com base em dados da literatura referentes às principais culturas semeadas na região e suas

respectivas demandas hídricas. Foi encontrado um aumento no consumo de água, que em 10 anos passou de 23,36 para 40,94 milhões de m³/ano (SANO et al. 2005).

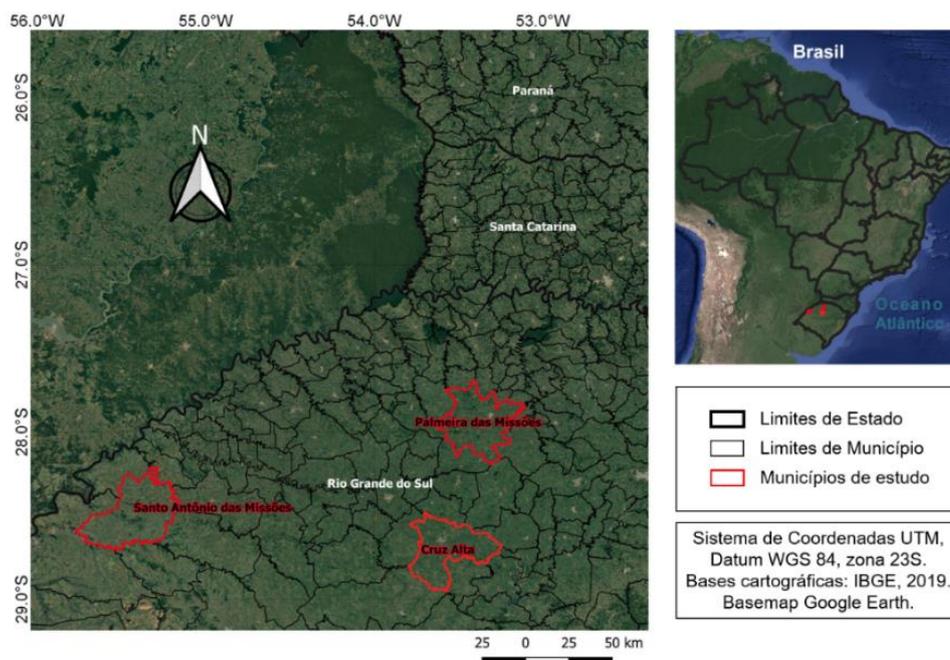
Esses trabalhos mostram que a utilização de imagens de satélite associadas ao uso de sistemas de informação geográfica (SIG) são ferramentas eficientes para mapear e monitorar áreas irrigadas por pivô central, assim como para possíveis estimativas de uso da água. Porém, algumas limitações ainda estão sendo superadas, como a grande variação entre os tamanhos dos pivôs, a possível irregularidade na forma dos mesmos, as áreas cultivadas ou inativas e as diferentes culturas e estádios de desenvolvimento que podem estar presentes em um único pivô (SARAIVA et al., 2020).

3 ÁREA DE ESTUDO

O estado do Rio Grande do Sul está localizado no extremo sul do Brasil, fazendo fronteira, ao sul, com Uruguai, a oeste com Argentina e a leste com o Oceano Atlântico. Com uma área de 281.707,149 km² e população, no último censo de 2020, de 10.693.929 pessoas (IBGE, 2020), é o quarto estado com maior participação no PIB nacional, perdendo somente para os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (IBGE, 2019).

Embora haja uma forte participação do Setor de Serviços, que apresentou grande crescimento durante as duas últimas décadas, pode-se dizer que a economia gaúcha é impulsionada por dois setores hegemônicos: a Agropecuária e a Indústria de Transformação (ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL, 2020). Dentre os municípios que participam da produção agrícola estão Santo Antônio das Missões, Palmeira das Missões e Cruz Alta, que foram os escolhidos para representar o noroeste do estado no presente estudo devido à disponibilidade de informações de campo (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Mapa de localização dos municípios de Santo Antônio das Missões, Palmeira das Missões e Cruz Alta.



Fonte: Produção da autora.

Santo Antônio das Missões foi desmembrado da redução de São Borja e fundado em 1682 no 2º Ciclo Missioneiro. Tem uma população estimada de 9.930 pessoas (IBGE, 2021), território de 1.710,869 km² (IBGE, 2020) e é considerado o maior município em extensão territorial da Região das Missões (PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTO ANTÔNIO DAS MISSÕES, 2014). Palmeira das Missões foi oficialmente fundada em 1874, possui um território de 1.421,101 km² (IBGE, 2020), população estimada de 32.967 (IBGE, 2021) e, embora esteja próxima e também carregue no nome as Missões, não pertence à região missioneira. A fundação de Cruz Alta, por sua vez, deu-se em 1821, sendo que hoje é o maior dos três municípios considerados em termos de população, estimada em 59.561 pessoas (IBGE, 2021), mas o menor quanto à extensão territorial, com 1.360,458 km² (IBGE, 2020).

O solo característico dos três municípios é o Latossolo. Latossolos são solos de intemperização intensa, conhecidos por solos velhos e de características gerais como argilas com predominância de óxidos de ferro, alumínio, silício e titânio, argilas de baixa atividade (baixa capacidade de troca de cátions), fortemente ácidos e baixa saturação de bases. Devido às boas condições físicas e aos relevos mais suaves, apresentam alto potencial para o uso agrícola, sendo largamente utilizados para a produção de grãos: soja, milho, arroz, entre outros (SANTOS; ZARONI, 2021).

Segundo último monitoramento dos pivôs centrais realizados pela ANA e pela Embrapa Milho e Sorgo, em 2020, Santo Antônio das Missões possuía 54 pivôs, Palmeira das Missões, 59, e Cruz Alta, 164 (ANA, 2020). Considerando os três municípios, neste estudo, serão analisados 277 pivôs centrais.

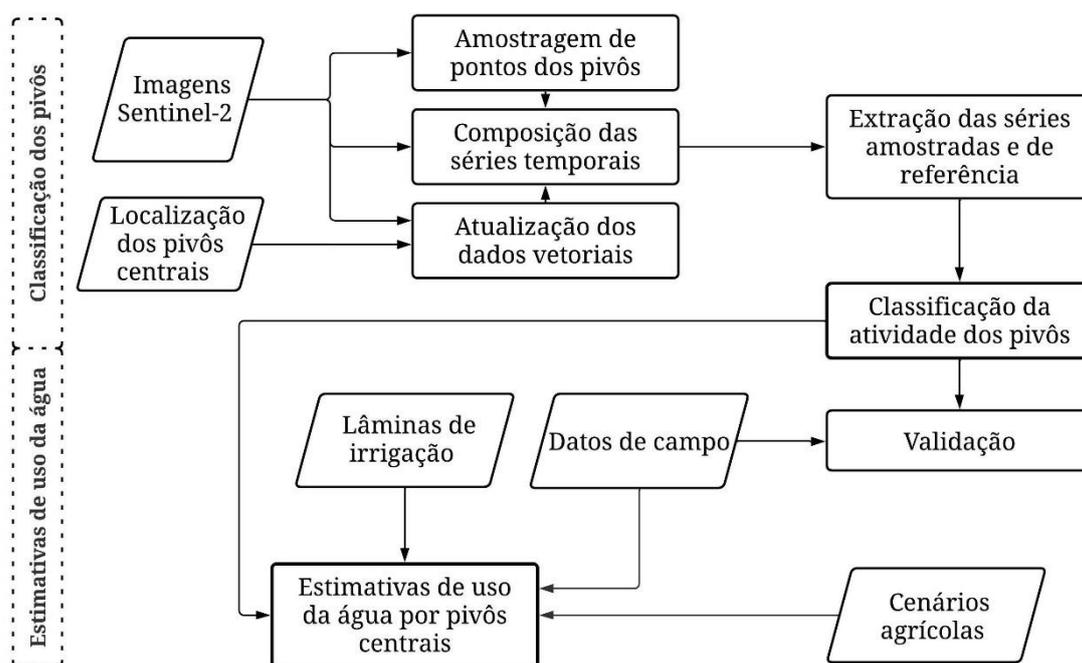
4 METODOLOGIA

Esta sessão apresenta a metodologia proposta para classificar a atividade de pivôs centrais e estimar o uso da água dessas áreas irrigadas no noroeste do estado do Rio Grande do Sul. Diferentes bases de dados, como séries temporais de imagens de Sensoriamento Remoto orbital, dados de irrigação e informações de campo serão integradas para classificação dos pivôs e análise do uso da água.

4.1 Fluxo metodológico

A metodologia empregada nesta pesquisa é organizada basicamente em duas etapas: a classificação da atividade dos pivôs e as estimativas de uso da água. Na Figura 4.1 está esquematizado o fluxo metodológico.

Figura 4.1 – Fluxo metodológico empregado na classificação dos pivôs e estimativas do uso da água.



Fonte: Produção da autora.

4.2 Dados

Com objetivo de estimar o uso da água nos três municípios do noroeste do Rio Grande do Sul, diferentes bases de dados foram exploradas: dados de Sensoriamento Remoto orbital, dados vetoriais de pivôs centrais e dados de

irrigação. Todas as bases de dados utilizadas são *Open Access* e foram escolhidas de acordo com a disponibilidade e potencialidade de uso desta pesquisa.

Para que seja possível a classificação da atividade dos pivôs, foram compostas séries temporais com dados de imageamento óptico do sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*) a bordo das plataformas Sentinel-2A e 2B. O sensor óptico possui resolução radiométrica de 12-bit e trabalha com 13 bandas espectrais: quatro bandas em 10 m, seis bandas em 20 m e três bandas em resolução espacial de 60 m (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Bandas espectrais das plataformas Sentinel-2A e 2B.

Resolução espacial (m)	Número da banda	S2A		S2B	
		Comprimento de onda central (nm)	Largura de banda (nm)	Comprimento de onda central (nm)	Largura de banda (nm)
10	2	492.4	66	492.1	66
	3	559.8	36	559.0	36
	4	664.6	31	664.9	31
	8	832.8	106	832.9	106
20	5	704.1	15	703.8	16
	6	740.5	15	739.1	15
	7	782.8	20	779.7	20
	8a	864.7	21	864.0	22
	11	1613.7	91	1610.4	94
	12	2202.4	175	2185.7	185
60	1	442.7	21	442.2	21
	9	945.1	20	943.2	21
	10	1373.5	31	1376.9	30

Fonte: ESA (2022).

A missão Sentinel-2 compreende uma constelação de dois satélites (A e B) em órbita polar colocados na mesma órbita sincronizada com o sol, com fases de 180° entre si. Esta tem como objetivo monitorar a variabilidade nas condições

da superfície da terra, e sua largura de faixa (290 km) e alta frequência de revisita (10 dias no equador com um satélite e 5 dias com 2 satélites em condições sem nuvens) também ajudam no monitoramento nas mudanças de cobertura da Terra (ESA, 2022).

As séries temporais dos índices de vegetação EVI e NDWI foram compostas entre setembro de 2017 e agosto de 2020. A escolha do EVI se deu especialmente por ser um índice que reduz a influência da reflectância atmosférica e do solo, e otimiza o sinal da vegetação (PONZONI et al., 2012). Por sua vez, o NDWI foi escolhido por ser altamente correlacionado com o conteúdo de água do dossel vegetal e contribuir, assim, na avaliação de possíveis estresses hídricos das culturas presentes nos pivôs avaliados.

As séries temporais EVI foram obtidas do projeto *Brazil Data Cube* (BDC) (<http://brazildatacube.org/>), de onde também foram extraídas as cenas para a composição das séries NDWI. As cenas disponibilizadas já são radiometricamente e geometricamente corrigidas e, para a composição das séries NDWI, foram utilizadas as bandas 8, do NIR, e 11, do SWIR, do Sentinel-2.

Os cubos de dados fornecidos pelo BDC são compostos pela seleção da imagem de melhor observação entre várias observações válidas. Ainda, considerando as diferentes resoluções espaciais entre imagens e/ou bandas, o BDC rearranja as imagens em *tiles* específicos, fornecendo cubos onde todas as bandas possuem a mesma resolução espacial (FERREIRA et al., 2020). Isso permitiu, por exemplo, que as bandas 8, de resolução espacial 10 m, e 11, de resolução espacial 20 m, fossem utilizadas para a composição das séries temporais NDWI (com resolução de 10 m).

Nesse estudo, um cubo de dados foi utilizado para cada município analisado. Considerando o *grid* BDC_SM (BDC Small), coleção Sentinel-2 MSI (10 m), o *tile* 083113 representou Santo Antônio das Missões, o 084112, Palmeira das Missões e o 084113, Cruz Alta. Cada cubo tem uma resolução temporal de 16 dias, contendo 69 observações, totalizando 207 observações para cada índice de vegetação.

Os dados vetoriais utilizados foram os de pivôs centrais mapeados e disponibilizados *online* pela ANA e pela Embrapa Milho e Sorgo, referentes ao ano de 2020 (ANA, 2020). No entanto, uma segunda inspeção visual desses dados também foi realizada.

Para auxiliar na validação dos resultados, informações de verdade de campo foram adicionalmente utilizadas. Estas informações foram obtidas a partir de produtores agrícolas de conhecimento da autora e dizem respeito a 10 pivôs centrais distribuídos entre os três municípios de estudo, incluindo quais culturas foram cultivadas entre a safra de 2019/2020 e 2020/2021 (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Verdade de campo de pivôs presentes nas áreas de estudo.

Pivô	Cidade	Verão 2019/2020	Inverno 2020	Verão 2020/2021
1	Santo Antônio das Missões	Soja	Trigo e aveia	Soja
2	Palmeira das Missões	Soja	Aveia	Milho
3	Palmeira das Missões	Soja	Aveia	Soja
4	Palmeira das Missões	Soja	Aveia	Soja
5	Cruz Alta	Soja	Aveia	Soja
6	Cruz Alta	Soja	Aveia	Soja
7	Cruz Alta	Soja	Aveia	Soja
8	Cruz Alta	Soja	Aveia	Soja
9	Cruz Alta	Soja	Aveia	Soja
10	Cruz Alta	Soja	Aveia	Soja

As estimativas de uso da água contaram com auxílio dos dados de irrigação fornecidos pelo SISDAGRO (<http://sisdagro.inmet.gov.br/>). Na ferramenta “Balanço Hídrico”, foi selecionada a estação meteorológica mais perto das áreas de estudo (Cruz Alta), a opção de lâminas de irrigação variáveis (visto que não se sabe sobre o uso de lâminas fixas nos pivôs avaliados), a cultura em questão (soja, milho, trigo ou aveia) e o tipo de solo, Latossolo, para os três municípios.

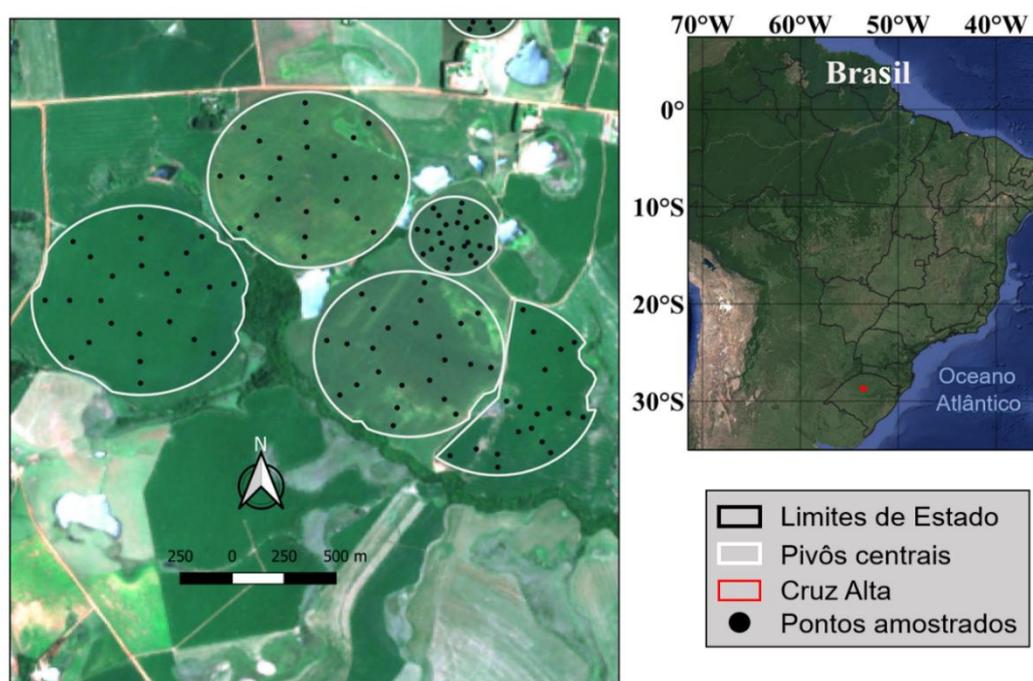
4.3 Atualização e amostragem dos dados vetoriais

Para uma reavaliação dos pivôs presentes na área de estudo, imagens de 2021 do Sentinel-2 e da plataforma do Google Earth serviram de auxílio visual. As imagens do Sentinel-2 foram compostas em cor verdadeira (bandas 4, 3 e 2), a fim de manter a resolução espacial de 10 m e a compatibilidade com a visualização no Google Earth.

Após avaliação, pontos foram amostrados dentro dos pivôs para sua posterior classificação. O espaçamento dos pontos foi definido de forma proporcional à área de cada pivô, sendo que, para pivôs perfeitamente circulares, a distribuição espacial foi realizada de maneira a ter pelo menos três linhas circulares e afuniladas formadas por 8 pontos cada, ficando mais dispersos em pivôs irregulares, conforme demonstrado na Figura 4.2.

Dessa forma, cada pivô pôde ser também classificado quanto à sua área em atividade (total ou parcial). Para esta tarefa, em um SIG (QGIS 3.16.16), os processos de *buffer*, simplificação de polígonos e extração de vértices foram utilizados.

Figura 4.2 – Exemplos de pontos amostrados em pivôs de Cruz Alta em composição verdadeira do sensor MSI (R(4)-G(3)-B(2)).



Fonte: Produção da autora.

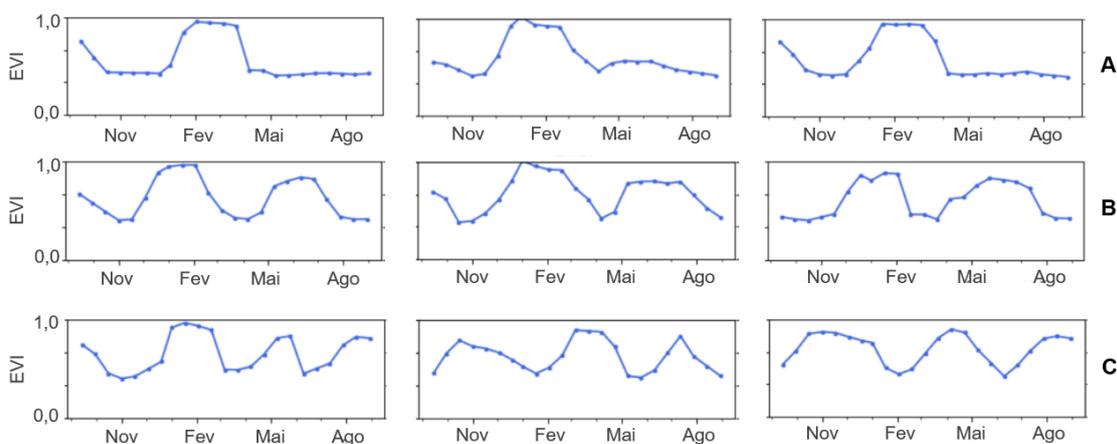
4.4 Classificação da atividade dos pivôs

As séries temporais foram extraídas de acordo com a definição de ano agrícola da Conab (2019), sendo este compreendido entre setembro de um ano e agosto do próximo ano. Dessa forma, três anos agrícolas foram avaliados: 2017/18, 2018/19 e 2019/20.

Além das séries extraídas das amostras, foram também selecionadas as “séries referência”. As chamadas “séries referência” são séries EVI representativas de ciclos agrícolas, incluindo séries de um ciclo anual, dois e três ciclos (Figura 4.3), retiradas, visualmente, do próprio conjunto de amostras e que definem as três classes de ciclos.

No total, para a classificação, foram extraídas 560 séries de referência, sendo 34 de um ciclo agrícola, 302 de dois ciclos e 224 de três ciclos. Além das informações de campo, devido ao baixo número de pivôs conhecidos, também foram visualmente selecionadas mais 560 séries para a validação da classificação, sendo 44 de um ciclo agrícola, 266 de dois e 250 de três ciclos.

Figura 4.3 – Exemplos de séries referência.



A: um ciclo agrícola; B: dois ciclos agrícolas; C: três ciclos agrícolas.

Fonte: Produção da autora.

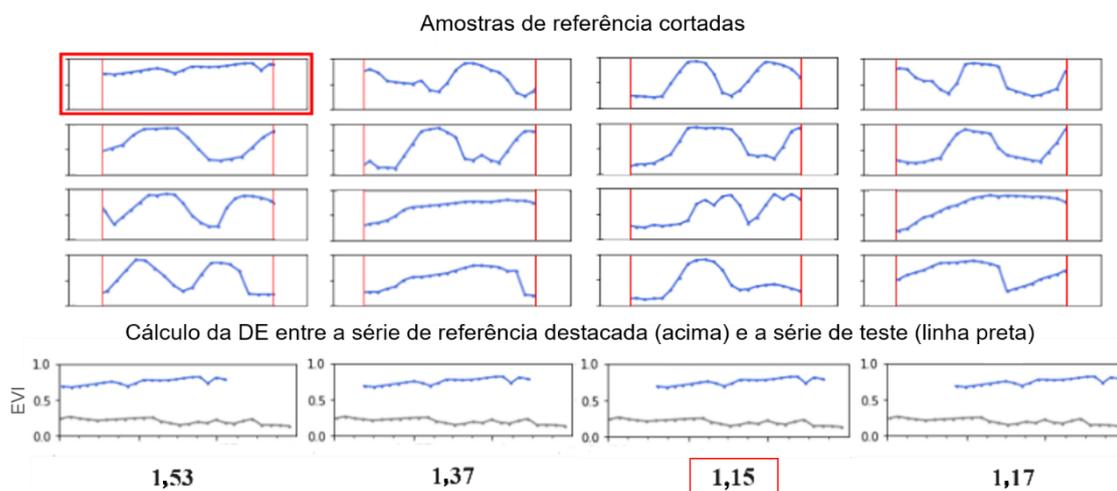
Essas séries não são dependentes de um ano específico, por isso puderam ser utilizadas para comparação entre os anos. Com o auxílio da linguagem de programação Python, uma medida de distância foi utilizada para essa

comparação e posterior classificação (um, dois ou três ciclos agrícolas), tendo sido escolhida a Distância Euclidiana (DE).

Embora seja relativamente simples, a DE é bastante importante pois foi base para o desenvolvimento de várias outras medidas de distância (AGUIAR, 2016). Além disso, visando a superação da sua limitação natural na comparação de séries de diferentes tamanhos, neste trabalho, foi desenvolvida uma metodologia parecida com uma “janela móvel” para conferir maior flexibilidade à dinâmica da DE.

Para a criação dessa janela, 16 dias do início e do final de todas as séries de referência foram retirados, ou seja, duas observações de todas as séries foram eliminadas, diminuindo seu tamanho. Dessa forma, cada série referência atravessa toda a extensão da série amostrada, e a DE é calculada para cada passo, permanecendo como definitiva a menor distância encontrada entre as séries, ou maior similaridade (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Exemplo de funcionamento da janela móvel.



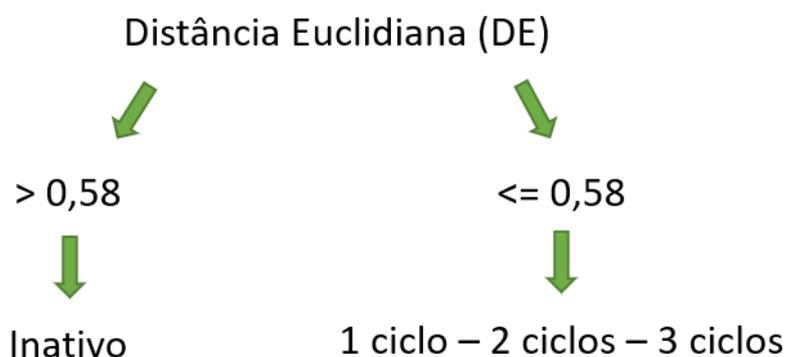
Fonte: Produção da autora.

Conforme demonstrado no exemplo da Figura 4.4, a menor DE encontrada para a primeira série de referência considerada foi de 1,15. No entanto, para que uma série amostrada de um ano agrícola fosse classificada como um dos três diferentes ciclos agrícolas, o valor da DE encontrado deveria ser inferior a um limiar previamente definido. Neste trabalho, o limiar que mais se adequou às amostras, definido empiricamente, foi o de 0,58.

As três classes de ciclos agrícolas (um, dois e três ciclos anuais) foram definidas considerando os padrões de agricultura praticados nestes municípios do Rio Grande do Sul. A quarta classe, de inatividade, foi definida pelos casos em que o limiar não foi atingido para nenhuma das classes de ciclos pré-estabelecidas.

Por meio dessa classificação, então, os pivôs foram classificados quanto à sua ociosidade (inatividade) e intensidade de uso a partir dos ciclos agrícolas anuais, sendo que, em ambos os casos, os pivôs foram classificados não só em sua totalidade, como também em partes da sua própria área (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Esquema da classificação da atividade dos pivôs centrais por meio da DE.



Fonte: Produção da autora.

4.5 Estimativas de uso da água

As lâminas de irrigação utilizadas nas áreas de estudo foram estimadas a partir do método do balanço de água no solo, fornecidas pelo SISDAGRO. Após a determinação das variantes exigidas pela ferramenta, sendo estação meteorológica (Cruz Alta), lâminas variáveis, cultura (soja, milho, trigo ou aveia) e tipo de solo (Latosolo), as lâminas diárias de cada ciclo agrícola foram somadas e designadas para a cultura e o ano correspondente.

Para o cálculo de consumo de água por pivô, foi utilizada a fórmula da Equação 4.1. Na equação, o somatório da lâmina de água utilizada por cada cultura em cada ano representa a variável do seu consumo, em mm; 10 é um fator de conversão de unidades; a área de cada pivô foi calculada em hectares e, por

fim, 0,9 representa 90% de eficiência do equipamento de irrigação. Esse cálculo devolve, finalmente, o consumo de água de cada pivô, em m³.

$$\text{Consumo de água/pivô} = \frac{(\text{consumo da cultura/ano} * 10 * \text{área do pivô})}{0,9} \quad (4.1)$$

Sabendo que o número de pivôs dos quais se tem informações de campo sobre as culturas semeadas é pequeno em relação ao número total de pivôs em estudo, foram realizadas simulações de possíveis cenários agrícolas dessas áreas.

Para a elaboração dos cenários, quatro pontos foram especialmente considerados: o primeiro é de que a ocorrência de um ciclo agrícola é muito baixa, sendo por isso não considerada nas estimativas; no verão, as principais culturas semeadas são milho e soja, sendo estas as culturas avaliadas; no inverno, tem-se aveia e trigo, porém, o inverno é bastante chuvoso nos três municípios, dispensando o uso da irrigação e, por isso, desconsideradas no estudo; por fim, visto que os anos agrícolas iniciam em setembro de um ano e findam em agosto do ano seguinte, e que o plantio da soja ocorre entre outubro e janeiro, apenas uma safra de soja por ano agrícola foi considerada (soja de primeira safra).

Dessa forma, de acordo com a Tabela 4.3, foram avaliadas apenas duas culturas, soja e milho (primeira e segunda safra), e em duas classes de cultivo, dois e três ciclos agrícolas anuais. Os pivôs classificados como três ciclos agrícolas foram considerados separadamente dos de dois ciclos pois, embora culturas como trigo ou aveia dispensem o uso da irrigação, por estarem presentes no inverno, elas obrigatoriamente compõem as séries classificadas como três ciclos, o que muda o número de pivôs por classe em cada ano e suas particularidades, como a área de cada pivô, importante no cálculo de consumo de água (Equação 4.1).

Tabela 4.3 – Cenários utilizados nas estimativas de uso da água.

Dois ciclos agrícolas	
A	Soja – Aveia/Trigo
B	Soja – Milho 2ª safra
Dois ciclos agrícolas	
C	Milho 1ª safra – Milho 2ª safra
D	Milho 1ª safra – Aveia/Trigo
E	Aveia/Trigo – Milho 2ª safra
Três ciclos agrícolas	
F	Soja – Aveia/Trigo – Milho
G	Milho – Aveia/Trigo – Milho

Além disso, para estas estimativas, apenas pivôs classificados como 100% uniformes foram considerados. Isto é, nesta parte do estudo, pivôs que foram diferentemente cultivados (ex.: dois ciclos em uma parte e três ciclos em outra parte do mesmo pivô) ou que apresentaram áreas inativas, não entraram nas estimativas de uso da água.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos pivôs

Em 2017, o monitoramento dos pivôs centrais realizado pela ANA e pela Embrapa demonstrou a presença de 246 pivôs nos três municípios, sendo 46 em Santo Antônio das Missões, 65 em Palmeira das Missões e 135 em Cruz Alta. Em 2019, esses números mudaram para 54, 59 e 164, respectivamente, permanecendo iguais em 2020 (277 no total).

Porém, após a atualização visual com o auxílio de imagens Sentinel-2 de 2021, esses números subiram para 58, 75 e 187, respectivamente. Isso representa um aumento de 30,1% no número de pivôs presentes na área em um período de quatro anos, evidenciando a intensificação da prática de irrigação nesses municípios e a necessidade de monitoramento.

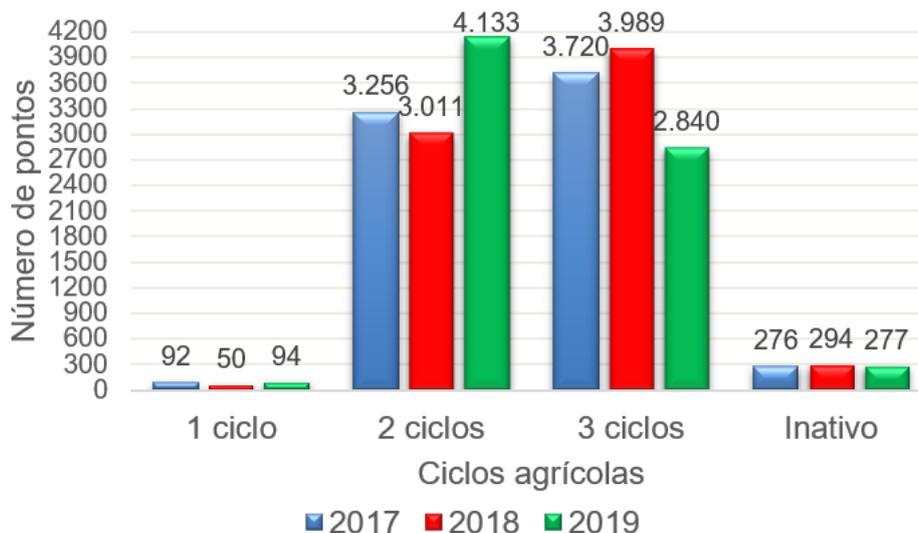
Cruz Alta, município com maior número de pivôs, também apresentou maior diversidade no tamanho dos mesmos: os 187 pivôs variam entre 9 e 229 ha, com uma média 65,4 ha. Em Santo Antônio das Missões, a média foi de 63,2 ha e, por fim, Palmeira das Missões, com 75,3 ha, apresentou a maior média de tamanho dos pivôs. No total, foram estudados 21.343 ha irrigados.

Essas médias estão de acordo com as encontradas a nível nacional, sendo que o tamanho médio e o desvio padrão das áreas irrigadas por pivôs registrados no País foram de $63,76 \pm 43,67$ ha, com um coeficiente nacional de variação do tamanho das áreas irrigadas de 68,49% (GUIMARÃES E LANDAU, 2020).

5.2 Classificação da atividade dos pivôs

Considerando pivôs geometricamente regulares (circulares), a amostragem resultou em um total de 24 pontos por pivô e um total geral de 7.334 pontos. Desses 7.334 pontos, menos de 2% foi classificado como apenas um ciclo agrícola anual nos três anos avaliados, sendo que pontos de dois ciclos agrícolas foram predominantes em 2019 (56,4%) e de três ciclos agrícolas foram predominantes em 2017 e 2018 (50,72% e 54,4%, respectivamente). Quanto à ocorrência de pontos inativos (sem padrão agrícola), 2018 foi o ano com maior valor (4%), e 2017 o ano de menor valor (3,76%) (Figura 5.1).

Figura 5.1 – Pontos classificados como número de ciclos agrícolas anuais.



Fonte: Produção da autora.

Na Tabela 5.1 está apresentada a matriz de confusão para o número de ciclos agrícolas (um, dois e três), considerando os resultados de classificação e as amostras aleatoriamente selecionadas para validação.

Tabela 5.1 – Matriz de confusão da classificação.

		Amostras de validação			
		1	2	3	Total
Classificação	1	25	0	0	25
	2	12	195	3	210
	3	7	71	247	325
	Total	44	266	250	560

A matriz de confusão da classificação resultou em uma exatidão global de 83,4% e um índice Kappa de 0,703 que, com 5% de significância, é significativamente maior do que 0,0. A exatidão do produtor foi de 56,8%, 73,3% e 98,8% para um, dois e três ciclos, respectivamente, enquanto a exatidão do consumidor foi de 100%, 92,9% e 76%, respectivamente.

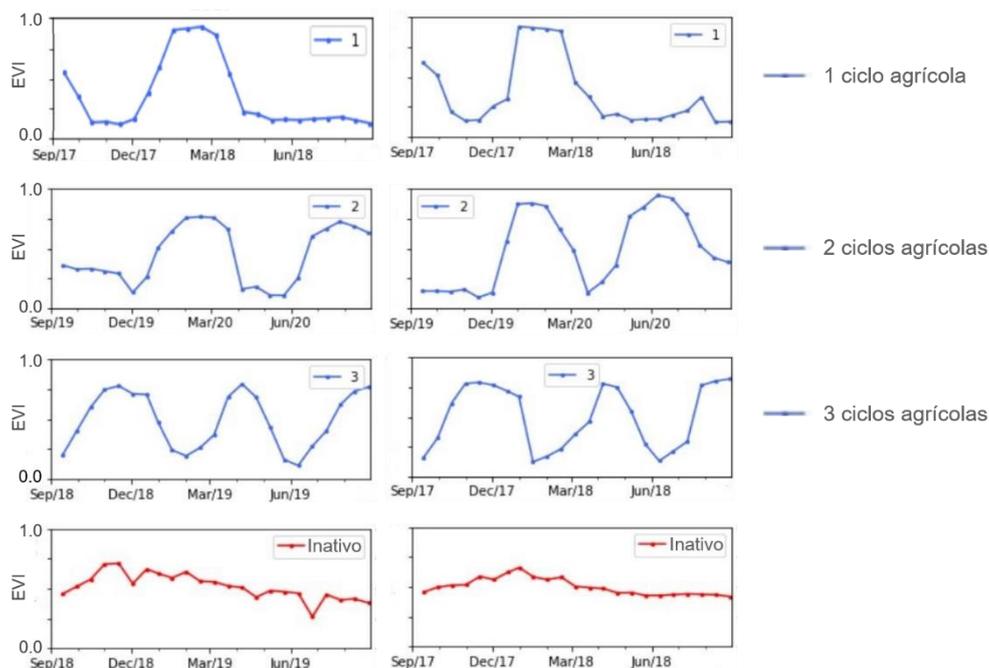
De acordo com os resultados da exatidão do produtor, existe mais confusão entre a classe de um ciclo agrícola com as outras classes, aumentando a exatidão conforme aumenta também o número de ciclos. No entanto, conforme

demonstrado pela Figura 5.1, o número de ocorrências de apenas um ciclo agrícola é bastante baixo, o que também explica a dificuldade encontrada para a seleção de amostras de um ciclo tanto para a classificação quanto para a validação, sendo esta a classe com menor número de amostras em ambos os casos.

Além disso, a maior ocorrência de dois e três ciclos se apresenta também de forma esperada, visto que algumas das vantagens do uso de pivôs centrais, que torna a agricultura independente da ocorrência de chuvas, é justamente a possibilidade de realização de maior número de ciclos agrícolas por ano (MENDES, 1998; RODRIGUES et al., 2017; ANA, 2018, 2019, 2021).

Ademais, considerando a soja, o trigo e o milho como as principais culturas irrigadas do Rio Grande do Sul (FEIX et al., 2016), e que elas são culturas que se distribuem ao longo do ano, soja e milho no verão e trigo no inverno, também se explica a predominância da ocorrência de dois e três ciclos agrícolas anuais: primavera/verão (primeira safra de soja/milho) – outono/inverno (trigo/aveia) – primavera/verão (segunda safra de milho). Na Figura 5.2 estão demonstrados exemplos de séries/pontos classificados.

Figura 5.2 – Exemplos de pontos classificados de acordo com ciclos agrícolas anuais.



Fonte: Produção da autora.

Para que se compreenda a classificação a nível de pivôs (e não pontos amostrados), na Tabela 5.2 está demonstrado o número de pivôs que foram uniformemente classificados, isto é, que foram classificados com apenas uma classe de ciclo agrícola em área total. Para ser considerado uniforme, nesse caso, o pivô teve mais de 75% dos seus pontos classificados com o mesmo número de ciclos agrícolas.

Tabela 5.2 – Número de pivôs uniformemente classificados.

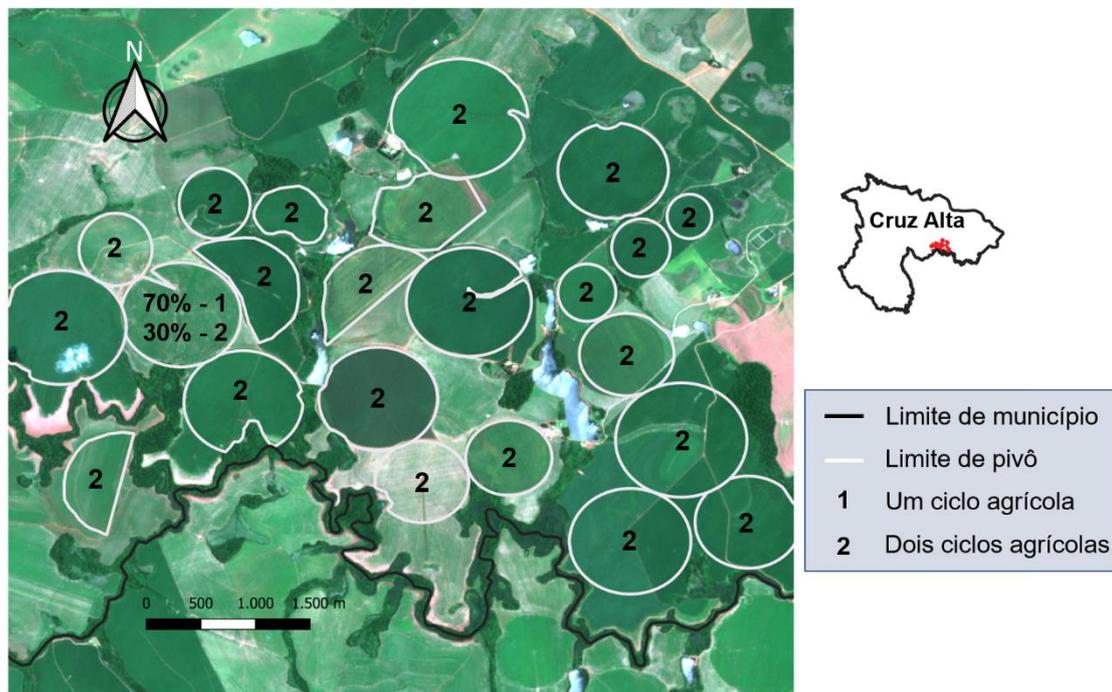
Cidade	Ano	Total de pivôs*	Total de pivôs uniformes	Nº de pivôs uniformes/ciclo			
				1	2	3	Inativo
Cruz Alta	2017	135	143	0	75	67	1
	2018	164	135	0	69	66	0
	2019	164	157	1	102	52	2
Santo Antônio das Missões	2017	46	42	0	9	33	0
	2018	54	51	0	11	38	2
	2019	54	53	0	23	30	0
Palmeira das Missões	2017	65	50	0	24	26	0
	2018	59	51	1	15	33	2
	2019	59	59	0	36	22	1

*Número de pivôs fornecidos pela ANA e Embrapa, sem atualização visual.

Como representado na Tabela 5.2, nota-se que, de modo geral, 92,63% dos pivôs foram uniformemente cultivados durante os três anos avaliados. Particularmente, em cada município e em cada um dos anos, mais de 75% dos pivôs foram uniformemente cultivados, indicando que, embora ocorram pivôs parcialmente cultivados, essa não é uma prática comum nessa região do País.

Além do mais, também no caso dos pivôs uniformemente classificados, fica evidente a baixíssima ocorrência de anos agrícolas com apenas um ciclo de cultivo, sendo comum, em todos os anos avaliados, a ocorrência de dois e três ciclos (Figura 5.3).

Figura 5.3 – Região em Cruz Alta com predominância de dois ciclos agrícolas em 2019 em composição verdadeira do sensor MSI (R(4)-G(3)-B(2)).



Fonte: Produção da autora.

Por outro lado, na Tabela 5.3 está demonstrado o número de pivôs que apresentaram frações de sua área inativas, assim como, dentro desse número, quantos deles apresentaram menos de 25% da sua área com pontos inativos.

Tabela 5.3 – Número de pivôs com frações inativas por ano.

Cidade		Número de pivôs com frações inativas/ano		
		2017	2018	2019
Cruz alta	Total	29	39	38
	<25% da área	22	33	29
Santo Antônio das Missões	Total	21	15	10
	<25% da área	18	12	9
Palmeiras das Missões	Total	19	17	14
	<25% da área	12	10	7

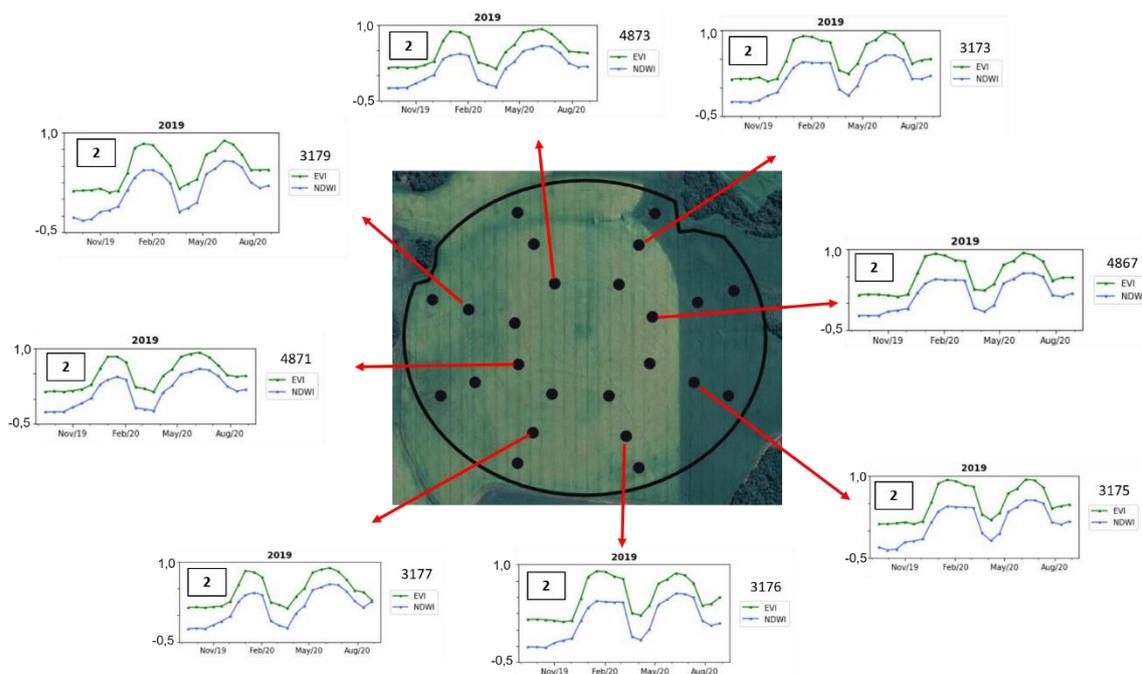
De acordo com a Tabela 5.3, considerando o total de 320 pivôs encontrados após inspeção visual das áreas de estudo, apenas 21,56% do número total de

pivôs apresentou alguma fração de inatividade em 2017, reduzindo para 19,38% em 2019.

No entanto, em todos os municípios e em todos anos, pelo menos a metade dos pivôs que apresentaram frações inativas, apresentaram em menos de 25% da sua área total. Isso pode ser um indicativo de que as áreas inativas, até por não possuírem séries de referência dessa classe, sofrem com erros de classificação provenientes de séries ruidosas ou então de séries que não foram suficientemente bem representadas pelas séries de referência na classificação.

Em contrapartida, para os dez pivôs dos quais se conhecia as culturas cultivadas entre as safras 2019/2020 e 2020/2021, a exatidão global foi de 97,3%. Na Figura 5.4, como exemplo, estão representados alguns pontos classificados de um dos pivôs de Cruz Alta, cujo ano agrícola de 2019 havia sido composto pela combinação de soja, seguida de aveia. A segunda safra de soja realizada após a aveia já é considerada safra 2020/2021 (ano agrícola 2020) e, por isso, não é evidente na classificação, tendo esta corretamente resultado na classe de dois ciclos agrícolas (apenas a soja de primeira safra e a aveia).

Figura 5.4 – Exemplos de pontos classificados de um pivô de Cruz Alta 100% classificado como dois ciclos agrícolas em 2019.

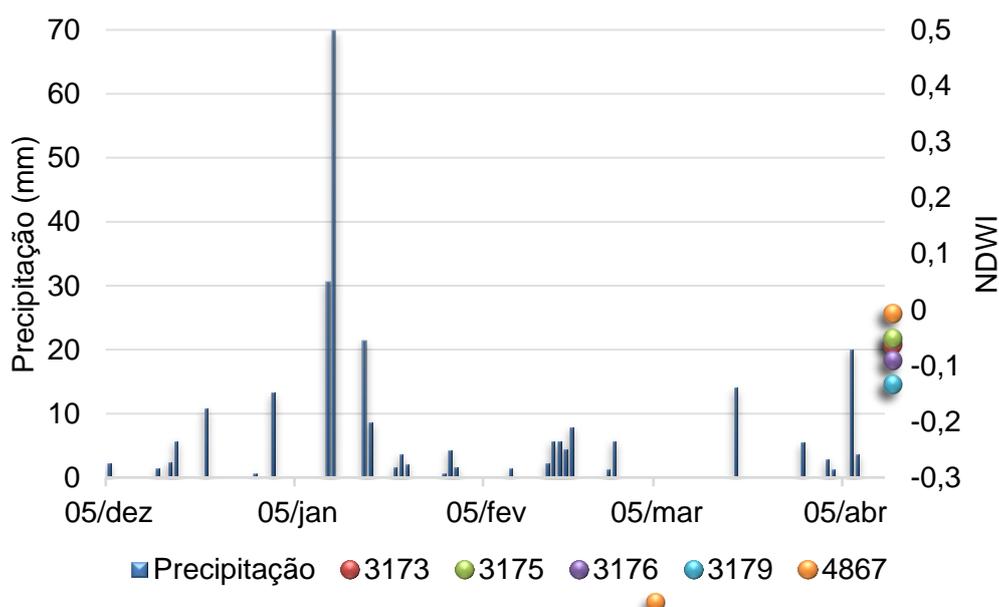


Fonte: Produção da autora.

Ademais, como também representado na Figura 5.4, as séries temporais EVI foram concomitantemente avaliadas com as séries temporais NDWI. A relação entre os dois índices de vegetação se demonstrou diretamente proporcional, com uma correlação de Pearson de 0,94, significativa a 95% de confiança.

Esse resultado vai de acordo com o encontrado por Gonzaga et al. (2011), que indica um aumento progressivo na relação entre o EVI e o NDWI com o aumento da ocorrência de chuvas. Nesse caso, a forte relação encontrada entre os dois índices confirma a presença de áreas irrigadas, visto que o aumento de biomassa (aumento nos valores do EVI) foi acompanhado pelo aumento no conteúdo de água das folhas (aumento nos valores do NDWI), mesmo quando a precipitação não foi suficiente (Figura 5.5).

Figura 5.5 – Precipitação e NDWI de cinco pontos de pivô em Cruz Alta entre 05/12/2019 e 10/04/2020 (safra de soja).



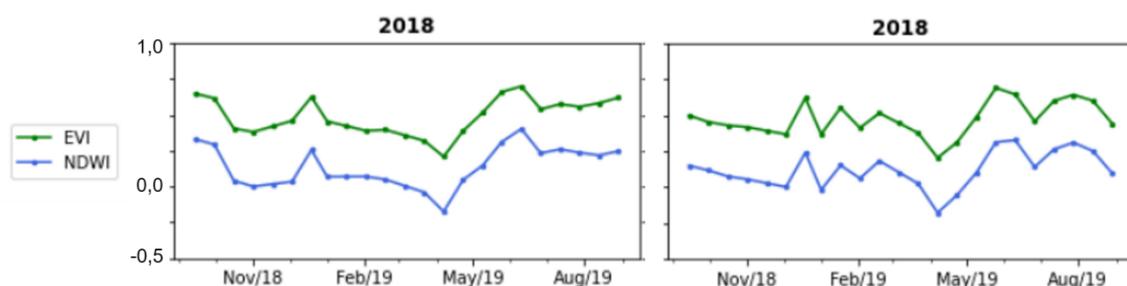
Fonte: Adaptado de SISDAGRO (2022).

Na Figura 5.5, percebe-se que os valores de NDWI permaneceram elevados, entre a segunda quinzena de janeiro e o início de março, mesmo quando não houve, ou houve pouca precipitação. Além disso, a precipitação total entre dezembro e o início de abril, onde se sabe que havia soja no pivô da Figura 5.4, foi de 261,8 mm, que não é suficiente para cobrir a demanda hídrica total da cultura, entre 450 e 850 mm (DOORENBOS & KASSAN, 1979;

REICHARDT, 1987). Foram 95 dias sem chuva e uma temperatura média de 23,01 °C, sendo a máxima de 38,1 °C (SISDAGRO, 2022).

Ao contrário, em pontos classificados como inativos, foram verificados valores de NDWI próximos de 0,0 (Figura 5.6), onde a possível vegetação natural presente na área se desenvolveu, supostamente, apenas com água proveniente de precipitação.

Figura 5.6 – Exemplos de pontos de pivô 100% inativo de Santo Antônio das Missões em 2018.



Fonte: Produção da autora.

5.3 Estimativas de uso da água

Primeiramente, considerando apenas os dez pivôs dos quais são conhecidas as informações de campo do ano agrícola de 2019, foi estimado um uso de 1.263.155,5 m³ de água (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Estimativas de uso da água de pivôs com informações de campo do ano agrícola de 2019.

Pivô	Cidade	Cultura	Área (ha)	Consumo de água (m ³)
1	Santo Antônio das Missões	Soja + Trigo e Aveia	160	300.444,4
2	Palmeira das Missões	Soja + Aveia + Milho	80	447.111,1
3	Palmeira das Missões	Soja + Aveia	48	102.400,0
4	Palmeira das Missões	Soja + Aveia	57	121.600,0
5	Cruz Alta	Soja + Aveia	31	37.200,0
6	Cruz Alta	Soja + Aveia	57	68.400,0

(continua)

Tabela 5.4 – Conclusão.

Pivô	Cidade	Cultura	Área (ha)	Consumo de água (m³)
7	Cruz Alta	Soja + Aveia	17	20.400,0
8	Cruz Alta	Soja + Aveia	50	60.000,0
9	Cruz Alta	Soja + Aveia	41	49.200,0
10	Cruz Alta	Soja + Aveia	47	56.400,0
Total				1.263.155,5

Uma vez que, para o restante dos pivôs, apenas aqueles uniformemente classificados foram considerados, de acordo com a Tabela 5.2, foram analisados 143, 135 e 157 pivôs em Cruz Alta para os anos de 2017, 2018 e 2019, respectivamente, 42, 51 e 53 em Santo Antônio das Missões e 50, 51 e 59 em Palmeira das Missões.

Na Tabela 5.5, estão representados os consumos de água por município, ano e cenário (descritos na Tabela 4.3 e ao final da 5.5). Como demonstrado, o maior consumo se deu em Cruz Alta, de 46.011.747 m³ de água para o cenário B nos três anos (soja + milho); o segundo maior consumo foi de 17.109.604 m³, também no cenário B, em Palmeira das Missões, e o último de 15.901.367 m³, no cenário F (soja + aveia/trigo + milho), em Santo Antônio das Missões.

Tabela 5.5 – Estimativas de uso da água em diferentes cenários.

Santo Antônio das Missões						
2017		2018		2019		Total (m³)
Cenário	Consumo (m³)	Cenário	Consumo (m³)	Cenário	Consumo (m³)	
A	546.985	A	734.391	A	2.345.145	3.626.521
B	856.210	B	2.108.508	B	6.375.600	9.340.317
C	762.755	C	1.752.692	C	6.590.760	9.106.207
D	453.530	D	378.575	D	2.560.305	3.392.410

(continua)

Tabela 5.5 – Conclusão.

Santo Antônio das Missões						
2017		2018		2019		Total (m³)
Cenário	Consumo (m³)	Cenário	Consumo (m³)	Cenário	Consumo (m³)	
E	309.225	E	1.374.117	E	4.030.455	5.713.797
F	2.347.672	F	5.963.082	F	7.590.613	15.901.367
G	2.091.425	G	4.956.796	G	7.846.777	14.894.998
Palmeira das Missões						
2017		2018		2019		Total (m³)
Cenário	Consumo (m³)	Cenário	Consumo (m³)	Cenário	Consumo (m³)	
A	1.495.595	A	982.259	A	4.394.975	6.872.830
B	2.341.095	B	2.820.162	B	11.948.346	17.109.604
C	2.085.566	C	2.344.252	C	12.351.572	16.781.391
D	1.240.066	D	506.350	D	4.798.201	6.544.617
E	845.500	E	1.837.902	E	7.553.371	10.236.773
F	2.580.466	F	6.164.144	F	6.289.733	15.034.343
G	2.298.810	G	5.123.928	G	6.501.995	13.924.734
Cruz Alta						
2017		2018		2019		Total (m³)
Cenário	Consumo (m³)	Cenário	Consumo (m³)	Cenário	Consumo (m³)	
A	4.295.216	A	4.004.597	A	10.222.305	18.522.119
B	6.723.416	B	11.497.584	B	27.790.746	46.011.747
C	5.989.560	C	9.557.336	C	28.728.612	44.275.509
D	3.561.360	D	2.064.350	D	11.160.171	16.785.881
E	2.428.200	E	7.492.986	E	17.568.441	27.489.628
F	5.447.650	F	10.915.562	F	15.649.200	32.012.412
G	4.853.043	G	9.073.532	G	16.177.320	30.103.895

Cenário A: soja + aveia/trigo; B: soja + milho; C: milho + milho; D: milho + aveia/trigo; E: aveia/trigo + milho; F: soja + aveia/trigo + milho e G: milho + aveia/trigo + milho.

Como esperado, o maior consumo foi do município com maior número de pivôs (Cruz Alta), seguido do segundo município com maior número e também com maior média de tamanho de pivô (Palmeira das Missões). No entanto, o consumo por ano é ainda maior do que o apresentado em apenas um cenário, visto que, sabendo que haviam pivôs uniformes de dois e três ciclos, então, dois cenários devem ocorrer simultaneamente: um de dois ciclos, outro de três.

Ademais, dentre os cenários que se destacaram, também fica evidente a presença de ambas as culturas principais, soja e milho, sendo menores os consumos apresentados pelos cenários que apresentaram apenas uma delas.

De acordo com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, Sabesp (2022), o consumo de água por pessoa e por dia no Brasil pode atingir aproximadamente 200 litros. Somando as populações dos três municípios em estudo, tem-se um total de 102.458 pessoas, o que resultaria em um consumo de água de 7.479.434 m³ por ano.

Se forem considerados os cenários de maior consumo para os três municípios, B (dois ciclos) e F (três ciclos), haverá um consumo total para os três anos de 25.241.684 m³ em Santo Antônio das Missões, 32.143.947 m³ em Palmeira das Missões e 78.024.159 m³ em Cruz Alta ou, no total, 135.409.790 m³, similares ao consumo encontrado por Sano et al. (2005) para o Distrito Federal, de 40,94 milhões de m³/ano. Isso representa, finalmente, 6x mais água na agricultura irrigada do que no consumo pessoal da população dos três municípios.

Toda essa quantidade de água utilizada cria, claramente, um alerta para o monitoramento da irrigação. No entanto, grande parte dessa água, depois de passar pela planta, retorna à atmosfera pela transpiração, juntamente com a água evaporada da superfície. O excedente da irrigação, quando ocorre, passa por infiltração e percola, abaixo da zona radicular, alimentando lençóis freáticos e/ou nascentes e realimentando o ciclo hidrológico. Além disso, a água que é, efetivamente, utilizada pela agricultura, acaba indiretamente também sendo parte do consumo humano, na forma de alimentos.

Por este motivo, de acordo com a Secretaria Nacional de Irrigação, SENIR (2012), é possível inferir que o consumo quantitativo de água na irrigação é

bastante relativo, pois a utilização de recursos hídricos presentes na atmosfera terrestre, pelo desenvolvimento fisiológico das culturas, promove apenas o seu deslocamento temporal e espacial, assim como ocorre naturalmente em florestas.

Contudo, mais do que a quantidade de água utilizada, a prática da irrigação pode trazer complicações como a quantidade de água contaminada por fertilizantes, defensivos e herbicidas. Segundo a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba, CODEVASF (2017), a contaminação das águas superficiais pelo excedente da irrigação, notadamente de rios e córregos, é rápida e acontece imediatamente após a irrigação, ocorrendo de forma mais lenta em águas subterrâneas.

Por este motivo, a prática da irrigação deve ser fiscalizada e praticada com métodos sustentáveis. Para torná-la sustentável, várias alternativas são aplicáveis, como a adição de areia no solo para evitar a saturação, desligamento da água nos períodos que a planta está suficientemente irrigada, evitando desperdícios, manter o solo coberto, cavar valas de drenagem para escoamentos de água que evitem erosões do solo, criação de cisternas para a captação da água da chuva e/ou reservatórios, fazer o uso de biopesticidas, adubos verdes, etc.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, três objetivos foram propostos: (i) a caracterização dos mesmos presentes nos três municípios de estudo (Cruz Alta, Palmeira das Missões e Santo Antônio das Missões); (ii) a aplicação de uma metodologia de processamento de séries temporais para a classificação da ociosidade de pivôs centrais e do seu número de ciclos agrícolas e, por fim, (iii) a criação de cenários que permitissem estimativas da quantidade de água usada para irrigação pelos pivôs da área de estudo.

Após atualização e caracterização dos pivôs, foi encontrado um total de 320 pivôs nos três municípios, evidenciando um crescimento de 30% em um período de quatro anos, com tamanho médio de 68 hectares e um total de 21.343 ha irrigados.

A exatidão global de 83,4% da classificação demonstrou o potencial da Distância Euclidiana adaptada com a metodologia da “janela móvel” para determinar a atividade e o número de ciclos agrícolas dos pivôs. Visto que a metodologia é formada por uma proposta relativamente simples, ajustes no limiar e a adição de séries de referência com os padrões agrícolas de outras áreas possibilitam a aplicação da mesma também em escalas maiores.

No entanto, o uso de maior quantidade de dados de campo poderia melhorar os resultados, assim como outros métodos de classificação podem ser testados no futuro, como o DTW ou técnicas de *deep learning* para determinar o melhor desempenho.

Dos resultados da classificação, obteve-se que, em sua maioria, os pivôs foram uniformemente cultivados durante os três anos avaliados (92,63%), sendo dois e três ciclos agrícolas os números de ciclos predominantemente encontrados. Em cada um dos três municípios, mais de 75% dos pivôs foram uniformemente cultivados, indicando que, embora ocorram pivôs parcialmente cultivados em outras regiões do país, essa não é uma prática comum na área de estudo.

A inatividade dos pivôs também se mostrou muito pequena, sendo que pelo menos a metade dos pivôs que apresentaram frações inativas, apresentaram em menos de 25% da sua área total. No entanto, devido à ausência de séries

de referência inativas, o método pode ter apresentado dificuldade de classificação, sendo uma solução a adição também de séries de referência da classe de inatividade.

A avaliação da relação entre os índices EVI e NDWI se apresentou diretamente proporcional, com uma forte correlação de Pearson de 0,94. Essa correlação, que se manteve proporcional mesmo em épocas de falta de chuva, evidencia o potencial do NDWI na identificação de áreas irrigadas, já que aponta para a presença de água nas folhas que, se não é proveniente de precipitação, é artificialmente aplicada pela irrigação.

Neste sentido, maiores certezas poderiam também ser obtidas se as séries temporais NDWI dos pivôs fossem comparadas com séries NDWI de áreas de sequeiro da mesma região. Dessa forma, visto que a ocorrência de chuvas seria similar, seria possível a verificação clara das diferenças de comportamento do índice nos diferentes manejos da água na agricultura (irrigação artificial e sequeiro).

Finalmente, quanto às estimativas de uso da água, percebeu-se que os cenários que se destacaram contam com a presença de ambas as culturas principais, soja e milho, sendo menores os consumos apresentados pelos cenários que apresentaram apenas uma delas. No pior dos cenários (com maior consumo), encontrou-se um consumo total de 135.409.790 m³, que representa 6x mais água na agricultura irrigada do que no consumo pessoal direto da população dos três municípios analisados.

Essa quantidade, embora elevada, deve ser analisada levando em consideração o fato de que a água utilizada na agricultura acaba por ser também utilizada pela população, indiretamente, na forma de alimentos. Além disso, tem-se o ciclo natural da água, onde, no caso da irrigação, parte fica na planta, parte evapora pela transpiração vegetal e, ainda, parte é infiltrada no solo e retorna para corpos d'água.

Porém, subentende-se também que quanto maior a quantidade de água utilizada na irrigação, maiores as chances de contaminação da mesma. Por isso, torna-se cada vez mais necessário monitorar, dimensionar e manejar os

sistemas de irrigação com maior eficiência e sustentabilidade, visto que métodos sustentáveis mantêm as mesmas qualidades e eficiência da irrigação convencional, ao mesmo tempo que não causam grandes impactos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. 2. ed. Brasília: ANA, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017; 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/e2d38e3f-5e62-41ad-87ab-990490841073>. Acesso em: 16 fev. 2021.

AGROSMART. **3 formas de fazer o manejo da irrigação na lavoura**. Disponível em: <https://agrosmart.com.br/blog/3-formas-de-fazer-o-manejo-da-irrigacao-na-lavoura/>. Acesso em: 21 fev. 2021.

AGUIAR, J. L. N. **Medidas de similaridade entre séries temporais**. 2016. 75 p. Dissertação (Mestrado em Informática) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**. Roma, Itália: FAO, 1998. 300p.

ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Manejo de água em agricultura irrigada**. Teresina: EMPRAPA-UEPAE, 1992. 37 p.

ARAÚJO, E. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Análise de agrupamento da variabilidade espacial da produtividade da soja e variáveis agrometeorológicas na região oeste do Paraná. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 4, 2013.

ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL. **Clima, temperatura e precipitação**. 2020. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>. Acesso em: 08 fev. 2022.

BAYMA, A. P.; SANO, E. E. Séries temporais de índices de vegetação (NDVI e EVI) do sensor MODIS para detecção de desmatamentos no bioma cerrado. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 21, n. 4, p. 797-813, 2015.

BAZZI, H.; BAGHDADI, N.; IENCO, D.; HAJJ, M. E.; ZRIBI, M.; BELHOUCLETTE, H.; ESCORIHUELA, M. J.; DEMAREZ, V. Mapping irrigated areas using Sentinel-1 time series in Catalonia, Spain. **Remote Sensing**, v. 11, n. 15, 2019.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, D. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, V. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p. 831–839, 2004.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa: UFV, 1989. 596p.

CARLSON, M. P. The Nebraska Center-Pivot Inventory: an example of operational satellite remote sensing on a long-term basis. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, v. 55, p. 587–590, 1989.

CENTRAL IRRIGAÇÃO. **Pivô**. 2018. Disponível em: <http://centralirrigacao.com.br/pivo/>. Acesso em: 28 jan. 2020.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **PIB do agronegócio brasileiro**. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 07 fev. 2022.

CHEN, Y.; LU, D.; LUO, L.; POKHREL, Y.; DEB, K.; HUANG, J.; RAN, Y. Detecting irrigation extent, frequency, and timing in a heterogeneous arid agricultural region using modis time series, landsat imagery, and ancillary data. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 197–211, 2018.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA (CODEVASF). **Contaminação dos recursos hídricos**. 2017. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/linhas-de-negocio/irrigacao/impactos-ambientais/contaminacao-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 10 mar. 2022.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BASICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Em casa**. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=595>. Acesso em: 07 mar. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Calendário de plantio e colheita de grãos no Brasil 2019**. Conab, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/outras-publicacoes/item/7694-calendario-agricola-plantio-e-colheita>. Acesso em: 08 fev. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Conab, 2020; 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 07 fev. 2022.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). **PIB do Agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020**. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/boletins/pib-do-agronegocio->

[alcanca-participacao-de-26-6-no-pib-brasileiro-em-2020#_ftn1](#). Acesso em: 07 fev. 2022.

CUNHA, G. R. **La Niña e a agricultura no Sul do Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, [1999]. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/agromet/elninolanina/plantar.html>. Acesso em: 08 fev. 2022.

EVANS, R. G. **Center pivot irrigation**. Sidney, MT, USA: USDA, 2001.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A.H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 235p.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **SENTINEL-2**. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload/resolution-and-swath>. Acesso em: 08 mar. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): managing systems at risk**. Roma: FAO; Londres: Earthscan, 2011. 285 p. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2022.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Land use**. Disponível em: <http://www.fao.org/ag/agn/nutrition/Indicatorsfiles/Agriculture.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2022.

FEIX, R. D.; LEUSIN JÚNIOR, S.; AGRANONIK; C. **Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul**: 2016. Porto Alegre: FEE, 2016.

FERREIRA, E.; TOLEDO, J. H.; DANTAS, A. A. A.; PEREIRA, R. M. Cadastral maps of irrigated areas by center pivots in the state of Minas gerais, using CBERS-2B/CCD satellite imaging. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 771-780, 2011.

FERREIRA, K R.; QUEIROZ, G. R.; VINHAS, L.; MARUJO, R. F. B.; SIMOES, R. E. O.; PICOLI, M. C. A.; CAMARA, G.; CARTAXO, R.; GOMES, V. C. F.; SANTOS, L. A.; SANCHEZ, A. H.; ARCANJO, J. S.; FRONZA, J. G.; NORONHA, C. A.; COSTA, R. W.; ZAGLIA, M. C.; ZIOTI, F.; KÖRTING, T. S.; SOARES, A. R.; CHAVES, M. E. D.; FONSECA, L. M. G. Earth observation data cubes for Brazil: requirements, methodology and products. **Remote Sensing**, v. 12, 2020.

FLOSS, E.L. Manejo forrageiro de aveia (*Avena sp.*) e azevem (*Lolium sp.*). In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGEM, 9., 1988, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1988. p. 231-268.

GAO, B. C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266, 1996.

GONZAGA, E. P.; SANTOS, V. V.; NICÁCIO, R. M. Análise do comportamento do NDVI e NDWI em períodos de diferentes intensidades pluviométricas no Sertão alagoano. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011.

GUAN, X.; HUANG, C.; LIU, G.; MENG, X.; LIU, Q. Mapping rice cropping systems in Vietnam using an NDVI-based time-series similarity measurement based on DTW distance. **Remote Sensing**, v. 8, n. 1, 2016.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. Monitoramento da agricultura irrigada em tempo real. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: INPE, 2015. p. 3519-3525. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0693.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. **Georreferenciamento dos pivôs centrais de irrigação no Brasil: ano base 2020**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. 63 p.

GUSSO, A.; FORMAGGIO, A. R.; RIZZI, R.; ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T. Estimativa de áreas de cultivo de soja por meio de dados Modis/Evi. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 425-435, 2012.

HARDISKY, M. A.; KLEMAS, V.; SMART M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of spartina alterniflora canopies. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 49, p. 77-83, 1983.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. J. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440-451, 1997.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C. **MODIS Vegetation Index (MOD13) algorithm theoretical basis document**. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 1999. 129 p.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção agrícola municipal 2020**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível

em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/pesquisa/14/10193>. Acesso em: 08 fev. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **produção agrícola municipal 2019**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/pesquisa/14/10193>. Acesso em: 25 fev. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema de contas regionais**. Rio de Janeiro: IBGE. 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/pesquisa/10060/60147?localidade1=0&indicador=60147&tipo=ranking>. Acesso em: 25 fev. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama**. Rio de Janeiro: IBGE. 2020; 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama>. Acesso em: 25 fev. 2022.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598p.

KUPLICH, T. M.; MOREIRA, A.; FONTANA, D. C. Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 55, p. 1116 - 1123, 2013.

LIMA, J. E. F. W.; SANO, E. E.; SILVA, E. M.; LOPES, T. S. S. Levantamento da área irrigada por pivô central no cerrado por meio de análise de imagens: uma contribuição para a gestão dos recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRHidro, 2007. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/19/0c8e49a6987833664a04ef3132f81926_34e70e0f0b7bf97950ac8d91fdef280d.pdf. Acesso em: 12 fev. 2021.

MARCHETTI, D. **Irrigação por pivô central**. Brasília, EMBRAPA-ATA, 1983. 23 p.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, H.R.; SILVA, W.L.C. **Manejo da irrigação em hortaliças**. Brasília, EMBRAPA-CNPQ, 1986. 12 p.

MENDES, A. A. T. Irrigação: tecnologia e produtividade. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FRUTICULTURA IRRIGADA, 1998, Jales, SP. **Anais...** 1998.

OLIVEIRA, L. F. C.; OLIVEIRA, R. Z.; BORGES, L. B.; WEHR, T. R.; BONOMO, R. Coeficiente de cultura e relações hídricas do cafeeiro, cultivar Catucaí, sob dois sistemas de manejo de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 154-162, 2007.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **World population prospects 2019**. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>. Acesso em: 07 fev. 2022.

OZDOGAN, M.; YANG, Y.; ALLEZ, G.; CERVANTES, C. Remote sensing of irrigated agriculture: opportunities and challenges. **Remote Sensing**, v. 2, n. 9, p. 2274–2304, 2010.

PAGEOT, Y.; BAUP, F.; INGLADA, J.; BAGHDADI, N.; DEMAREZ, V. Detection of irrigated and rainfed crops in temperate areas using Sentinel-1 and Sentinel-2 time series. **Remote Sensing**, v. 12, n. 18, 2020.

PONZONI, F. J.; SHIMBUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2.ed. São José dos Campos: Oficina de Textos, 2012. 176 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 178p.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F.; CHRISTOFIDIS, D. Agricultura irrigada e produção sustentável de alimento. In: RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, A. F. (Ed.). **Agricultura irrigada**. Brasília, DF: INOVAGRI, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/168474/1/Agricultura-Irrigada.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2021.

RODRIGUES, M. L.; KÖRTING, T. S.; QUEIROZ, G. R. Sistema para detecção automática de pivôs usando dados de uso e cobertura da terra. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 4, 2021.

ROUX, G. **Ancient Iraq**. 3.ed. East Rutherford, NJ: Penguin Books, 1993.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1974. **Proceedings...** 1974. p. 3010-3017.

RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, J. C. Sensoriamento remoto aplicado à agricultura. In: MORAES, E. C.; ÁVILA, J. (Ed.). **Curso de uso do sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente**. São José dos Campos, SP: INPE, 2002. Disponível em: http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.14/doc/CAP9_MAMoreira.pdf. Acesso em: 12 fev. 2021.

SANO, E. E.; LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M.; OLIVEIRA, E. C. Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no Distrito Federal entre 1992 e 2002. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 508-515, 2005.

SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J. **Latossolos**. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soles_tropicais/arvore/CONTAG01_11_2212200611540.html. Acesso em: 19 fev. 2021.

SARAIVA, M.; PROTAS, E.; SALGADO, M.; SOUZA, C. Automatic mapping of center pivot irrigation systems from satellite images using deep learning. **Remote Sensing**, v. 12, n. 3, 558, 2020.

SENTINEL-HUB. **NDWI Normalized Difference Water Index**. 2022. Disponível em: <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/sentinel-2/ndwi/>. Acesso em: 30 mar. 2022.

SILVA, M. R. **Uso de séries temporais do sensor MODIS para identificar diferentes culturas agrícolas**. 2018. 89p. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

SILVEIRA, J. M. C.; LIMA JÚNIOR, S.; SAKAI, E.; MATSURA, E. E.; PIRES, R. C. M.; ROCHA, A. M. Identificação de áreas irrigadas por pivô central na sub-bacia Tambaú Verde utilizando imagens CCD/CBERS. **Irriga**, v. 18, n. 4., p. 721-729, 2013.

SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO NA AGROPECUÁRIA (SISDAGRO). **Balço hídrico de cultivo e perda de produtividade irrigado**. 2022. Disponível em: <http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhcirrigado>. Acesso em: 10 mar. 2022.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS (SENIR). **Agricultura irrigada sustentável e o ciclo hidrológico**. 2012. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/irrigacao/publicacoes-irrigacao>. Acesso em: 10 mar. 2022.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the relationship of NDVI with Leaf Area Index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, p. 244-255, 2005.

ZHANG, C.; YUE, P.; DI, L.; WU, Z. Automatic identification of center pivot irrigation systems from Landsat images using convolutional neural networks. **Agriculture**, v. 8, n. 10, 147, 2018.

ZANON, A.J.; WINCK, J. E. M.; STRECK, N. A.; ROCHA, T. S. M.; CERA, J. C.; RICHTER, G. L.; LAGO, I.; SANTOS, P. M.; MACIEL, L. R.; GUEDES, J. V. C.; MARCHESAN, E. Desenvolvimento de cultivares de soja em função do grupo de maturação e tipo de crescimento em terras altas e terras baixas. **Bragantia**, v. 74, n. 4, p. 400-411, 2015.