

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

MARCELO ALMEIDA BASTOS

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA O MAPEAMENTO DE LAVOURAS DE ARROZ
IRRIGADO NA BACIA DO RIO GRAVATAÍ NO ESTADO DO RIO GRANDE DO
SUL**

Porto Alegre, 2014

MARCELO ALMEIDA BASTOS

ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA O MAPEAMENTO DE LAVOURAS DE
ARROZ IRRIGADO NA BACIA DO RIO GRAVATAÍ NO ESTADO DO RIO GRANDE
DO SUL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para obtenção do grau de Mestre em Sensoriamento Remoto.

Linha de pesquisa: Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento

Orientadora: Profa. Dra. Denise Cybis Fontana

Coorientador: Dr. Eliseu José Weber

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Prof^a. Denise Fontana pela oportunidade, paciência e dedicação na orientação. Ao Dr. Eliseu Weber pela dedicada coorientação e todas as contribuições, sugestões e análises detalhadas e pertinentes.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia pelas várias chances oferecidas ao longo de minha vida discente. Ao Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos colegas, professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pela convivência e colaboração, tanto nos momentos difíceis quanto nas ocasiões divertidas.

Aos familiares mais distantes, aos amigos e amigas de ontem e de sempre, aos colegas de trabalho, pelos conselhos, pela amizade sincera e pelo companheirismo.

Aos meus pais, Alaide e Fernando, pela oportunidade ímpar de poder me dedicar aos estudos e pelo legado de valores inculcados em minha personalidade, responsáveis pela minha formação como ser humano e como cidadão. Aos meus irmãos, Fernanda, André e Renata pela amizade fraterna e pelo eterno aprendizado da convivência familiar.

À minha família, Leticia, Marina e Pedro por abrirem mão de minha presença diária, pela compreensão e pelo afeto demonstrado durante esta travessia, nem sempre por mares calmos e tranquilos, verdadeira prova de amor incondicional.

Ao Ser Superior, quais sejam os nomes pelo qual o chamamos, minha profunda gratidão por tudo que a vida tem me dado.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi o de avaliar a aplicação de dois índices de vegetação, NDVI e NDWI, para fins de mapeamento de áreas de arroz irrigado a partir de chaves de classificação temporal. A área do estudo localiza-se na planície costeira interna do Rio Grande do Sul, compondo-se de lavouras de arroz cultivadas no perímetro de irrigação do projeto de assentamento Viamão, região agrícola pertencente à bacia hidrográfica do rio Gravataí. Obtiveram-se imagens digitais de três sistemas sensores, TM (satélite Landsat-5), LISS-III (satélite IRS-P6) e OLI (satélite Landsat-8) para o período compreendido entre primeiro de julho de 2008 e 30 de junho de 2014, correspondendo a seis safras agrícolas. Os dois índices foram calculados para cada cena após o registro geométrico das imagens com a base cartográfica oficial, permitindo avaliar a concordância do mapeamento a partir de imagens de referência de campo. Os padrões de variação temporal dos dois índices de vegetação para as seis safras agrícolas foram analisados para fornecer os parâmetros utilizados na escolha dos limiares dos algoritmos de classificação temporal. As duas chaves de classificação geraram mapas temáticos de uso da terra com duas classes cada: arroz e não arroz. Posteriormente, o resultado do mapeamento para três safras agrícolas sucessivas (2009/10, 2010/11 e 2011/12) foram comparados com a referência e procedida análise da matriz de confusão. Os valores resultantes da análise de concordância ficaram em 77%, 63% e 77% de exatidão global, respectivamente para cada safra considerando o algoritmo do NDVI, e de 88%; 59% e 76%, respectivamente para o algoritmo do NDWI. A análise de discordância evidenciou que a maior parte do erro dos dois algoritmos se deveu à quantidade da discordância, com pouca ou nenhuma discordância na alocação, e que a metodologia empregada pode ser utilizada para auxiliar no mapeamento do plantio de arroz irrigado na área de estudo.

Palavras-chave: Análise de discordância. Sensoriamento remoto. TM/Landsat5. LISS-III/IRS-P6. OLI/Landsat8.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate two vegetation indexes, NDVI and NDWI, for mapping paddy rice from temporal classification algorithms. The study area is located in the inner coastal plain of Rio Grande do Sul, consisting of crops of paddy rice in the irrigation perimeter of settlement Viamão, agricultural region in the basin of rio Gravataí. Digital images were obtained from three sensors, TM (satellite Landsat-5), LISS-III (satellite IRS-P6) and OLI (satellite Landsat-8) for the period from 1 July 2008 and June 30, 2014, corresponding to six agricultural harvests. The two indices were calculated for each scene after the geometric registration of images with the official cartographic base, allowing the correlation mapping from field reference images. The patterns of temporal variation of the two indices of vegetation for six agricultural crops were analyzed to provide the parameters used in the choice of thresholds for temporal classification algorithms. The algorithms generated thematic maps of land use with two classes each: rice and no rice. Subsequently, the result of the mapping for three successive agricultural harvests (2009/10, 2010/11 and 2011/12) were compared with the reference and carried discordance. The resulting of accuracy assessment were in 77%, 63% and 77% of overall accuracy, respectively for each crop considering the NDVI algorithm, and 88%; 59% and 76%, respectively for the NDWI algorithm. The analysis of discordance showed that most of the error of the two algorithms was due to the quantity of disagreement, with little or no disagreement on allocation of disagreement, and that the methodology employed can be used to assist in mapping paddy rice in study area.

Keywords: Analysis of disagreement. Remote sensing. TM/Landsat5. LISS-III/IRS-P6. OLI/Landsat8.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Caracterização do cultivo de arroz irrigado	18
2.2 Sensoriamento remoto e agricultura	21
2.2.1 Sensoriamento remoto na faixa do espectro solar	22
2.2.2 Comportamento espectral dos alvos agrícolas.....	23
2.3 Sistemas sensores orbitais.....	26
2.3.1 Características das imagens de sensoriamento remoto.....	26
2.3.2 Sistema IRS	27
2.3.3 Sistema Landsat.....	28
2.3.3.1 Plataforma Landsat5	29
2.3.3.2 Plataforma Landsat8	29
2.3.4 Comparação entre os sistemas sensores	30
2.3.5 Análise e processamento de imagens para monitoramento agrícola	31
2.4 Índices de vegetação	33
2.4.1 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)	34
2.4.2 Índice de umidade da vegetação por diferença normalizada (NDWI)	34
2.5 Sensoriamento remoto em áreas úmidas.....	36
2.5.1. Caracterização das áreas úmidas	36
2.5.2. Sensoriamento remoto do arroz irrigado	37
2.6 Avaliação da acurácia da classificação	40
3 METODOLOGIA.....	42
3.1 Área de estudo	42
3.2 Período de estudo	43
3.3. Fluxograma de trabalho.....	43
3.4. Obtenção das imagens e processamento digital.....	44

3.4 Perfis temporais dos índices de vegetação	45
3.5 Determinação das chaves de classificação	46
3.6 Avaliação da acurácia do mapeamento.....	47
4 RESULTADOS	49
4.1 Perfil temporal dos índices de vegetação.....	49
4.1.1 Conjunto de imagens analisados	49
4.1.2 Resultados dos índices para os seis usos da terra	50
4.1.2 Resultados dos índices por safra agrícola.....	51
4.1.3 Perfil temporal dos usos da terra.....	58
4.2. Perfil temporal do arroz irrigado	59
4.2.1 Resultados dos índices de vegetação para a cultura do arroz	60
4.2.2 Determinação dos limiares para o mapeamento do arroz.....	61
4.3 Análise da acurácia dos algoritmos de mapeamento	63
4.3.1 Análise de discordância da safra 2009/2010.....	65
4.3.2 Análise de discordância da safra 2010/2011	68
4.3.3 Análise de discordância da safra 2011/2012.....	71
5 CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS.....	76
ANEXOS	82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Zoneamento agrícola para a cultura do arroz irrigado no RS com destaque para a região do estudo (adaptado de EMBRAPA, 2014).	20
Figura 2 - Espectro eletromagnético com destaque para a faixa de comprimentos de onda correspondente ao fluxo de emissão solar no intervalo do visível (Adaptado de Moraes, 1999).	21
Figura 3 - Curvas espectrais dos principais alvos agrícolas e a localização das bandas dos três sistemas orbitais utilizados neste estudo.	23
Figura 4 - Comportamento espectral típico da vegetação verde e sadia (Adaptado de Jensen, 2009).	25
Figura 5 - Mapa de localização da área de estudo.	42
Figura 6 - Mapa da área de estudo com a localização das amostras dos principais tipos de uso da terra encontrados na região.	46
Figura 7 - Árvore de decisão para definição dos limiares dos algoritmos de classificação espectro-temporal	47
Figura 8 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2008/2009	52
Figura 9 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2008/2009	52
Figura 10 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2009/2010	53
Figura 11 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2009/2010	53
Figura 12 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2010/2011	54
Figura 13 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2010/2011	54
Figura 14 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2011/2012	55
Figura 15 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2011/2012	55
Figura 16 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2012/2013	56
Figura 17 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2012/2013	56
Figura 18 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2013/2014	57
Figura 19 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2013/2014	57
Figura 20 Resultados de NDVI para a cultura do arroz em Viamão-RS nas seis safras analisadas	60
Figura 21 - Resultados de NDWI para a cultura do arroz em Viamão-RS nas seis safras analisadas	61

Figura 22 - Árvore de decisão para a classificação através do algoritmo que utiliza o NDVI.....	62
Figura 23 - Árvore de decisão para a classificação através do algoritmo que utiliza o NDWI.....	63
Figura 24 - Resultados do mapeamento da área de arroz para os dois algoritmos classificadores baseado nos valores de NDVI e NDWI para três safras agrícolas entre os anos de 2009 e 2012.....	64
Figura 25 - Resultados do mapeamento do algoritmo classificador pelo índice NDVI na safra agrícola 2009/2010.....	65
Figura 26 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDWI na safra agrícola 2009/2010.....	67
Figura 27 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDVI na safra agrícola 2010/2011.....	69
Figura 28 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDWI na safra agrícola 2010/2011.....	70
Figura 29 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDVI na safra agrícola 2011/2012.....	71
Figura 30 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDVI na safra agrícola 2011/2012.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as resoluções espectrais dos sensores TM e OLI embarcados nas plataformas da série Landsat5 e Landsat8 e do sensor LISS-III embarcado no satélite Indian Resource Satellite (IRS).....	30
Tabela 2 - Influência dos fatores ambientais na reflectância do vermelho e do infravermelho próximo de comunidades vegetais de banhados (adaptado de Hardisky al., 1986).	37
Tabela 3 - Sumário das amostras de uso da terra utilizadas na caracterização dos perfis temporais.....	45
Tabela 4 - Imagens do sensor TM/Landsat5 obtidas conforme os parâmetros utilizados no estudo.....	49
Tabela 5 - Imagens do sensor LISS-III/IRS-P6 obtidas conforme os parâmetros utilizados no estudo.....	49
Tabela 6 - Imagens do sensor OLI-Landsat8 obtidas conforme os parâmetros utilizados no estudo.....	50
Tabela 7 – Resultados médios, mínimos e máximos para os dois índices de vegetação para os seis usos da terra no período de 2008 a 2014.....	50
Tabela 8 - Resultados da análise de acurácia para o mapeador do NDVI.....	63
Tabela 9 - Resultados da análise de acurácia para o mapeador do NDWI.....	63
Tabela 10 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDVI na safra agrícola 2009/2010.....	66
Tabela 11 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDWI na safra agrícola 2009/2010.....	68
Tabela 12 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDVI na safra agrícola 2010/2011.....	68
Tabela 13 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDWI na safra agrícola 2010/2011.....	70
Tabela 14 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDVI na safra agrícola 2011/2012.....	72
Tabela 15 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDWI na safra agrícola 2011/2012.....	73

Lista de Abreviaturas e Siglas

ARVI – Atmospheric Resistant Vegetation Index

CBERS – China-Brazil Earth Resources Satellite

FOV - Field of View

IAF- Índice de Área Foliar

ICMS – Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

IFOV -Instantaneous Field of View,

INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto nacional de Pesquisas Espaciais

IRGA - Instituto Rio-Grandense do Arroz

IRS - Indian Remote Sensing

IADN – Índice de Água por Diferença Normalizada

IVDN- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

IVM – Infravermelho Médio

IVP – Infravermelho Próximo

IVT – Infravermelho termal

LDCM - Landsat Data Continuing Mission

LSWI – Land Surface Water Index

MSAVI – Modified Soil Adjusted Vegetation Index

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NDWI - Normalized Difference Water Index

OLI – Observation Landsat Instrument

PIB – Produto Interno Bruto

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

PVI – Perpendicular Vegetation Index

RS – Rio Grande do Sul

SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index

SNUC – Sistema Nacional de unidades de Conservação

TRIS – Thermal Remote Infrared Sensor

UC - Unidade de Conservação

USGS - United States of Geological Survey

UTM - Universal Transversa de Mercator

WRS - World Reference System

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento das áreas agrícolas irrigadas é uma exigência da legislação ambiental brasileira. A necessidade de quantificar a demanda de água para irrigação nos procedimentos de outorga e licenciamento ambiental tornou-se uma obrigação da administração pública a partir da consolidação da Lei Federal nº 9.433 de 1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

Por outro lado, se apresenta a questão ambiental, devendo-se compatibilizar o uso agrícola e a conservação das áreas naturais. Estes constituem os remanescentes da vegetação original que necessitam de preservação como forma de assegurar o equilíbrio ecológico destas paisagens, surgindo também a necessidade de acompanhar a evolução das áreas naturais, bem como a interface entre os dois tipos de uso da terra. As técnicas de sensoriamento remoto constituem ferramenta útil e de baixo custo para a aquisição de informações permitindo o monitoramento agrícola e ambiental dos ecossistemas de terras baixas.

O acompanhamento dos projetos de irrigação nos assentamentos da reforma agrária realizado pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) através do Serviço de Meio Ambiente e Recursos Naturais da Superintendência Regional no Estado do Rio Grande do Sul (RS), utiliza um fluxograma de procedimentos envolvendo editais públicos para apresentação dos projetos, distribuídos em perímetros ou distritos de irrigação (terras públicas com infraestrutura de irrigação sob o regime de concessão de uso), contendo diversas informações relevantes e de caráter declaratório (coordenadas geodésicas, sistemas de plantio, práticas de manejo da cultura, entre outras), advindo a necessidade de auditoria destas informações mediante o mapeamento do uso da terra a cada safra agrícola.

O mapeamento do uso da terra é realizado a partir da interpretação e classificação de imagens digitais do sensor TM (*Thematic Mapper*), embarcado na plataforma orbital Landsat5 (L5), que apresenta seis bandas espectrais na faixa do visível (VIS) e do infravermelho (IV) próximo e médio, além de uma banda no IV emitido. A coleção de imagens digitais desta série de satélites tem sido empregada

desde 1972 quando do lançamento da primeira plataforma (SERBINA & MILLER, 2014).

Por outro lado, a desativação do sistema TM/L5, a partir de novembro de 2011, causou a descontinuidade da coleta de imagens deste sistema até meados de 2013, quando foi lançado o oitavo satélite da série (NASA, 2012b). Tal fato motivou a busca por sensores remotos semelhantes do ponto de vista das resoluções espectrais e espaciais visando o preenchimento da série histórica.

Com a finalidade de evitar a solução de continuidade do programa de monitoramento do INCRA-RS, o sensor LISS3 embarcado nas plataformas da série IRS (*Indian Remote Sensing*) foi incluído no fluxograma de coleta de dados durante as safras agrícolas de 2011/12 e 2012/13 com relativo sucesso. A partir da entrada em operação da plataforma Landsat-8 (L8), retoma-se os dados da série Landsat, porém com algumas alterações na arquitetura radiométrica do novo sensor denominado Operational Land Imager (OLI) que necessitam de análise comparativa com relação aos dados fornecidos pelos sistemas anteriores.

O acompanhamento das safras agrícolas, tendo como base a identificação das áreas de lavouras através de inspeção visual de composições coloridas de imagens de sensores remotos, apresenta limitações com relação à diferenciação entre cultivos de arroz irrigado quando comparados com as áreas alagadas naturais, a fitofisionomia dos campos úmidos ou das próprias áreas de lavouras de arroz em pousio, quando se considera imagens de apenas uma data.

A dificuldade na discriminação destes alvos em áreas úmidas ou alagadas decorre do comportamento espectral similar dos alvos citados, introduzindo a necessidade de uma abordagem que considere a variabilidade temporal da evolução da vegetação, permitindo separar áreas naturais com baixa variação da vegetação ao longo do tempo das áreas com cultivos agrícolas, onde as etapas de preparo do solo, plantio e colheita definem ciclos de variação espectral com periodicidade anual.

Neste sentido, técnicas de sensoriamento remoto que visam reduzir o conjunto dos dados na forma de índices ou razões entre bandas, e entre estes, os índices de vegetação, permitem inferências a respeito da evolução dos parâmetros biofísicos da vegetação em função do tempo, possibilitando sua comparação com o

ciclo fenológico das diferentes espécies vegetais, facilitando a discriminação e identificação de cultivos agrícolas, bem como sua delimitação com relação às áreas de vegetação natural.

A proposta deste estudo está vinculada ao aperfeiçoamento das rotinas desenvolvidas pelo setor de meio ambiente do INCRA-RS, visando estabelecer metodologia para o mapeamento do uso do solo com arroz irrigado nos projetos de assentamento da reforma agrária sob sua jurisdição. O programa de monitoramento agrícola e ambiental da lavoura de arroz teve início na safra agrícola 2008/2009 no distrito de irrigação do projeto de assentamento Viamão, localizado no município de mesmo nome, Estado do Rio Grande do Sul, tendo como objetivo o apoio à cobrança pelo uso da água. A próxima etapa, a qual justifica a realização deste estudo, trata da sistematização e análise da série de dados coletados e processados durante as últimas seis safras agrícolas.

1.1 Objetivos

A hipótese central desta pesquisa é que as alterações nas propriedades biofísicas dos plantios de arroz irrigado e de outros tipos de uso a que estão submetidos os ecossistemas de áreas úmidas, encontram-se condicionados por dois fatores principais: a evolução do índice de área foliar (IAF) e a presença de água, tanto internamente à planta como em suas diferentes fases no sistema solo-planta-atmosfera. A análise temporal destas variações permite a discriminação entre o cultivo irrigado e a vegetação natural através de técnicas de sensoriamento remoto.

O objetivo geral deste estudo foi o desenvolvimento de uma rotina de classificação de imagens digitais de sensores remotos orbitais com base na evolução temporal dos índices de vegetação, visando o mapeamento da área plantada com a cultura de arroz irrigado, permitindo a quantificação dos erros associados às rotinas utilizadas atualmente, baseadas em análise visual de imagens e fortemente dependentes do grau de conhecimento do analista.

Os objetivos específicos dizem respeito ao emprego das imagens digitais para a geração de dois índices de vegetação (IVs), análise temporal da variação dos dois índices para diferentes usos da terra encontrados na área do estudo, posterior

determinação dos limiares de decisão a serem utilizados pelos algoritmos de classificação, finalizando com análise da matriz de confusão resultante do desempenho na estimativa das áreas plantadas com arroz irrigado, citando-se especificamente:

- Avaliação dos resultados dos índices de vegetação gerados a partir de três sistemas sensores diferentes: TM/L5, LISS3/IRS-P6 e OLI/L8
- Comparação de índices de vegetação quanto à eficiência na classificação espectro-temporal de lavouras de arroz irrigado;
- Proposição de fluxograma de rotinas de processamento de imagens de sensoriamento remoto como subsídio ao mapeamento das áreas de plantio de arroz irrigado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização do cultivo de arroz irrigado

De Rosso (2006) caracteriza o arroz cultivado no Brasil como pertencente à espécie *Oryza sativa* L., constituindo uma das 22 espécies conhecidas do gênero *Oryza*, planta monocotiledônea da família *Poaceae* (*Gramineae*), subfamília *Pooideae*. A adaptação desta espécie às condições de alagamento do solo permite seu uso agrícola sob o método de irrigação denominado inundação contínua, o qual possibilita o controle herbistático de outras espécies vegetais que não toleram a deficiência de oxigênio em nível radicular.

O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo, ocupando área aproximada de 158 milhões de hectares para uma produção na faixa de 600 milhões de toneladas anuais, correspondendo a 29% do total de grãos usados na alimentação humana. (SOSBAI, 2012).

O Brasil é o nono maior produtor mundial com uma produção aproximada de 11 milhões e 746 mil toneladas na safra 2012/2013. O cultivo do arroz irrigado, predominante na região sul do Brasil, contribuiu com mais de 68% da produção nacional na mesma safra, tendo o Rio Grande do Sul (RS) como o maior produtor brasileiro do grão (IRGA, 2014a).

De acordo com SOSBAI (2012), a área cultivada com arroz no Rio Grande do Sul aumentou até a safra 2004/05, estabilizando-se em torno de um milhão de hectares, integralmente irrigada com predominância do sistema de inundação contínua, obtendo-se produtividades médias próximas a sete toneladas por hectare. Estimam que o arroz apresente um Valor Bruto de Produção (VBP) na faixa de cinco bilhões de reais, o que representaria mais de 3% de ICMS e aproximadamente 2,7% do Produto Interno Bruto (PIB) do RS, chegando a representar mais de 50% do valor bruto da produção em pelo menos a metade dos 133 municípios do RS que cultivam o cereal.

Os sistemas de cultivo empregados na cultura do arroz irrigado no sul do Brasil podem ser resumidos em cinco tipos principais: sistema convencional com lavração, gradagem e semeadura em solo seco; cultivo mínimo, caracterizado pela

menor intensidade no preparo do solo com relação ao primeiro; sistema de plantio direto, onde todas as etapas de preparo e sistematização são realizadas durante o verão e a semeadura é realizada após dessecamento da cobertura vegetal; plantio com a semente em processo inicial de germinação, também denominado pré-germinado e o transplante de mudas. Analisando a safra 2013/2014, predominou o cultivo mínimo com semeadura direta (74,2% da área), seguido dos sistemas convencional (15,7% da área) e pré-germinado (10,1%), segundo levantamento do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA, 2014b).

Com objetivo de caracterizar as principais etapas do ciclo de crescimento da cultura do arroz, também conhecido como ciclo fenológico, a escala mais utilizada no RS é a que subdivide o desenvolvimento da planta em três períodos: plântula, vegetativo e reprodutivo. Os estádios de desenvolvimento da plântula são identificados pela letra S e subdivididos em quatro fases; os estádios vegetativos são identificados pela letra V e por um número que varia de 1 até “n”, o qual indica o número de folhas expandidas; e o período reprodutivo é identificado pela letra R, associada a um número, que varia de 1 a 8 (SOSBAI, 2012).

Considerando a fenologia, bem como as diferenças agronômicas de duração do ciclo e suscetibilidade ao frio no período reprodutivo entre as diversas cultivares e nas condições climáticas do RS, a semeadura pode iniciar em setembro, estendendo-se até meados de dezembro em regiões menos frias. Os períodos recomendados para o plantio do arroz irrigado são definidos de uma maneira mais detalhada pelo Zoneamento Agrícola, de acordo com o ciclo das cultivares e para cada município (EMBRAPA, 2014).

O calendário do Zoneamento Agrícola para o arroz irrigado no Rio Grande do Sul indica o período preferencial para a semeadura ou plantio entre os meses de outubro e novembro. Considerando-se o ciclo vegetativo médio de aproximadamente 120 dias (mínimo de 100 dias para cultivares muito precoces, e de 150 dias para as cultivares tardias), o período de colheita ocorre entre março e abril. A figura 1 mostra o mapa para o zoneamento da cultura do arroz irrigado com destaque para a área do estudo.

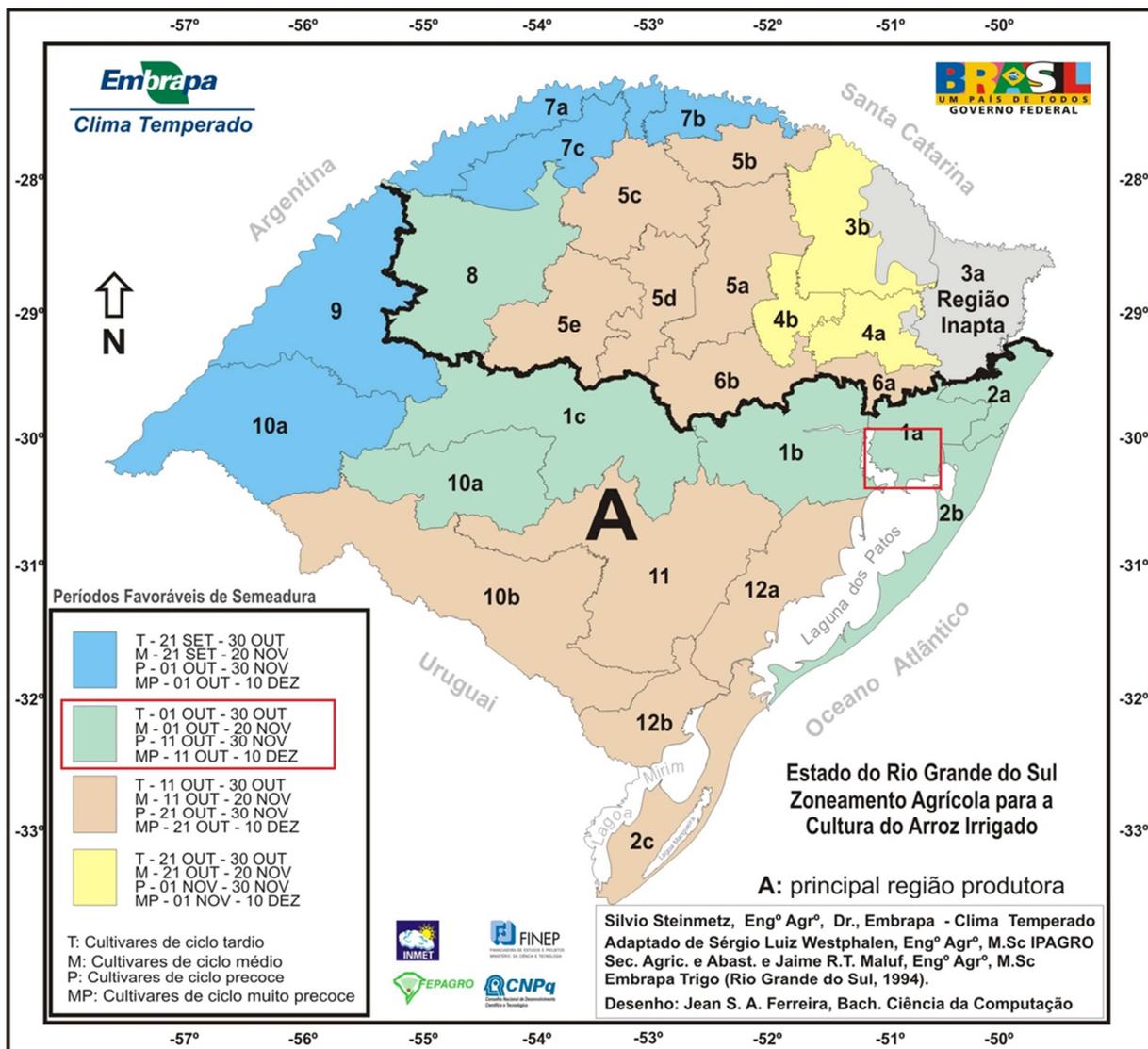


Figura 1 – Zoneamento agrícola para a cultura do arroz irrigado no RS com destaque para a região do estudo (adaptado de EMBRAPA, 2014).

O manejo da água da irrigação no cultivo de arroz sob o sistema de inundação contínua é diretamente influenciado pelo sistema de plantio e pela fenologia da cultura. Considerando a semeadura em solo seco, seja plantio convencional, direto ou cultivo mínimo, a irrigação da lavoura por saturação do solo e estabelecimento de uma lâmina de água inicia-se alguns dias após a emergência das plantas, entre a emissão da terceira e quarta folhas, enquanto no sistema pré-germinado, o início da submersão do solo ocorre mais cedo, entre 20 e 30 dias antes do plantio, conjuntamente com o preparo do solo (SOSBAI, 2012).

2.2 Sensoriamento remoto e agricultura

As referências bibliográficas que descrevem os conceitos relacionados ao sensoriamento remoto apresentam diversas definições que remetem a termos como distância, informação e contato físico com o objeto do estudo. Em estudos relacionados com agricultura e vegetação, interessa explicitar o conceito de interação da radiação eletromagnética com os diferentes alvos presentes na superfície terrestre, característica principal que possibilita inferir informações a respeito dos mesmos (PONZONI & SHIMABUKURO, 2009).

O uso de fotografias ou imagens digitais oriundas de sensores remotos aéreos ou orbitais para o monitoramento do uso da terra sempre foi um dos objetivos no desenvolvimento das técnicas de sensoriamento remoto, tanto na faixa de atuação dos sensores passivos (figura 2), aqueles que atuam na faixa do espectro eletromagnético relativos aos comprimentos de onda do visível (VIS) e do infravermelho (IV), como nos sistemas classificados como ativos e que atuam na faixa do espectro das microondas (JENSEN, 2009).

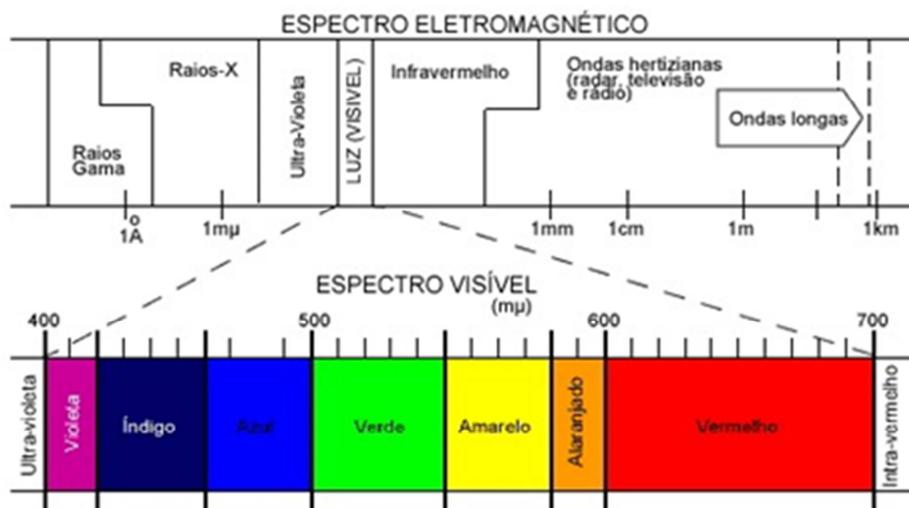


Figura 2 - Espectro eletromagnético com destaque para a faixa de comprimentos de onda correspondente ao fluxo de emissão solar no intervalo do visível (Adaptado de Moraes, 1999).

2.2.1 Sensoriamento remoto na faixa do espectro solar

Conforme Meneses (2001), sensores que operam no intervalo de comprimentos de onda correspondente à faixa espectral de emissão solar também são conhecidos como sensores remotos passivos que atuam no espectro óptico, por não necessitarem de dispositivos para emissão de ondas eletromagnéticas e por obedecerem às leis da óptica. Abrangem o intervalo de 0,4 a 2,5 μm de comprimento de onda e tem como objetivo captar a energia refletida (radiância) pelos diferentes alvos da superfície terrestre.

O mesmo autor afirma que o comportamento diferencial dos materiais frente à incidência da radiação eletromagnética permite definir, com mais rigor o termo sensoriamento remoto como uma medida das trocas de energia, resultantes da interação da energia contida na radiação eletromagnética de determinado comprimento de onda, com a energia contida nos átomos e moléculas que constituem determinado material. A porção da radiação solar que chega até a superfície terrestre e que interage com os diferentes alvos (vegetação, solo, água), pode ser absorvida (absortância), transmitida (transmitância) ou refletida (reflectância).

A energia refletida que pode ser captada pelo sensor, quando quantificada como uma função do seu comprimento de onda, é conhecida como reflectância espectral. O gráfico da reflectância em função do comprimento de onda é conhecido como curva espectral (figura 3), sendo utilizada para a discriminação e monitoramento dos alvos na superfície terrestre através de técnicas adequadas, entre estas a interpretação visual, classificação assistida por computador, análise temporal, entre outras (MENESES & ALMEIDA, 2013).

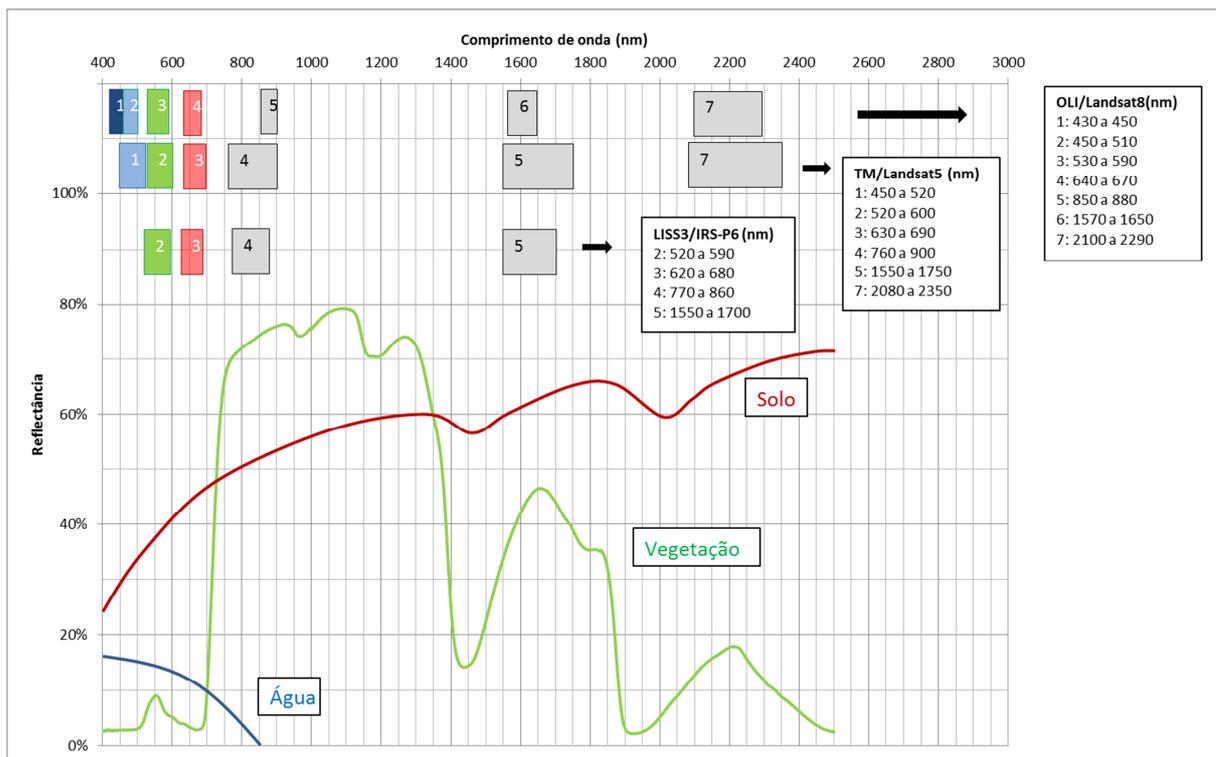


Figura 3 - Curvas espectrais dos principais alvos agrícolas e a localização das bandas dos três sistemas orbitais utilizados neste estudo.

2.2.2 Comportamento espectral dos alvos agrícolas

De acordo com Ruddorf & Moreira (2002), a tecnologia do sensoriamento remoto apresenta uma série de vantagens na coleta de informações a respeito de culturas agrícolas. A radiação refletida que é coletada pelos sistemas sensores traz informações que podem estar relacionadas com o tipo de vegetação, com as condições fenológicas ou nutricionais da cultura e, conseqüentemente, com sua produtividade. Entre outros objetivos, se pode citar a obtenção de informações sobre quantitativos de áreas plantadas por diferentes culturas considerando diversos intervalos de tempo e em diferentes escalas de mapeamento.

Jensen (2009) afirma que os estudos sobre radiometria óptica espectral dos diversos materiais que compõe a superfície terrestre são a base científica para a discriminação de alvos em produtos de sensoriamento remoto, desde a interpretação visual até as mais recentes técnicas de classificação ou reconhecimento de padrões. Os principais alvos relacionados com estudos agrícolas

abrangem o conhecimento do comportamento espectral da água, do solo e da vegetação.

Com relação à água, Novo (2001) ressalta que a interpretação das informações coletada por sensores remotos é complexa devido a cinco fatores principais: (i) a reflectância da água é muito pequena, próxima a 5% na faixa do espectro visível; (ii) a reflectância da superfície da água é mais elevada que a da coluna de água, sendo afetada pelos ventos e pela geometria de iluminação; (iii) a região de maior penetração de luz na coluna de água é afetada pelas condições atmosféricas; (iv) a transmitância da água é elevada e variável, integrando informações de diferentes profundidades; (v) os componentes opticamente ativos presentes na água apresentam espectros de absorção similares, dificultando sua discriminação.

Os solos apresentam sua reflectância espectral condicionada por diversos fatores, entre estes os teores de matéria orgânica, de óxidos de ferro e o conteúdo de umidade do solo. A reflectância diminui com o incremento de matéria orgânica e de óxidos de ferro, assim como o aumento do teor de água do solo. Algumas características do solo como a textura também interferem na resposta espectral, sendo que solos argilosos ou de textura fina tendem a aumentar a reflectância em função do maior espalhamento ou menor extinção da radiação pela diminuição da porosidade do solo. Conforme se observa na figura 3, a curva de reflectância dos solos na faixa do espectro óptico apresenta um incremento contínuo desde o VIS até o IV com a presença dos típicos picos de absorção da água centrados nos comprimentos de onda de 1,45 e 1,95 μm (EPIPHANIO *et al.*, 1992).

Ponzoni & Shimabukuro (2009) apresentam estudo detalhado do comportamento espectral da vegetação, desde a análise do comportamento individual das folhas até o resultado integrado da resposta de cultivos agrícolas, tanto em condições de laboratório como com dados coletados a campo. Afirmam que a estrutura de uma folha individual absorve, reflete e transmite a radiação eletromagnética incidente de forma característica, em função de sua composição físico-química (diferentes tipos de pigmentos e conteúdo de água inter e intracelular). As curvas espectrais típicas de uma folha podem ser divididas em três faixas de variação, conforme se pode observar na Figura 4.

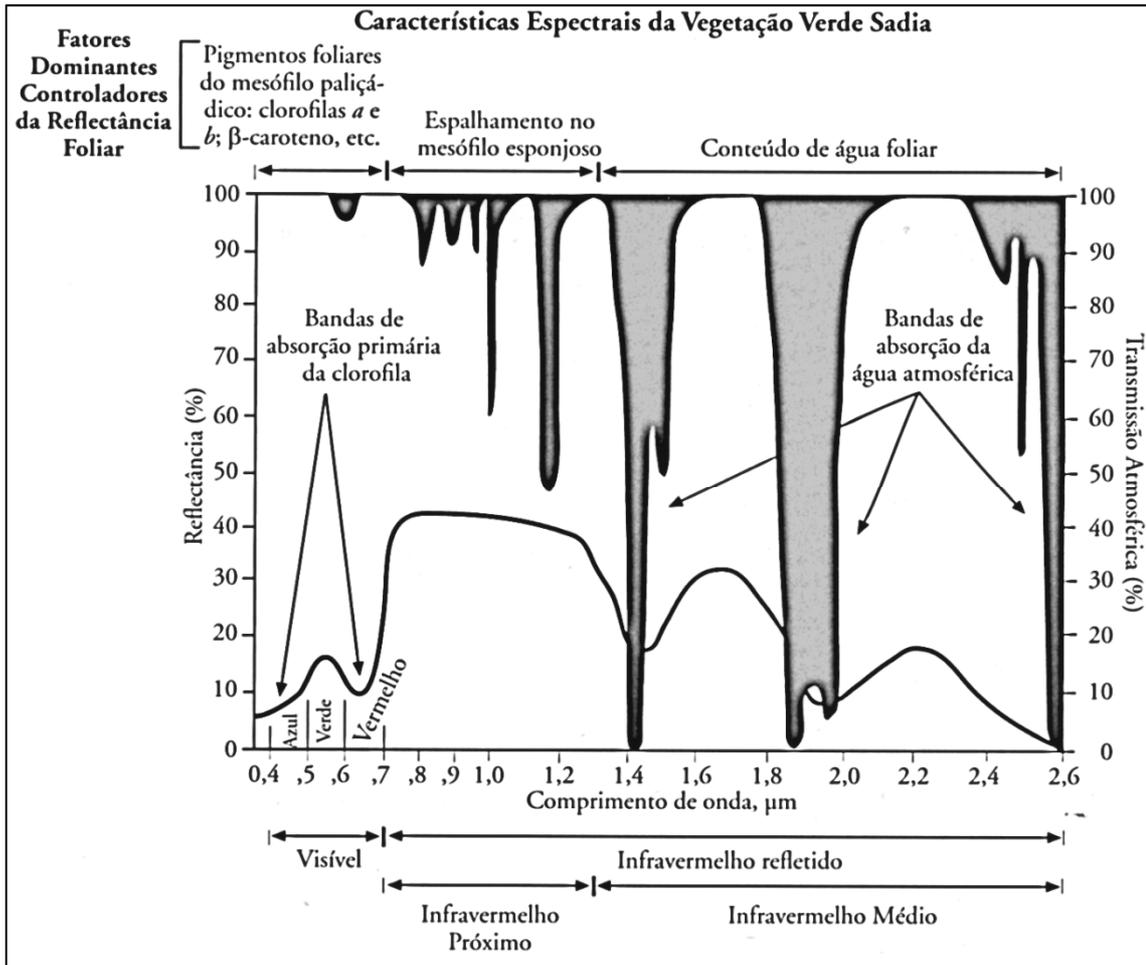


Figura 4 - Comportamento espectral típico da vegetação verde e sadia (Adaptado de Jensen, 2009)

A primeira faixa de variação diz respeito aos comprimentos de onda do espectro eletromagnético conhecido como visível (0,4 a 0,7 μm), correspondendo aos intervalos que denominamos azul, verde e vermelho, a qual apresenta níveis de reflectância próximos de 10% para o intervalo que corresponde à cor azul, seguida por um discreto aumento da reflectância no intervalo correspondente ao verde seguida novamente pela diminuição da reflectância no vermelho.

De acordo os autores citados, a baixa reflectância das folhas neste intervalo é atribuída aos pigmentos foliares que absorvem a radiação, sendo esta determinada pela quantidade e pelo tipo dos pigmentos presentes. Nota-se a presença dos picos de absorção pela clorofila centrados na faixa de 0,43 a 0,45 μm (região do azul) e 0,65 a 0,66 μm (região do vermelho), com aumento da reflectância centrado em 0,54 μm , correspondendo ao intervalo do verde no espectro eletromagnético, definindo a sensação de cor percebida pelos seres humanos.

A segunda faixa de variação da curva espectral de uma folha individual corresponde à elevada transmitância no infravermelho (intervalo que vai de 0,7 a 1,3 μm) aliado à baixa absorvância nesta faixa do espectro. Além disto, quando se considera o dossel vegetal, o comportamento resultante da interação entre as altas taxas de transmitância e de reflectância em cada camada de folha, define um fenômeno conhecido como **reflectância aditiva**, responsável pelos altos valores observados para a reflectância da vegetação verde e sadia nesta faixa do espectro (PONZONI & SHIMABUKURO, 2009).

A partir do comportamento típico da vegetação nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho, diversos autores desde a década de 1970 passaram a propor equações entre bandas como forma de definir índices de vegetação (IV's), relacionando-os com parâmetros biofísicos da vegetação, com relativo sucesso tendo em vista o caráter determinístico destas relações (JENSEN, 2009).

2.3 Sistemas sensores orbitais

2.3.1 Características das imagens de sensoriamento remoto

A maior parte das imagens obtidas por sensoriamento remoto encontra-se em formato digital sendo que a menor unidade de informação é constituída por elementos discretos denominados pixels, cujas resoluções radiométrica e espacial dependem, respectivamente da arquitetura do sensor e da altitude de tomada da imagem. Os sensores remotos captam a quantidade de energia emanada dos objetos, conhecida como radiância ou brilho, e a discretiza em números digitais ou níveis de cinza. Os valores de níveis de cinza são calibrados antes do lançamento para cada intervalo de radiância em função das quantidades máximas possíveis de serem captadas pelo sensor em cada intervalo de comprimento de onda. Esta calibração pode mudar lentamente com o tempo devido à degradação do sistema pela interferência solar, sendo que a maioria dos sensores possuam mecanismos de calibração a bordo, assegurando a qualidade radiométrica das imagens (RICHARDS & JIA, 2006).

Segundo Jensen (2009), a resolução espectral de um sensor é definida como a quantidade de intervalos de comprimento de onda que o instrumento é capaz de imagear, também denominados canais ou bandas, podendo variar de apenas uma banda, como nos casos das fotografias aéreas verticais, até uma centena de bandas nos sensores hiperespectrais. Por sua vez, a resolução radiométrica do sensor é o intervalo possível de discretização do valor da radiância captada em cada banda, sendo uma função do número de bits do equipamento e define o intervalo de valores para os contadores digitais.

A resolução espacial do sensor, diz respeito ao tamanho do pixel da imagem digital quando representado como área no terreno. Esta área é definida pela relação entre as características construtivas de cada sensor e da altitude de coleta da imagem da plataforma orbital ou veículo aéreo. Atualmente, classificam-se os sensores orbitais em três faixas de resolução espacial: alta, para imagens com resolução métrica ou submétrica; média para sensores que operam entre 20 e 30 metros de resolução espacial e baixa para os sistemas que fornecem imagens com pixels na faixa das dezenas e centenas de metros (JENSEN, 2009).

2.3.2 Sistema IRS

Conforme Chander *et al.* (2009) a plataforma orbital Resourcesat-1, também chamado de IRS-P6, foi lançada em outubro de 2003, tornando-se a décima plataforma orbital da série IRS (Indian Remote Sensing) e sendo operacionalizada pela Organização de Pesquisa Espacial Indiana (NRSA). A plataforma possui órbita aproximada de 800 quilômetros de altitude com uma inclinação de 98,7° em relação ao eixo de rotação da Terra. Possui três sensores imageadores: LISS-IV, com uma resolução espacial de 5,8 m; LISS-III, com uma resolução espacial de 23,5 m; e o sensor AWiFS, com uma resolução espacial de 56 m. O satélite apresenta um período orbital de 101,35 minutos, com hora do cruzamento equatorial aproximadamente às 10:30 do horário local.

O sensor LISS-III (Linear Imaging Self-Scanner III) é um sensor multiespectral operando em quatro bandas espectrais, duas bandas no espectro visível (verde e vermelho) e duas bandas no infravermelho de ondas curtas (próximo e médio),

apresentando visada no nadir com um ciclo de revisita de 24 dias, sendo considerado o sensor que fornece a melhor combinação de resoluções espectral e espacial com relação à série histórica Landsat, sendo adequado para o preenchimento de possíveis falhas da série Landsat (ANDERSON *et al.*, 2011).

2.3.3 Sistema Landsat

Conforme Serbina & Miller (2014), o primeiro satélite da série Landsat foi colocado em órbita em 1972, com o nome de ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite-1), iniciando a coleta de um conjunto de dados na forma de imagens digitais com aplicações nas mais diversas áreas do conhecimento, incluindo o monitoramento agrícola em função de sua característica sinóptica. O satélite Landsat 5 foi lançado em 1982 operando até novembro de 2011, sendo responsável pela maior coleção de imagens obtidas pelo programa. Atualmente encontram-se em operação os satélites 7 e 8, sendo que o primeiro apresenta problemas na formação das imagens, não permitindo seu uso continuado.

O Landsat 8 foi lançado com sucesso pela National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2014) em fevereiro de 2013, e a partir de maio do mesmo ano passou a ser comissionado pelo United States of Geological Survey (USGS), o qual encontra-se responsável por todo o acervo da série Landsat e, desde o ano de 2008, fornece imagens gratuitas desta série.

Os satélites da série Landsat operam em órbitas heliossíncronas e quase polares (inclinação de $98,2^\circ$ com relação ao eixo de rotação da Terra), com altitude aproximada de 705 quilômetros no Equador. Apresentam período orbital de 99 minutos, completando 14 órbitas por dia, retornando ao mesmo ponto a cada 16 dias, definindo 233 órbitas por ciclo vinculadas ao sistema de referência denominado WRS-2 (World Reference System-2). A órbita associada ao movimento aparente do Sol determina que todas as aquisições de imagens em uma determinada área ocorram na mesma hora local, entre 9:30 e 10:00.

2.3.3.1 Plataforma Landsat5

O satélite Landsat5 (L5), lançado em 1982, carregava a bordo o sensor Thematic Mapper (TM), sendo este sensor imageador do tipo varredura por arranjo linear, que incorporava avanços nas capacidades espectrais, radiométricas e geométricas relativas aos scanners multiespectrais presentes nos satélites anteriores da série Landsat. As bandas de 1 a 5 mais a banda 7 do TM possuem comprimento de onda central localizados em 0,49; 0,56; 0,66; 0,83; 1,67 e 2,24 μm , respectivamente, com resolução espacial de 30 metros e radiométrica de 8 bits. O sistema também possui um sensor operando no infravermelho termal (banda 6) com resolução espacial de 120 metros (NASA, 2012a).

2.3.3.2 Plataforma Landsat8

Segundo NASA (2014), a plataforma orbital denominada de Landsat-8 carrega dois instrumentos principais: o sensor OLI (Observation Landsat Instrument) operando na faixa do espectro visível e do infravermelho de ondas curtas e o TIRS (Thermal Infrared Remote Sensing), que opera na faixa do espectro do infravermelho termal ou de ondas longas.

O sensor OLI inclui todas as bandas do seu antecessor TM (Landsat 5) com refinamento radiométrico, além da presença de três novas bandas: a banda do azul profundo para estudos costeiros e de aerossóis, uma faixa do infravermelho de ondas curtas para a detecção de nuvens do tipo cirrus. A nova arquitetura radiométrica fornece uma melhor relação sinal-ruído quando comparado ao sensor TM, ou seja, melhor desempenho radiométrico através da discretização da imagem em 12 bits, resultando em 4.096 níveis de cinza.

Com relação à resolução espacial, o tamanho do pixel do sensor OLI é o mesmo do antecessor TM/L5, variando de 30 metros para as bandas multiespectrais de 1 a 7, além da banda 9; de 15 metros para a banda pancromática (banda 8) e de 100 metros para as duas bandas do infravermelho termal.

As imagens são calibradas para fornecer diretamente a reflectância aparente no topo da atmosfera, contando com a presença de uma banda associada para avaliação da qualidade da imagem. Os arquivos disponibilizados encontram-se no

formato GEOTIF, com reamostragem do tipo convolução cúbica, projeção cartográfica referenciada ao sistema Universal Transversa de Mercator (UTM) ou projeção polar estereográfica para cenas com uma latitude central maior ou igual a 63 graus, ambas as projeções vinculadas ao elipsoide WGS-84. Apresentam aproximadamente 12 metros de erro circular e 90% de confiança exatidão global.

2.3.4 Comparação entre os sistemas sensores

As diferenças observadas entre os sensores devem ser consideradas frente à interpretação das curvas de reflectância dos diferentes alvos que queremos discriminar. Neste sentido, tanto a resolução espectral como a resolução radiométrica podem afetar as respostas dos alvos. A Tabela 1 mostra em formato comparativo as principais características de cada sistema-sensor utilizado neste estudo.

Tabela 1 – Comparação entre as resoluções espectrais dos sensores TM e OLI embarcados nas plataformas da série Landsat5 e Landsat8 e do sensor LISS-III embarcado no satélite Indian Resource Satellite (IRS).

Número da banda ou faixa espectral	TM/Landsat5	LISS III/IRS-P6	OLI/Landsat8
Resolução espectral (μm)			
1	0,45 - 0,52	-	0,43-0,45
2	0,52 - 0,60	0,52-0,59	0,45-0,51
3	0,63 - 0,69	0,62-0,68	0,53-0,59
4	0,76 - 0,90	0,77-0,86	0,64-0,67
5	1,55 - 1,75	1,55-1,70	0,85-0,88
6	Termal	-	1,57-1,65
7	2,08 - 2,35	-	2,10-2,29

Fonte: Chander et. al. (2009) e USGS (2014).

Berra (2013) comparou dois sensores, LISS-III e TM-5, para fins de avaliações dendrométricas de espécies de pinheiros (*Pinus spp.*) na região costeira do Rio Grande do Sul e encontrou resultados similares para a resposta espectral dos dois sensores, o que viabilizaria a substituição do sensor TM-5 pelo LISS-III para estudos de vegetação.

Li *et al.* (2014) compararam índices de vegetação obtidos a partir dos sensores Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) a bordo do satélite Landsat-7 e do sensor OLI, embarcado no landsat-8, encontrando uma alta correlação ($R^2 > 0,96$) entre os dois sensores, embora o NDVI calculado a partir do novo sensor da série

Landsat, apresentasse uma tendência de diminuição de valores do NDVI (entre 0,05 e 0,1) calculado a partir de imagens OLI quando comparado com o ETM+.

2.3.5 Análise e processamento de imagens para monitoramento agrícola

O monitoramento do uso da terra para fins de estimativas agrícolas através de dados de sensores remotos tem sido utilizado desde o lançamento das primeiras plataformas orbitais na década de 1970, com objetivo de identificar e quantificar áreas de cultivos agrícolas. Estudos realizados com sensores de média resolução espacial das missões Landsat e CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellites*) têm alcançado elevados graus de acurácia nas estimativas de áreas agrícolas quando comparados com os dados fornecidos pelos órgãos oficiais responsáveis pelos levantamentos da produção agrícola (WEBER *et al.* 2005).

Segundo Ponzoni & Shimabukuro (2009), a primeira etapa para a utilização dos produtos do sensoriamento remoto em estudos de observação da terra incluem técnicas de pré-processamento com o objetivo de adequar as imagens para serem efetivamente utilizadas pelos usuários, seja para interpretação visual, seja para manipulação digital, incluindo o emprego de algoritmos que visam corrigir distorções geométricas e radiométricas. Duas técnicas devem ser obrigatoriamente utilizadas: o registro geométrico das imagens para uma mesma base cartográfica, de maneira a permitir a comparação de imagens de diferentes datas para a mesma região ao longo do tempo; e a transformação das radiâncias (ou níveis de cinza das imagens originais) em reflectâncias para fins de comparação dos atributos espectrais do alvo.

Conforme Richards & Jia (2006), o uso de transformações polinomiais visando o registro geométrico de imagens para fins de estabelecimento de coordenadas geográficas (georreferenciamento) das áreas imageadas é o método mais empregado. As transformações polinomiais fazem o vínculo entre coordenadas de imagem e as coordenadas no sistema de referência escolhido para um determinado projeto através de pontos de controle. A determinação dos parâmetros da transformação polinomial é obtida através da resolução de um sistema linear de equações. Para que esse sistema de equações possa ser montado, as coordenadas dos pontos de controle devem ser conhecidas tanto no referencial da imagem como

no sistema de referência. Pontos de controle são feições passíveis de identificação na imagem e no terreno, ou seja, são feições homólogas cujas coordenadas são conhecidas na imagem e no sistema de referência. Cruzamentos de estradas, pistas de aeroportos e confluência de rios são candidatos naturais a pontos de controle.

A identificação de objetos em imagens produzidas por sensores remotos mediante interpretação visual é eficaz quando o interesse é acessar as características geométricas desses objetos. A interpretação visual é baseada na capacidade do intérprete humano e o sentido da visão permite a extração de informação mediante a análise de arranjos de pixels em uma única imagem, somente as informações provenientes de três bandas correspondentes a uma imagem multispectral podem ser utilizadas simultaneamente para esta tarefa (PONZONI & SHIMABUKURO, 2009)

Conforme Rizzi (2005), para alguns tipos de avaliação, como estimativas de área ocupada por determinado alvo agrícola, o processamento digital dos dados pode trazer ganhos significativos. A classificação digital é um processo de reconhecimento de padrões ou de objetos homogêneos e aplica-se ao mapeamento de áreas consideradas pertencentes a uma única classe de objetos que constituem a legenda do mapeamento pretendido, permitindo identificar e localizar espacialmente áreas agrícolas. Por sua vez, a interpretação visual apresenta algumas vantagens com relação aos métodos de classificação digital de imagens, permitindo ao analista observar de forma integrada os aspectos relacionados às propriedades espectrais, texturais e o contexto espacial da imagem, características que não são considerados pelos classificadores estatísticos.

O resultado da classificação digital (pixel a pixel ou por regiões) é apresentado na forma de mapas temáticos compostos então pela distribuição espacial (geográfica) de “manchas” que definem o posicionamento e a distribuição de classes específicas de objetos sobre a superfície terrestre. O treinamento pode ser supervisionado ou não supervisionado. O treinamento supervisionado acontece quando o usuário dispõe de informações que permitem a identificação nas imagens da localização espacial de uma classe de interesse. (CÂMARA, 2001)

2.4 Índices de vegetação

Jensen (2009) afirmou que os índices de vegetação (IVs) são medidas radiométricas adimensionais obtidas por diferentes relações matemáticas entre as diversas bandas espectrais dos sensores utilizando-se a faixa do espectro do vermelho (visível) e do infravermelho próximo. Estas medidas guardam estreita relação com vários parâmetros biofísicos da vegetação, tais como: índice de área foliar (IAF), teor de clorofila da vegetação, quantidade de biomassa, % de cobertura do solo, entre outros.

Ponzoni & Shimabukuro (2009) apresentam diversas relações matemáticas entre bandas propostas pela literatura com o objetivo de explorar o comportamento espectral típico da vegetação na faixa do visível e do infravermelho refletido. Estas relações permitem a redução do conjunto de dados pelo cálculo de um único índice, além de objetivarem minimizar efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição, entre outras interferências.

De acordo com Berra (2013), os índices de vegetação podem ser separados em três categorias principais: índices intrínsecos, cujo cálculo envolve somente as respostas espectrais, sem considerar qualquer outro fator externo, tais como as razões simples ou razões normalizadas como o Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); os índices relacionados à linha de solo, os quais incluem parâmetros relacionados ao comportamento espectral dos solos subjacentes à vegetação, entre estes o Enhance Vegetation Index (EVI); e os índices de vegetação que utilizam algoritmos para correções atmosféricas como o Atmospheric Resistance Vegetation Index (ARVI).

A escolha de um IV deve estar relacionada ao propósito do estudo e ao tipo de vegetação considerada, bem como à existência de dados auxiliares disponíveis para o local. Entre os índices mais utilizados para estudos de monitoramento da vegetação temos o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI na sigla em inglês). Em estudos onde o comportamento espectral da vegetação encontra-se associado à presença de água, a incorporação da banda relativa à faixa do infravermelho médio tem sido considerada (GAO, 1996), tendo-se como exemplo o índice de água por diferença normalizada (NDWI na sigla em inglês).

2.4.1 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

O NDVI foi proposto inicialmente por Rouse *et al.* (1974) a partir da normalização da razão simples situando-a no intervalo de variação entre -1 e +1. A descrição matemática desta relação aparece na equação 1, onde ρ_{IVP} significa a reflectância no infravermelho próximo e ρ_{VER} representa a reflectância na banda do vermelho.

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_{VER}) / (\rho_{IVP} + \rho_{VER}) \quad (1)$$

Klering (2007) demonstrou a viabilidade de utilização dos índices de vegetação para o monitoramento do arroz irrigado, utilizando o método do perfil temporal da cultura para o mapeamento da área cultivada, testando vários intervalos ou limiares para a imagem sintética resultante da diferença entre os valores mínimos e máximos do NDVI e do EVI. Os resultados obtidos foram satisfatórios na comparação entre a área mapeada com arroz irrigado através das imagens do sensor Moderate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) e os dados das estimativas oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para as safras agrícolas entre os anos de 2000 e 2006 no RS.

Segundo Ponzoni & Shimabukuro (2009), o NDVI é amplamente utilizado para o monitoramento da vegetação através da construção de perfis temporais com objetivo de detectar alterações sazonais da vegetação. Salientam que, apesar do relativo sucesso no emprego deste índice, sua interpretação deve levar em consideração vários fatores limitantes, tais como: ponto de saturação do índice; interferência atmosférica; posicionamento e amplitude espectral das bandas; resolução espacial do sensor; entre outros.

2.4.2 Índice de umidade da vegetação por diferença normalizada (NDWI)

Seguindo a mesma linha de trabalho na obtenção de uma diferença normalizada para fins de atenuação de influências externas resultante do processo de aquisição das imagens de sensoriamento remoto, Gao (1996) propôs o NDWI, substituindo a reflectância na banda do vermelho pela banda do infravermelho médio (IVM) conforme podemos observar na equação 2 em comparação com a equação 1.

$$NDWI = (\rho_{IVP} - \rho_{IVM}) / (\rho_{IVP} + \rho_{IVM}) \quad (2)$$

De acordo com o autor, o NDWI é mais sensível a alterações no conteúdo de água dos dosséis vegetais e menos sensível aos efeitos atmosféricos quando comparado ao NDVI em virtude da menor dispersão da radiação solar devidos aos aerossóis atmosféricos na faixa do espectro do infravermelho médio. Assim como o NDVI, este índice também não remove completamente os efeitos de fundo, embora possa captar a questão de solos alagados. Neste sentido, considera o NDWI como um índice de vegetação independente e complementar, não sendo um substituto para o NDVI.

De maneira geral, o NDWI tem sido empregado mais frequentemente para o mapeamento do estresse hídrico na vegetação do que para o delineamento de cultivos irrigados. Silva *et al.* (2011) utilizaram o NDWI para comparar com os resultados de modelos de previsão de déficit hidrológicos no médio trecho da bacia hidrográfica do rio Ipojuca no Estado de Pernambuco.

Peter & Ruhoff (2013) utilizaram o NDVI e o NDWI para avaliar as condições de déficit hídrico da cultura da soja a partir de imagens Landsat/TM-5 em Tupanciretã, região central do RS, durante cinco safras agrícolas entre os anos de 2000 e 2005, obtendo correlação direta entre a diminuição dos valores dos dois índices e a ocorrência de déficit hídrico, a qual possibilitou o mapeamento destas ocorrências antes da colheita, dando suporte ao monitoramento da safra de soja.

Conforme Shi *et al.* (2013), alguns trabalhos mais recentes tem empregado a nomenclatura Land Surface Water Index (LSWI) em substituição ao NDWI, empregando também a banda do IVM centrada nas proximidades de 2,3 μm , equivalente à banda 7 do TM, em substituição à banda 5 (centrada nas proximidades de 1,6 μm), utilizando este índice para o monitoramento de lavouras de arroz irrigado a partir de sensores de menor resolução espacial mas com maior frequência de revisita como o MODIS.

2.5 Sensoriamento remoto em áreas úmidas

2.5.1. Caracterização das áreas úmidas

A Convenção de Ramsar de 1971 definiu o conceito de área úmida ou *wetlands*, termo correspondente em inglês, para as mais diversas feições de terra, tais como banhados, pântanos e turfeiras, naturais ou artificiais, onde a presença permanente ou temporária de água (doce, salobra ou salgada e cuja profundidade não exceda a seis metros) seja o elemento integrador da paisagem (GUASSELLI, 2005).

Segundo o mesmo autor, o termo banhado é de origem espanhola, sendo muito difundido no RS onde apresenta um significado popular, abrangente e utilizado como sinônimo de terras alagadas. Destacam-se como ambientes com ocorrência de solos com feições hidromórficas, flora característica e adaptada à situação de ausência de oxigênio permanente ou temporária, bem como de fauna típica associada a este ecossistema. Constituem macrossistemas com alta variabilidade, tanto espacial como temporal, cuja complexidade é função dos aportes e saídas de matéria e energia, definindo sistemas pulsáteis em permanente desequilíbrio ou em constante flutuação.

Shimabukuro *et al.* (1998) trabalhando com ecossistemas similares aos banhados na região do Bioma Pantanal, obtiveram resultados satisfatórios tanto para a metodologia que emprega imagens-fração, como para o NDVI no monitoramento da cobertura vegetal, com ambas as técnicas permitindo definir as mudanças na vegetação ocorridas na região durante o período de aquisição das imagens. A imagem-fração da vegetação mostrou-se mais sensível do que a imagem do índice de vegetação às mudanças ocorridas nos alvos, e as imagens-fração de solo e sombra ou água ajudaram na complementação das informações do tipo de vegetação. Apesar das diferenças na sensibilidade das imagens-fração e das imagens índice de vegetação, a determinação da correlação entre NDVI e fração de vegetação mostrou que ambas são variáveis altamente correlacionadas, tanto no período chuvoso ($r = 0,945$) quanto no período seco ($r = 0,856$).

Hardisky *et al.* (1986) realizaram uma revisão detalhada sobre o comportamento espectral das comunidades vegetais de áreas úmidas (wetlands), inclusive com a determinação da influência de fatores ambientais sobre os índices de vegetação conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Influência dos fatores ambientais na reflectância do vermelho e do infravermelho próximo de comunidades vegetais de banhados (adaptado de Hardisky *al.*, 1986).

Fator ambiental	Efeito na reflectância do vermelho	Efeito na reflectância do infravermelho próximo	Efeito no índice de vegetação
Biomassa morta	Aumento	Pouca ou nenhuma	Decréscimo
Solo úmido	Pouca ou nenhuma	Decréscimo	Decréscimo
Acumulação de sais nas plantas	Aumento	Pouca ou nenhuma	Decréscimo
Decréscimo de umidade nas folhas	Aumento	Pouca ou nenhuma	Decréscimo
Adição de nitrogênio	Decréscimo	Aumento	Aumento
Contaminação com metais pesados	Aumento	Pouca ou nenhuma	Decréscimo

Oliveira (2013) empregou a técnica estatística de análise de componente principais (ACP) para caracterizar uma série temporal de dados NDVI oriundos do sensor MODIS com objetivo de distinguir fitofisionomias na região da bacia hidrográfica do rio dos Sinos, RS. Apesar da técnica de não ter possibilitado a discriminação dos tipos florestais, a autora concluiu que a análise espectro-temporal permitiu detectar a sazonalidade das tipologias florestais em função da temperatura, tornando-se importante instrumento na análise da dinâmica da vegetação.

Qualquer que seja a abordagem das técnicas de sensoriamento remoto que pretenda discriminar áreas de cultivos irrigados ou mesmo separar usos antrópicos da vegetação natural no contexto dos ecossistemas de áreas úmidas, dependerá do conhecimento a respeito dos ciclos vegetativos das espécies vegetais estudadas. Deve-se considerar a variação temporal na composição do material em função das características fenológicas de cada tipologia vegetal, tanto nas áreas naturais (banhados), como nos próprios cultivos irrigados (Lee & Lunetta, 1995).

2.5.2. Sensoriamento remoto do arroz irrigado

Os estudos de sensoriamento remoto com a cultura do arroz irrigado no RS tiveram seu início na década de 1980, quando foi assinado um convênio entre o INPE e o Instituto Riograndense do Arroz (IRGA), sendo selecionados quatro

municípios como área teste: Santa Vitória do Palmar, Itaqui, Dom Pedrito e Cachoeira do Sul. O material empregado eram imagens digitais em papel na escala 1:250.000 do sensor MSS, sendo constatado que a presença da lâmina de água é fator preponderante na discriminação de áreas irrigadas por inundações de outros tipos de culturas agrícolas anuais. As áreas ocupadas com arroz irrigado apresentavam tons de cinza escuro na região do infravermelho próximo (relativo à banda 4 do sensor TM) contrastando com culturas não irrigadas (Moreira & Rudorff, 2002).

Diversos trabalhos tem demonstrado a viabilidade do uso de técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa de área cultivada com arroz irrigado. Weber *et al.* (2007) utilizaram imagens do sensor TM/Landsat5 para estimar a área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul durante a safra agrícola 2005/06 a partir de duas datas, uma antes da implantação da cultura e uma durante o pleno desenvolvimento vegetativo, utilizando classificação a partir da interpretação visual, obtendo índice *Kappa* de 0,57 para a metodologia empregada. Os problemas relacionados à cobertura de nuvens nas áreas próximas ao litoral e o baixo número de pontos de controle de campo com relação ao tamanho total da área considerada, foram citados como as principais dificuldades no emprego e na avaliação da qualidade do procedimento adotado.

Nesta mesma linha de trabalho, Alvarenga *et al.* (2005) utilizaram imagens combinadas de dois sensores (TM e ETM+) das plataformas Landsat 5 e 7, respectivamente, em cinco datas distintas durante a safra agrícola 2000/2001 na região de Santa Vitória do Palmar-RS, adotando metodologia de classificação digital (supervisionada e não-supervisionada) após segmentação das imagens e obtendo um índice *Kappa* de 0,86 para a técnica não-supervisionada denominada isodata. A comparação estatística teve como base uma imagem sintética derivada de classificação visual das mesmas imagens, e os autores ressaltam que o conhecimento da região e da cultura agrícola por parte dos técnicos responsáveis pela interpretação dos resultados são fundamentais para a obtenção de um grau de qualidade aceitável na classificação final.

Considerando o emprego de sensores de menor resolução espacial e maior frequência temporal, de modo a evitar o problema da nebulosidade, técnicas de

classificação que exploram o contexto da análise espectro-temporal tem sido testadas com o objetivo de monitorar áreas irrigadas em regiões úmidas, entre estas a utilização de índices de vegetação (KLERING, 2012; D'ARCO *et al.*, 2005) e a aplicação de modelos de mistura espectral (ALVES, 2009).

O comportamento espectral da cultura do arroz irrigado sob o sistema de inundação contínua varia em função da fenologia da cultura. Considerando a fase inicial de implantação da cultura, a resposta espectral é uma função da presença de lâmina de água, geralmente entre 5 e 10 cm de altura, considerando também que tanto os sedimentos em suspensão, como o próprio solo abaixo da lâmina podem contribuir significativamente na resposta final, em função das propriedades ópticas da água. Após os estágios iniciais de desenvolvimento, quando a cultura cobre totalmente o terreno, a resposta espectral está associada diretamente às variações no IAF e na biomassa acumulada, ou seja, da vegetação propriamente dita (XIAO *et al.*, 2006).

Segundo Alves (2009), na evolução dos perfis temporais dos índices de vegetação para a cultura do arroz no RS é possível reconhecer dois períodos importantes que correspondem aos meses de novembro e de fevereiro, os quais apresentam os valores mínimos e máximos, respectivamente. Em novembro, logo após a semeadura, observa-se a resposta espectral do solo ou da água, dependendo do sistema de cultivo e da data de plantio, enquanto nas imagens relativas ao mês de fevereiro, predomina a resposta espectral da vegetação, pois a cultura encontra-se em pleno vigor vegetativo.

Com base na fenologia e no manejo da água de irrigação na cultura do arroz, Xiao *et al.* (2002) desenvolveram algoritmos para determinar a época de implantação da cultura na Província de Jiangsu, China. A metodologia utiliza composições decenais do NDVI e do NDWI, calculadas a partir das bandas do vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio do sensor SPOT VEGETATION. Avaliando a dinâmica temporal e espacial da lâmina d'água inicial e do dossel da cultura, os autores mostraram que as curvas temporais dos IVs avaliados são uma ferramenta eficiente e de fácil utilização para determinação da época de implantação da cultura do arroz na região de estudo.

2.6 Avaliação da acurácia da classificação

De acordo com Weber (2006), a avaliação de acurácia de um método de classificação ou mapeamento tem como objetivo a obtenção de estimativas do grau de acerto ou de erro do classificador, permitindo ao tomador de decisão o conhecimento prévio da confiabilidade dos resultados obtidos pela metodologia empregada.

A análise da acurácia em estudos de sensoriamento remoto tradicionalmente aplicam técnicas estatísticas vinculadas com análise de dados categorizados ou não paramétricos, sendo a estatística *Kappa* a mais utilizada para fins de avaliação da acurácia relativa ou concordância global de mapas de referência com mapas temáticos obtidos a partir de diferentes técnicas de classificação. (Pontius Jr. & Milones, 2011). As equações 4, 5 e 6 demonstram o cálculo da concordância global (C) e do índice *Kappa standard* (κ).

$$C = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii}}{n} \quad (4)$$

$$E = \frac{\sum_{i=1}^c x_i \cdot x_i}{n^2} \quad (5)$$

$$\kappa = \frac{C-E}{1-E} \quad (6)$$

O índice *Kappa* é um coeficiente de concordância que relata o acerto da variação intra e interobservador, sendo utilizado quando dois observadores classificam separadamente uma amostra empregando a mesma escala de classes e um dos observadores é tratado referência. A estatística *Kappa* é sumarizada através da construção de uma matriz de erros, também denominada matriz de confusão da amostra, a qual tem como objetivo final a estimação dos parâmetros da matriz populacional (SIEGEL & CASTELLAN JR., 2006).

A matriz de confusão de uma classificação é composta por linhas representando as classes de referência e colunas com os valores estimados pelo algoritmo de classificação a ser testado. Os valores da diagonal principal da matriz apresentam as amostras classificadas corretamente, enquanto os valores fora da diagonal correspondem aos erros de omissão ou de inclusão. O somatório da diagonal em relação ao número total de amostras resulta na exatidão global da classificação, indicando quanto o processo de classificação adotado apresenta de probabilidade de estimar corretamente as classes de referência.

Por outro lado, Pontius Jr. & Milones (2011) apontam algumas deficiências para aplicações do *Kappa* como base para comparação de mapeamentos temáticos. Os autores apresentam uma comparação entre cinco diferentes índices *Kappa*, ilustrando suas limitações com ênfase no uso da aleatoriedade, bem como na quase sempre ignorada conversão da matriz de confusão da amostra, concluindo que os mesmos são falhos para as aplicações práticas em trabalhos com sensoriamento remoto.

Os mesmos autores sugerem a complementação da estatística *Kappa* pela análise de dois parâmetros mais simples de serem medidos, denominados quantidade de discordância e alocação da discordância. Concluem afirmando que as falhas nas pressuposições de aleatoriedade tanto nas quantidades, quanto na alocação espacial de cada categoria em função da correlação espacial das amostras não permite uma avaliação correta da eficiência de determinada técnica de classificação de imagem somente a partir do índice *Kappa*.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

A área de abrangência deste trabalho corresponde aos limites do projeto de assentamento Viamão, localizado nas coordenadas geográficas aproximadas de 30° 10' latitude sul e 50° 56' longitude oeste, próximo à sede do município de Viamão, Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, conforme se observa na figura 5.

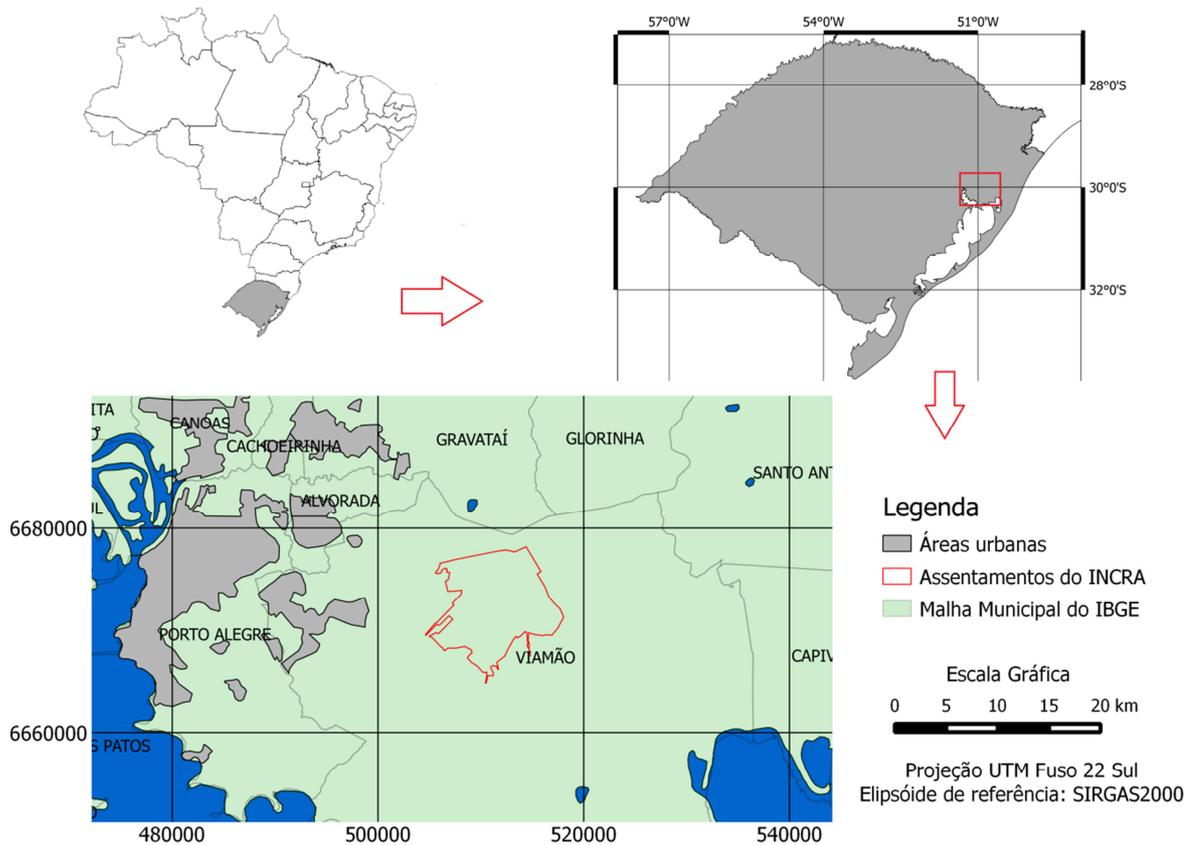


Figura 5 - Mapa de localização da área de estudo.

3.2 Período de estudo

O período estudado abrange seis safras, a partir de julho de 2008 até junho de 2014. Visando a sistematização dos processos de coleta de dados, convencionou-se os limites de primeiro de julho de cada ano como o início da safra agrícola e de 30 de junho para o término da mesma.

As imagens digitais de cada safra foram subdivididas em três fases principais: plantio, desenvolvimento vegetativo e colheita. Considerando a fenologia da cultura no RS, as datas de passagem entre julho e novembro representam o período de plantio, entre dezembro e fevereiro foram definidas como representativas da fase do pleno desenvolvimento vegetativo do arroz e as imagens obtidas entre março e junho, representam o período da colheita.

3.3. Fluxograma de trabalho

O processamento das imagens digitais foi realizado com emprego do software SPRING, acrônimo para Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas, disponibilizado de forma gratuita pelo INPE (CAMARA *et al.* 1996).

O fluxograma de trabalho, empregado atualmente pelo INCRA-RS, com objetivo de mapear as lavouras de arroz irrigado nos projetos de assentamento é adaptado a partir de metodologia utilizada por D'Arco (2008). Inicia pelo processo de segmentação das imagens digitais dos sensores remotos disponíveis, seguida pela classificação não supervisionada destas imagens através do algoritmo ISODATA do SPRING, resultando em imagens temáticas que são levadas a campo em cada uma das três fases principais da lavoura, com objetivo de comparar os diversos usos da terra com as classes mapeadas pelo algoritmo.

Concluída a etapa de colheita, todo o processo de acompanhamento da safra e do mapeamento de uso da terra é auditado a partir do cálculo do NDVI de todas as imagens obtidas para cada fase, seguida do cálculo da média do índice para cada fase, resultando em três imagens. A partir da elaboração de uma composição falsa-cor com as médias das imagens de NDVI das fases de plantio, desenvolvimento

vegetativo e colheita, no espaço tridimensional RGB, gera-se uma imagem fusionada para fins de interpretação visual.

Especificamente no projeto de assentamento Viamão, o INCRA-RS monitora os plantios desde a safra agrícola de 2008/2009 em virtude da celebração de convênio para atender as questões ambientais no contexto do processo de licenciamento ambiental (INCRA, 2007).

3.4. Obtenção das imagens e processamento digital

A obtenção das imagens dos sensores TM-5 e LISS-III foi realizada através de pesquisa no sítio da rede mundial de computadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2013), tomando-se como critérios a existência de imagens com menos de 10% de cobertura de nuvens nas cenas relativas às órbitas-ponto 221/081 (Landsat5) e 129/100 (IRS-P6).

O mesmo procedimento foi realizado para a obtenção das imagens do sensor OLI-8, após pesquisa realizada com os mesmos critérios através da página do Earth Explorer (USGS, 2014).

O registro ou georreferenciamento das imagens dos sensores TM-5 e LISS-III foi realizado a partir da correlação entre 30 (trinta) pontos de controle de campo, também referenciados como GPC (*ground point control*) na sigla em inglês, e sua correspondente localização em cada imagem digital. Os pontos de controle foram obtidos através do recobrimento da área de estudo com concomitantemente identificação dos mesmos nas imagens digitais, seguido da coleta do seu posicionamento geográfico através de sistemas GNSS (Global Navigation Satellite System).

A coleta das informações geográficas dos pontos de controle em campo foi feita através de receptor GNSS da marca TRIMBLE modelo JunoSB com pós-processamento através do software GPS-Pathfinder da mesma empresa, utilizando-se como sistema de coordenadas planas a projeção UTM Fuso 22 sul e como *datum* de referência o SIRGAS/2000. O erro médio quadrático do posicionamento por GPS ficou entre 1 e 2 metros para todos os 30 pontos de controle.

As imagens dos sensores TM e LISS-III foram registradas com a base cartográfica oficial na escala 1:50.000 (UFRGS, 2010) através de ajuste ao modelo linear de primeiro grau com 30 pontos de controle e interpolação por vizinho mais próximo, obtendo-se um pixel com tamanho de 30 por 30 metros, objetivando uniformizar a resolução espacial dos dois sensores para fins de processamento digital das imagens, tendo em vista a diferença das resoluções espaciais dos dois sensores (30 m para o Landsat e 24 m para o LISS-III).

O interpolador linear de primeiro grau foi escolhido para reamostragem da imagem original com aplicação da rotina denominada vizinho mais próximo, onde não existe a alteração do valor original do número digital de cada pixel.

3.4 Perfis temporais dos índices de vegetação

As amostras de seis tipos de uso da terra monitorados anualmente pelo projeto de mapeamento de arroz irrigado do INCRA-RS na área de estudo, foram: água, arroz, banhado, campo, mata e solo exposto.

A Tabela 3 identifica o tipo de uso, o tamanho da amostra e o número de amostras. A figura 6 mostra alguns exemplos destes tipos de uso no contexto da área de abrangência deste estudo.

Tabela 3 - Sumário das amostras de uso da terra utilizadas na caracterização dos perfis temporais

Uso da Terra	Tamanho total da amostra (em pixels)	Número de amostras (loais ou ROI's)
Água	642	4
Arroz	1706	10
Banhado	1391	7
Campo	2695	9
Mata	669	6
Solo	76	2

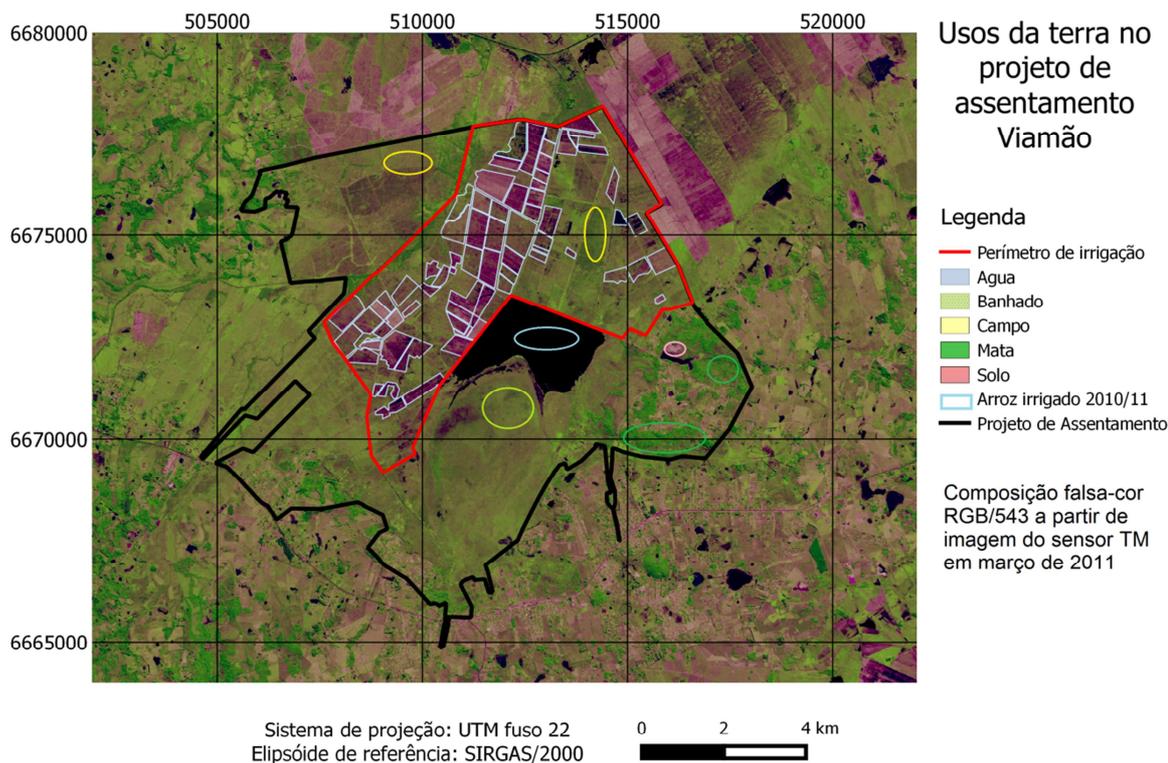


Figura 6 - Mapa da área de estudo com a localização das amostras dos principais tipos de uso da terra encontrados na região.

3.5 Determinação das chaves de classificação

Os resultados obtidos na avaliação da evolução temporal dos dois índices de vegetação, NDVI e NDWI, foram utilizados na definição dos limiares de corte visando a classificação do uso da terra com arroz irrigado a partir das imagens sintéticas com as médias dos índices de vegetação para cada uma das três fases do desenvolvimento fenológico da cultura (plantio, desenvolvimento vegetativo e colheita).

Ao contrário da metodologia que emprega imagens de mínimo e de máximo dos índices para representar os três períodos citados, em função da ausência de regularidade na obtenção das imagens dos sensores empregados neste estudo, a metodologia proposta envolve o cálculo da média dos índices para cada período, caso haja mais de uma imagem para cada fase fenológica.

Visando aplicar uma chave de classificação que incorpore a variação temporal dos índices de vegetação como subsídio para o mapeamento de áreas de arroz

irrigado, foram construídos dois algoritmos de classificação baseado em valores de limiar, gerando-se dois mapas, um para o NDVI e outro para o NDWI, com duas classes cada: arroz e não arroz.

Os algoritmos obedecem às regras de decisão baseadas na comparação do valor do pixel da imagem com um valor de limiar do IV, resultando numa classificação binária (arroz ou não arroz) conforme o resultado desta comparação.

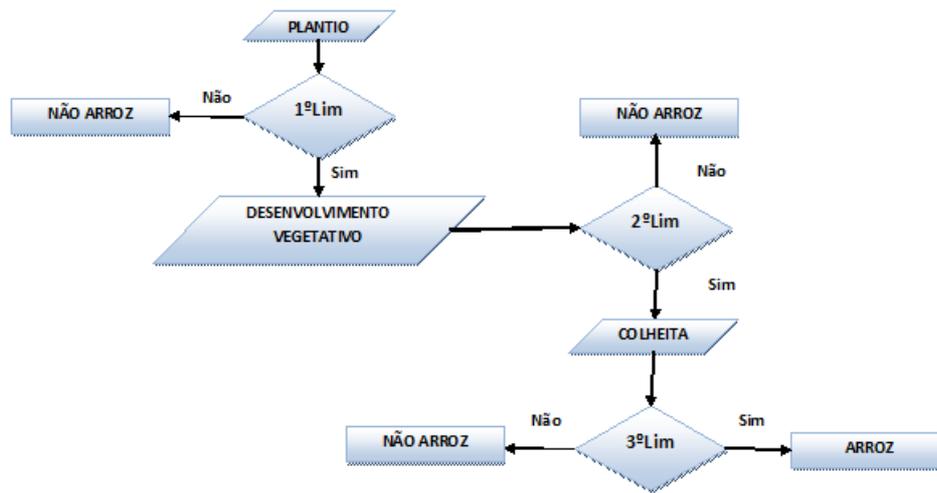


Figura 7 - Árvore de decisão para definição dos limiares dos algoritmos de classificação espectro-temporal

3.6 Avaliação da acurácia do mapeamento

A análise da concordância temática de um mapeamento necessita da definição formal dos termos acurácia e precisão. A acurácia pode ser definida como a proximidade de uma observação ao seu valor real, enquanto a precisão trata do grau de concordância entre si de uma série de observações ou medidas. Considerando técnicas de análise estatística, a acurácia é expressa pelo desvio padrão da amostra, enquanto a precisão é definida pelo desvio padrão da média amostral (Monico, 2001).

Para fins de análise da acurácia dos dois algoritmos, foram utilizadas como imagens de referência de campo em três safras agrícolas para as quais existe o mapeamento da área plantada através da metodologia utilizada pelo INCRA-RS e detalhada no item 3.3.

A análise do classificador ou algoritmo de mapeamento foi realizada pelo cálculo da estatística *Kappa* disponibilizado pelo módulo de validação do software SPRING, sendo os resultados da matriz de confusão transpostos e organizados para a análise de discordância conforme Pontius Jr. & Milones (2011), a partir do cálculo das proporções para cada relacionamento entre as quantidades mapeadas e as amostras de referência.

Os indicadores utilizados para análise da acurácia dos algoritmos mapeadores foram: a acurácia do mapeador (AM), a acurácia do usuário (AU), a quantidade de discordância (QD) e a alocação da discordância (AD), os dois últimos derivados pelos autores acima citados e calculados conforme demonstrados pelas equações 7 a 10.

$$q_g = |(\sum_{i=1}^j p_{ig}) - (\sum_{i=1}^j p_{gi})| \quad (7)$$

$$a_g = 2\min[(\sum_{i=1}^j p_{ig}) - p_{gg}; (\sum_{i=1}^j p_{gi}) - p_{gg}] \quad (8)$$

$$QD = \frac{\sum_{g=1}^j q_g}{2} \quad (9)$$

$$AD = \frac{\sum_{g=1}^j a_g}{2} \quad (10)$$

4 RESULTADOS

4.1 Perfil temporal dos índices de vegetação

A primeira parte dos resultados diz respeito à análise dos resultados obtidos para os dois índices de vegetação nas seis safras agrícolas analisadas.

4.1.1 Conjunto de imagens analisados

Os resultados do pré-processamento das imagens na etapa de georreferenciamento das imagens dos sensores TM/L5 e LISS-III/IRS-P6 encontram-se nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 4 - Imagens do sensor TM/Landsat5 obtidas conforme os parâmetros utilizados no estudo

SAFRA/ORDEM	Imagem	Data	Erro Médio Quadrático
2009/1	2008_277	03/10/2008	0,447
2009/2	2008_341	06/12/2008	0,494
2009/3	2008_357	22/12/2008	0,412
2009/4	2009_007	07/01/2009	0,431
2009/5	2009_023	23/01/2009	0,369
2009/6	2009_087	28/03/2009	0,388
2009/7	2009_103	13/04/2009	0,442
2009/8	2009_119	29/04/2009	0,516
2010/1	2009_183	02/07/2009	0,479
2010/2	2009_263	20/09/2009	0,489
2010/3	2010_042	11/02/2010	0,388
2010/4	2010_090	31/03/2010	0,402
2010/5	2010_106	16/04/2010	0,640
2011/1	2010_234	22/08/2010	0,398
2011/2	2010_314	10/11/2010	0,429
2011/3	2010_362	28/12/2010	0,421
2011/4	2011_109	19/04/2011	0,525
2011/5	2011_125	05/05/2011	0,416
2012/1	2011_282	10/09/2011	0,334
2012/2	2011_301	28/10/2011	0,345

Tabela 5 - Imagens do sensor LISS-III/IRS-P6 obtidas conforme os parâmetros utilizados no estudo

SAFRA/ORDEM	Imagem	Data	Erro Médio Quadrático
2012/3	2012_048	17/02/2012	0,485
2012/4	2012_144	23/05/2012	0,409
2013/1	2012_288	14/10/2012	0,408
2013/2	2012_360	25/12/2012	0,388
2013/3	2013_066	07/03/2013	0,395

O erro médio quadrático para o registro geométrico variou entre 0,38 e 0,64, sendo considerado adequado quando os valores situam-se na faixa de valores próximos da unidade que neste caso corresponde ao tamanho do pixel na imagem de menor resolução espacial, 30 metros para o sistema Landsat.

A Tabela 6 apresenta somente a ordenação e a data de cada imagem OLI/L8, tendo em vista que este sensor disponibiliza imagens já referenciadas geometricamente para o sistema UTM. O erro de posicionamento do sistema Landsat-8 é de aproximadamente 50% do tamanho do pixel, ou seja, os resultados do georreferenciamento das imagens TM e LISS-III ficaram compatíveis para fins de comparação com as imagens do sensor OLI.

Tabela 6 - Imagens do sensor OLI-Landsat8 obtidas conforme os parâmetros utilizados no estudo

SAFRA/ORDEM	Imagem	Data
2014/1	2013_242	30/08/2013
2014/2	2013_322	18/11/2013
2014/3	2013_338	04/12/2013
2014/4	2014_005	05/01/2014
2014/5	2014_021	21/01/2014
2014/6	2014_007	06/02/2014
2014/7	2014_117	27/04/2014

4.1.2 Resultados dos índices para os seis usos da terra

Os resultados obtidos para os valores médios, mínimos e máximos dos dois índices utilizados no estudo para cada um dos seis usos da terra nas trinta e duas imagens do conjunto de dados das seis safras agrícolas encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados médios, mínimos e máximos para os dois índices de vegetação para os seis usos da terra no período de 2008 a 2014.

Uso da terra	NDVI			NDWI		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
Água	-0,10	-0,18	0,04	0,16	0,01	0,37
Arroz	0,12	-0,25	0,52	0,12	-0,25	0,52
Banhado	0,38	0,06	0,54	-0,01	-0,27	0,16
Campo	0,41	0,08	0,54	0,03	-0,09	0,16
Mata	0,56	0,14	0,69	0,24	0,12	0,34
Solo	0,15	0,05	0,26	-0,17	-0,31	0,03

Os resultados obtidos para os valores de NDVI variaram de um valor mínimo de -0,18 para a água até um valor máximo de 0,69 para o uso da terra com mata nativa. A água apresentou valores entre -0,18 e 0,04; o arroz variou entre -0,04 e 0,66; o uso com vegetação nativa de banhado oscilou entre 0,06 a 0,54; campo

entre 0,08 e 0,54; vegetação de mata nativa com um mínimo de 0,14 e um máximo de 0,69 e as amostras de solo exposto variaram entre 0,05 e 0,25.

Os resultados concordam com Ponzoni & Shimabukuro (2009), os quais afirmam que valores típicos de NDVI variam entre zero e 0,8 para alvos terrestres, ficando abaixo de zero para corpos de água superficiais.

Os valores de NDWI variaram do valor mínimo de -0,31 para o uso da terra definido como solo exposto, até um valor máximo de 0,52 para o uso da terra com arroz irrigado. A água apresentou valores entre -0,01 e 0,37; o arroz variou entre -0,25 e 0,52; vegetação de banhado oscilou entre -0,27 a 0,16, enquanto a de campo, entre -0,09 e 0,16; o uso com mata nativa teve um mínimo de -0,31 e um máximo de 0,03; o solo exposto apresentou valores entre -0,31 e 0,03.

Gao (1996) trabalhando com dados do sensor *Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS) nos Estados Unidos da América (EUA) obteve valores de NDWI negativos para as feições de solos expostos, valores próximos de zero para a fisionomia de campos nativos e na faixa de 0,2 para cultivos irrigados, os quais concordam com os obtidos neste estudo.

4.1.2 Resultados dos índices por safra agrícola

Os resultados dos perfis temporais dos dois índices de vegetação para as seis safras agrícolas analisadas se encontram nas Figuras 8 a 19.

A safra agrícola que abrangeu os anos de 2008 e 2009 foi a que apresentou o maior número de cenas com baixa cobertura de nuvens, totalizando oito imagens disponíveis para a região de estudo no período entre outubro de 2008 e maio de 2009.

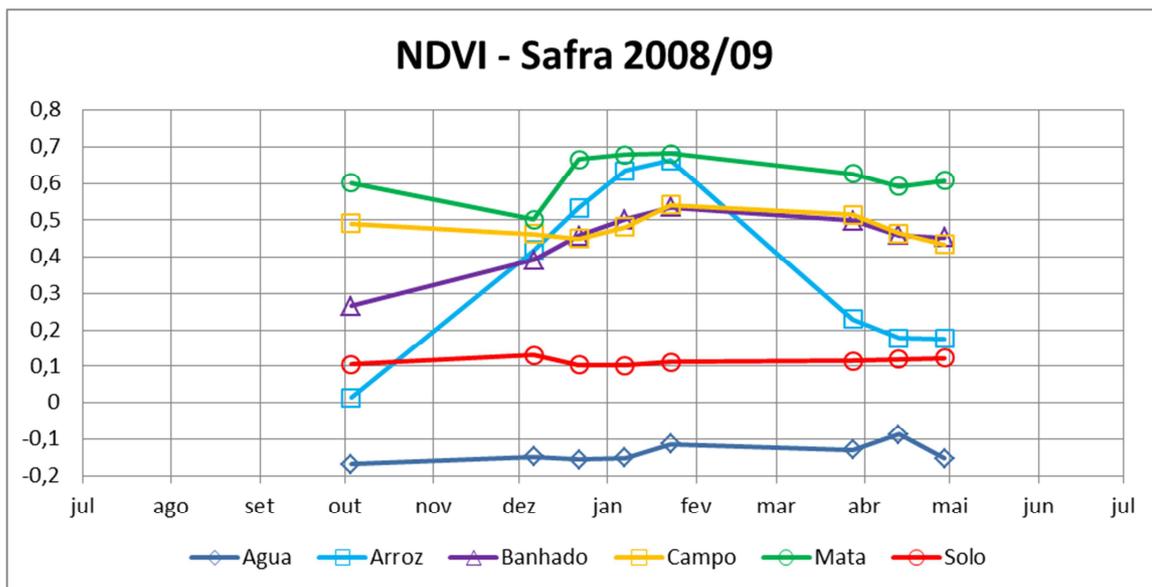


Figura 8 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2008/2009

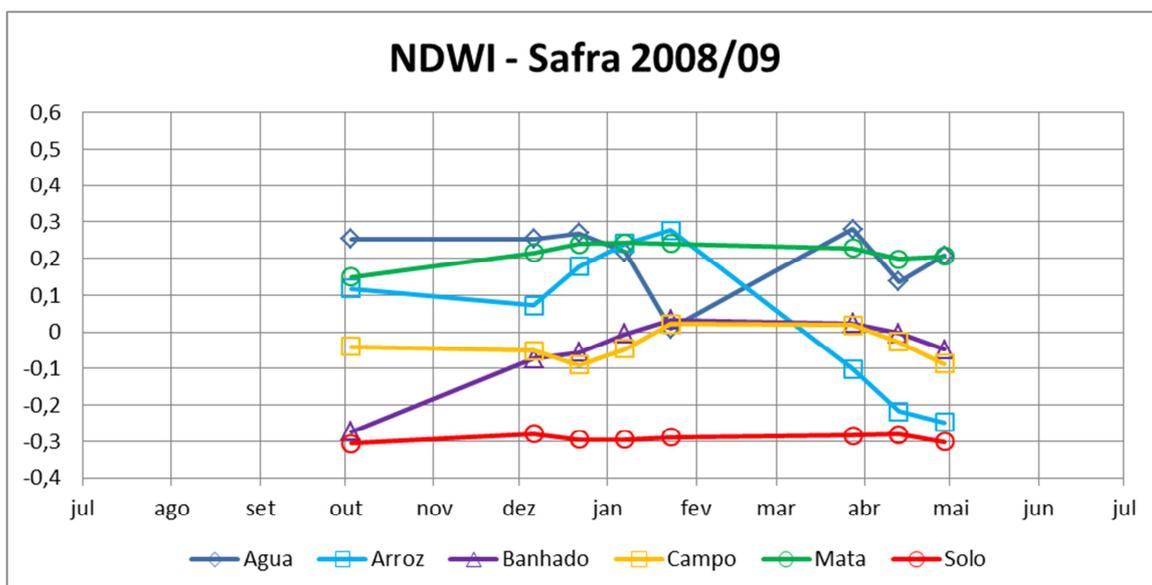


Figura 9 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2008/2009

A safra seguinte (2009 a 2010) possibilitou o imageamento de cinco cenas com condições adequadas, ao mesmo tempo em que abrange a maior cobertura temporal com aproximadamente dez meses de amplitude, considerando as seis safras analisadas.

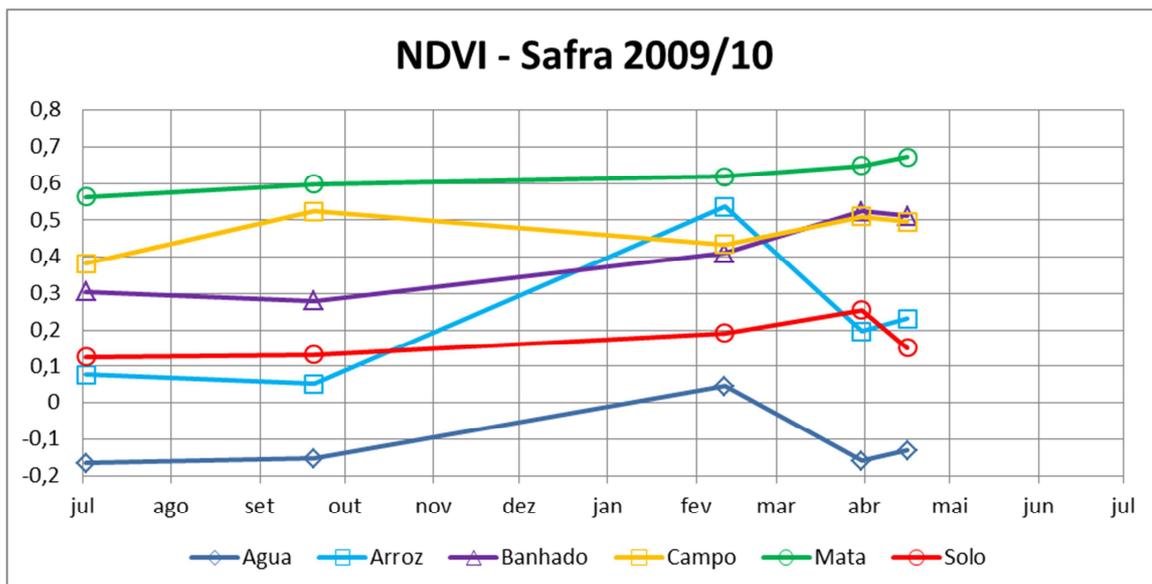


Figura 10 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2009/2010

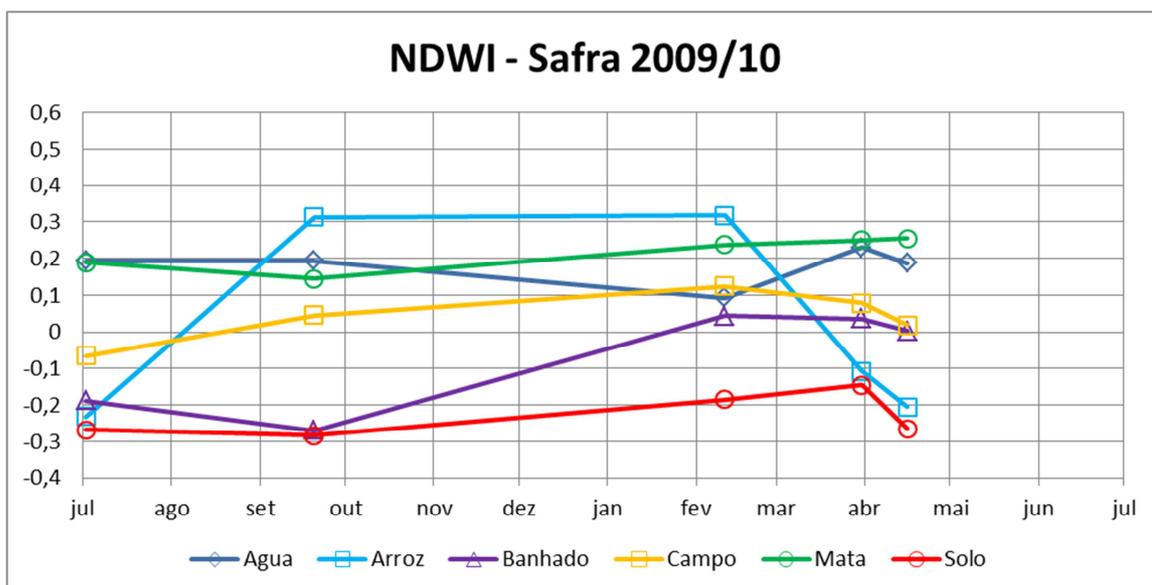


Figura 11 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2009/2010

O período relativo aos anos de 2010 e 2011 também apresentou cinco imagens, porém com um intervalo de oito meses entre a primeira e a última cena. Destaca-se que a imagem inicial apresentou anomalias com referência à transparência atmosférica, resultando em baixos índices de NDVI para todos os tipos de cobertura da terra nesta primeira imagem da safra. Aparentemente o NDWI não apresentou o mesmo padrão de influência atmosférica do NDVI, corroborando as afirmações de Gao (1996) de que este índice seria menos afetado pelas condições atmosféricas quando se compara os resultados dos dois índices para as mesmas feições.

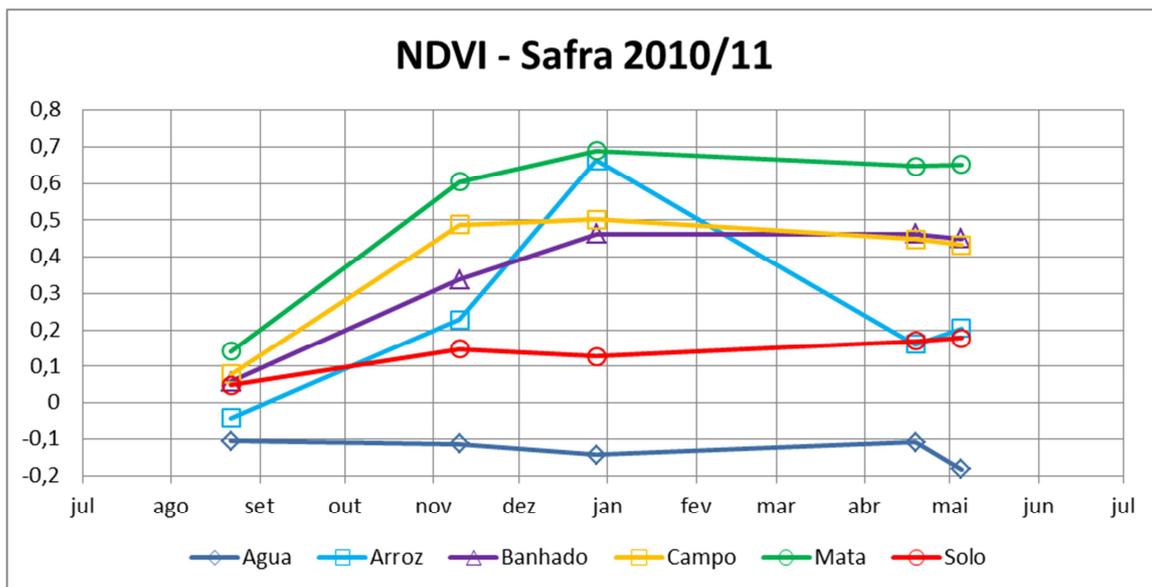


Figura 12 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2010/2011

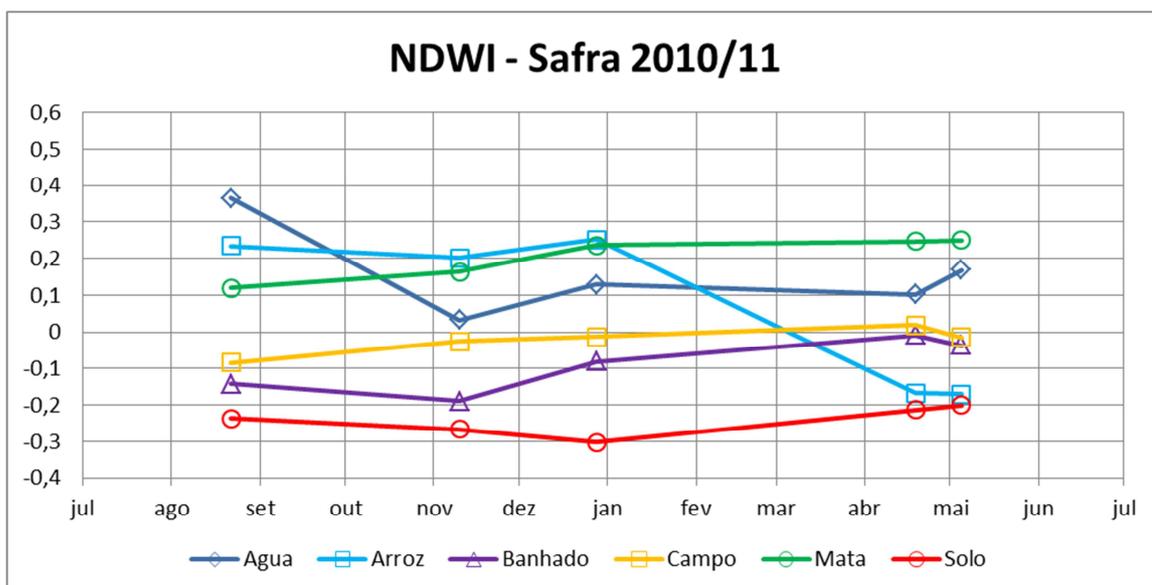


Figura 13 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2010/2011

Durante o acompanhamento da safra de 2011 e 2012 ocorreu a descontinuidade do imageamento do sistema Landsat-5 a partir de novembro de 2011 (NASA, 2012). Em virtude deste fato, houve a necessidade de substituição do satélite, tendo sido escolhido o sensor LISS-III em função da disponibilidade de imagens gratuitas e da similaridade das resoluções espaciais e espectrais com relação ao sensor TM-5. Foram obtidas quatro imagens, duas do sensor TM e duas do sensor LISS-III.

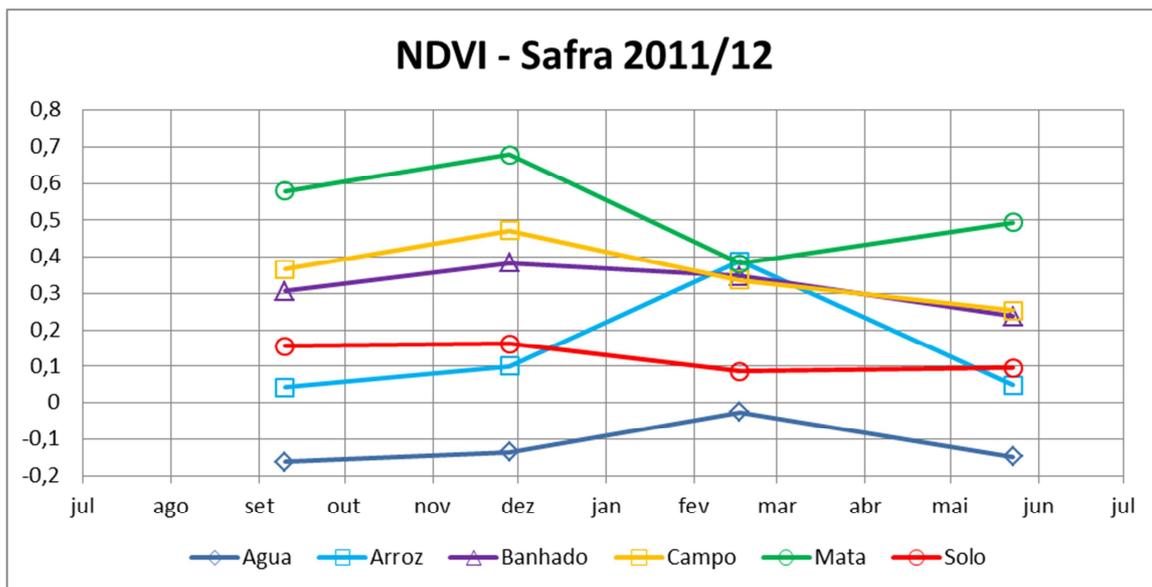


Figura 14 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2011/2012

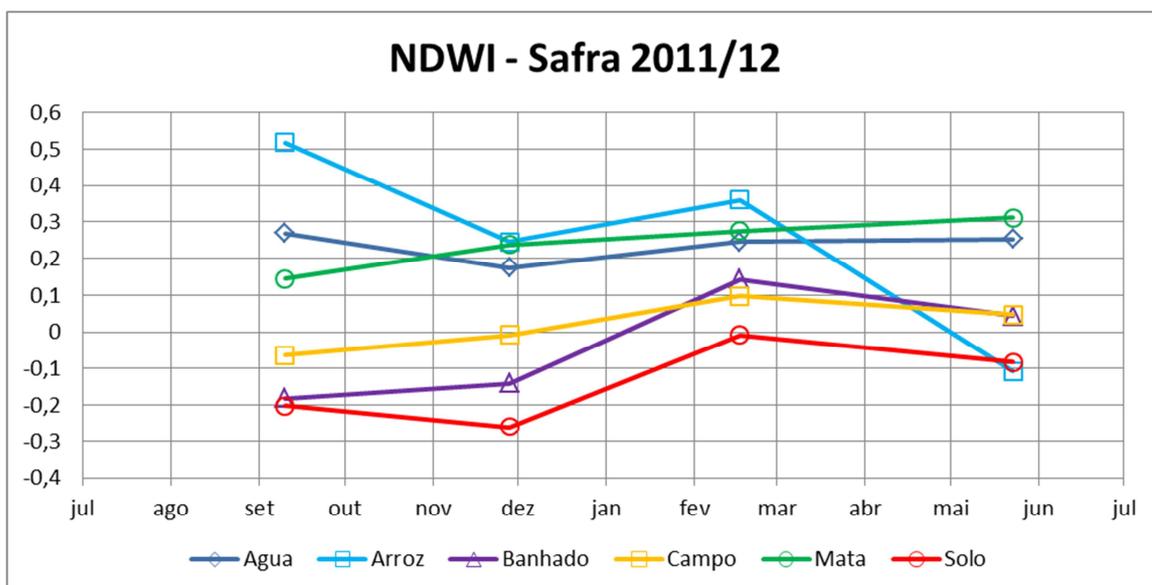


Figura 15 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2011/2012

A safra de 2012 e 2013 foi a que teve menor número de imagens disponíveis, somente três, porém com razoável distribuição ao longo do ciclo de crescimento da lavoura de arroz. Tal fato pode ser creditado ao menor intervalo de revisita do sistema IRS (24 dias) quando comparado ao sistema Landsat (16 dias).

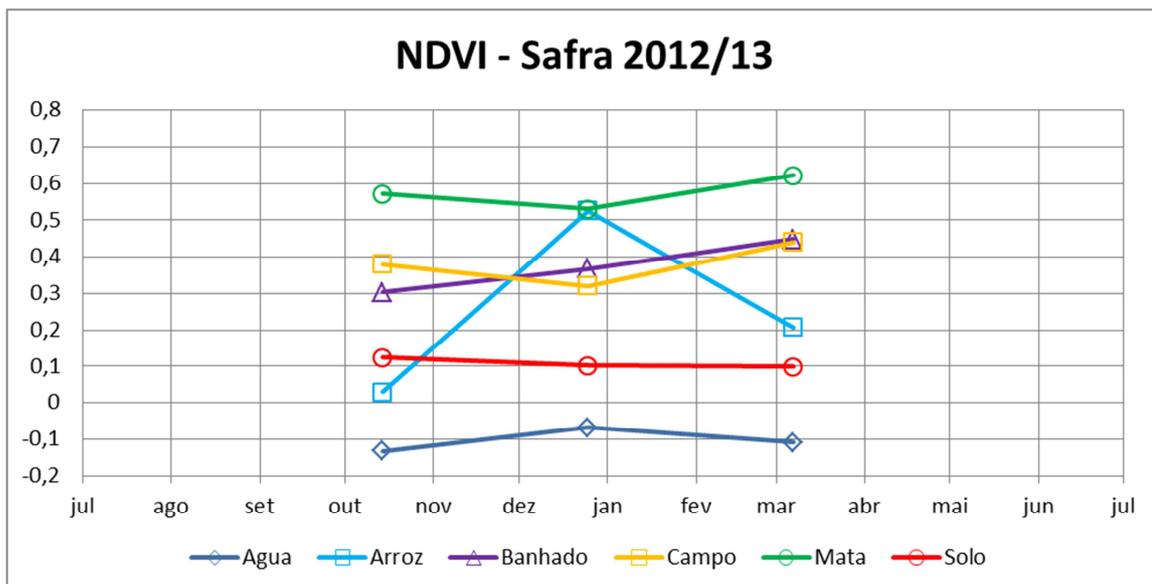


Figura 16 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2012/2013

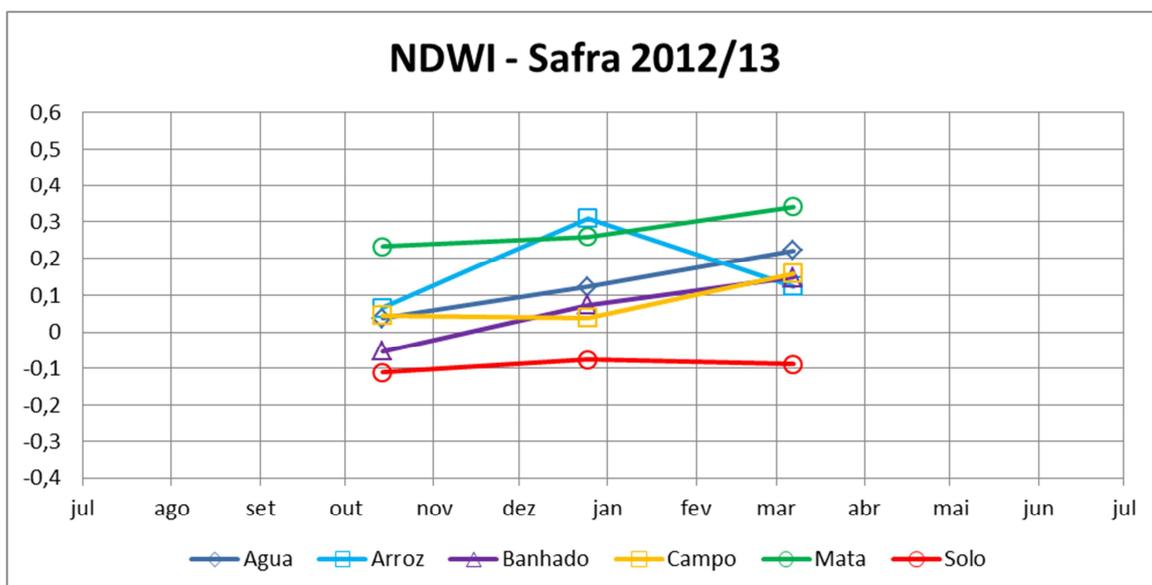


Figura 17 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2012/2013

A safra correspondente aos anos de 2013 e 2014 incorporou pela primeira vez os dados oriundos do novo sensor OLI (Landsat-8). Os valores de NDVI ficaram sempre abaixo dos outros sensores quando consideramos imagens da mesma data juliana (Figura 18) embora o mesmo não tenha ocorrido com o NDWI (Figura 19).

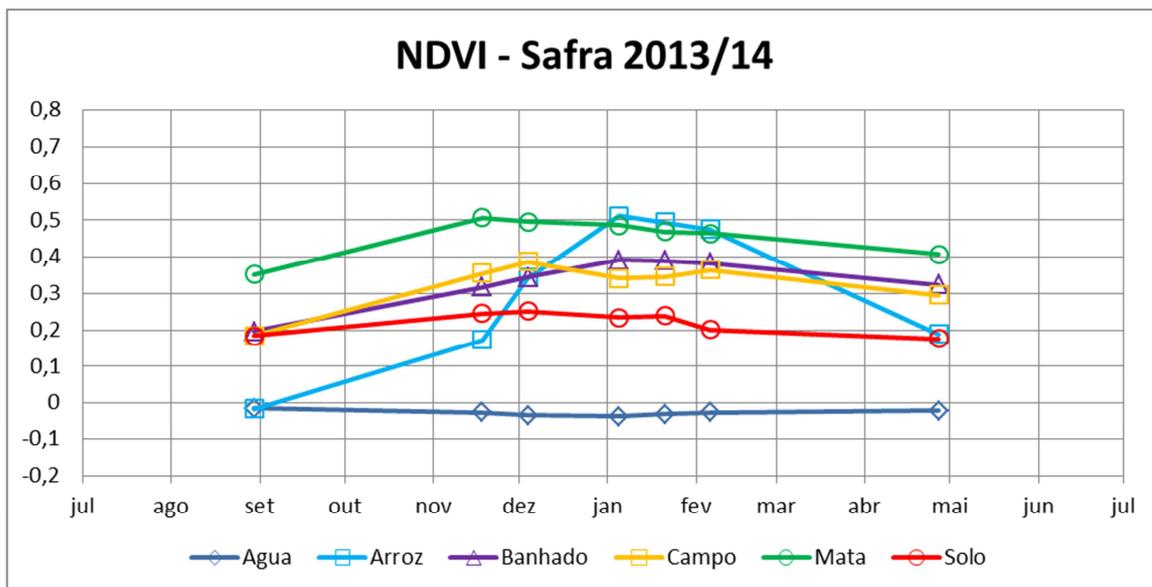


Figura 18 – Perfil temporal do NDVI para a safra agrícola 2013/2014

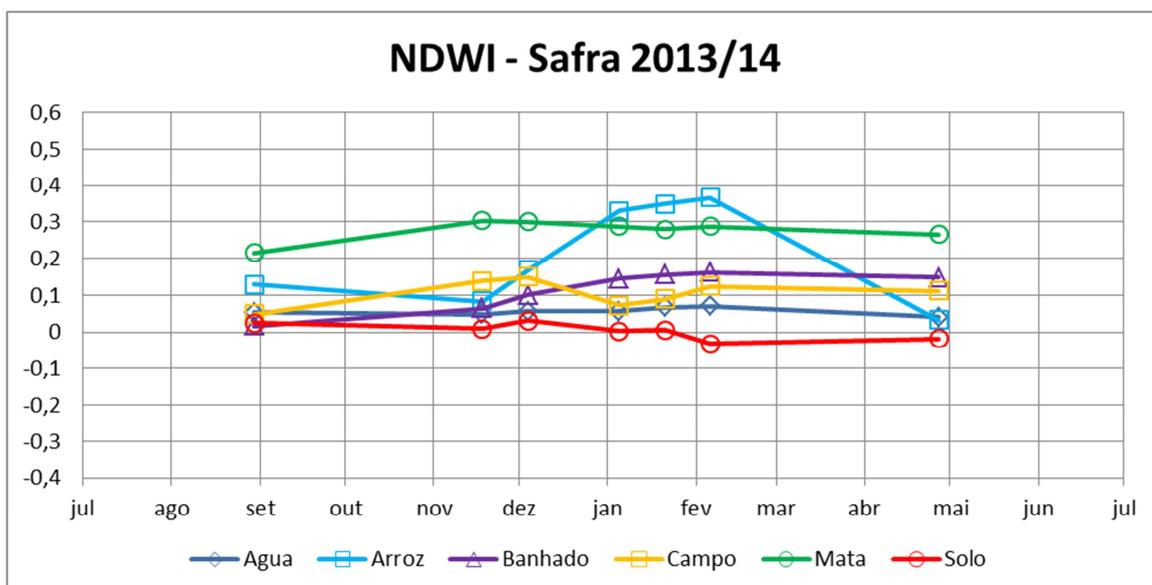


Figura 19 – Perfil temporal do NDWI para a safra agrícola 2013/2014

O motivo desta alteração no NDVI pode ser creditado ao fato de que as bandas relativas às faixas do vermelho (VER), do infravermelho próximo (IVP) e do infravermelho médio (IVM) apresentam novos intervalos de variação (Tabela 1).

Estudos recentes (Li *et al.*, 2014), comparando os mesmos índices calculados a partir dos sensores ETM+ (Landsat 7) e OLI (Landsat 8) também encontraram diferenças de 0,1 para o NDVI e de 0,05 para o NDWI. A ausência de correção atmosférica nas imagens dos dois sensores (TM e LISS-III) também pode ter contribuído para esta diferença.

4.1.3 Perfil temporal dos usos da terra

Considerando a variação temporal do NDVI para o conjunto das seis safras, percebe-se dois tipos de perfis distintos. Os usos da terra que não apresentam variação ao longo do tempo como as lâminas de água superficiais e as áreas de solos expostos, e os tipos de uso da terra que apresentam tendências curvilíneas de variação em função da época do ano, representando as diversas formas de vegetação (natural ou antrópica).

A tipologia florestal, neste caso a amostra composta pelos remanescentes da vegetação florestal, fitofisionomia que pertence à Floresta Ombrófila de Terras Baixas, apresentou os maiores valores de NDVI de todos os seis usos da terra analisados. Este padrão é o esperado e concorda com a literatura, a exemplo do trabalho que estimou o NDVI de diferentes fitofisionomias para a bacia do rio dos Sinos, vizinha à área da bacia hidrográfica a que pertence o local de estudo (Oliveira, 2013).

Os dados encontrados para água e para o solo exposto também mostraram um padrão típico sem variação ao longo do ano em concordância com a literatura (NOVO, 2001; VALERIANO *et al.* 1995). Os valores de NDVI obtidos para a água foram negativos, variando entre -0,2 e -0,1 com baixa amplitude ao longo do tempo, assim como para as amostras que representam o solo, com valores variando ao redor de 0,1 durante todo o período estudado.

Os usos da terra definidos como banhado e campo apresentaram comportamento similar com o padrão para a vegetação foi de incremento nos valores de julho a janeiro, estabilizando no mesmo patamar até março e abril devido à ocorrência frequente de déficits hídricos no período de verão, começando a decrescer em maio em virtude da diminuição das temperaturas do ar no inverno. Guasseli (2005) utilizou o NDVI para estimar padrões de variação da vegetação de banhado no RS, obtendo valores mínimos na faixa de 0,1 e máximos de 0,6.

O arroz foi o tipo de cobertura que apresentou a maior amplitude de variação temporal, oscilando entre zero e 0,6, aproximando-se da curva espectro-temporal típica para cultivos anuais. Os resultados concordam com os valores obtidos para a mesma situação (KLERING, 2012; ALVES, 2009).

Os perfis temporais do NDWI apresentam variação associada ao elemento água, justamente pela substituição da banda do vermelho, cuja reflectância está inversamente associada aos pigmentos fotossintetizantes, pela banda do infravermelho médio, diretamente associada ao conteúdo de água da vegetação (GAO, 1996).

Neste caso, a curva de variação temporal não está associada aos parâmetros biofísicos da vegetação, tais como o IAF ou a biomassa, mas somente à condição de ocorrência de vegetação verde e úmida (alta resposta na faixa do infravermelho próximo e variação da resposta no IV médio em função do conteúdo de água interno à planta).

Em comparação com o NDVI, tanto o formato das curvas quanto os valores do índice variaram significativamente, sendo que a amplitude de variação menor pode restringir seu uso como classificador.

Em geral, os maiores valores de NDWI estiveram associados aos usos água, arroz e mata e os menores valores aos usos campo, solo e banhado. Com exceção do banhado, cujo padrão parece incoerente com o esperado, o NDWI dos demais usos refletiram a presença maior e menor de umidade na superfície, respectivamente.

Pode-se inferir que no caso dos usos com maior NDWI, a relação mais provável é com o total de água da superfície. A ampliação da área superficial através das folhas poderia explicar o porquê dos maiores valores para a mata e arroz e valores relativamente menores para a água, com superfície unitária.

4.2. Perfil temporal do arroz irrigado

A análise do perfil temporal da lavoura de arroz irrigado forneceu a base para a escolha dos valores de limiares utilizados na chave de classificação. Apesar da semelhança na distribuição ao longo da safra entre as curvas temporais da vegetação, seja natural ou agrícola, percebe-se que o arroz foi o uso da terra que apresentou a maior amplitude de variação dentro de um ciclo anual de cultivo na área do estudo. Com isto, as chances do classificador ter sucesso na discriminação entre os dois tipos de vegetação aumentam proporcionalmente.

4.2.1 Resultados dos índices de vegetação para a cultura do arroz

Quando comparados com a literatura, os valores de NDVI obtidos para a lavoura de arroz concordam parcialmente com os obtidos por Klering (2007), que analisou o NDVI de imagens do sensor MODIS para a mesma cultura e para a região da planície costeira interna. Os valores ligeiramente menores podem resultar do uso dos dados sem correção atmosférica.

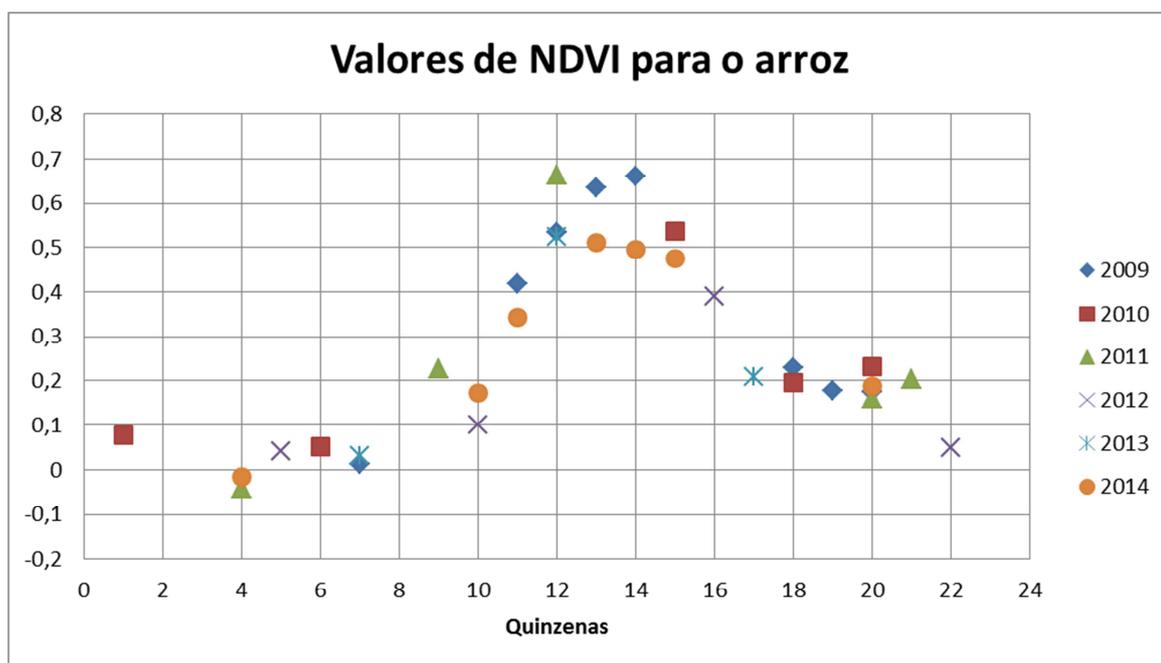


Figura 20 Resultados de NDVI para a cultura do arroz em Viamão-RS nas seis safras analisadas

Conforme se observa na Figura 20, os valores de NDVI são menores quando comparados aos da literatura, mesmo considerando o desvio-padrão das amostras, porém a forma da curva e suas inflexões permanecem as mesmas.

A Figura 21 mostra os padrões de variação espectro-temporal do NDWI para o arroz nas seis safras analisadas. Verificam-se variações ao longo do ciclo similares ao encontrado para o NDVI, patamar no meio do ciclo e queda abrupta após a colheita, embora o período de plantio não apresente um padrão coerente, inclusive oscilando entre os menores e maiores valores encontrados em todo o ciclo, dentro desta fase.

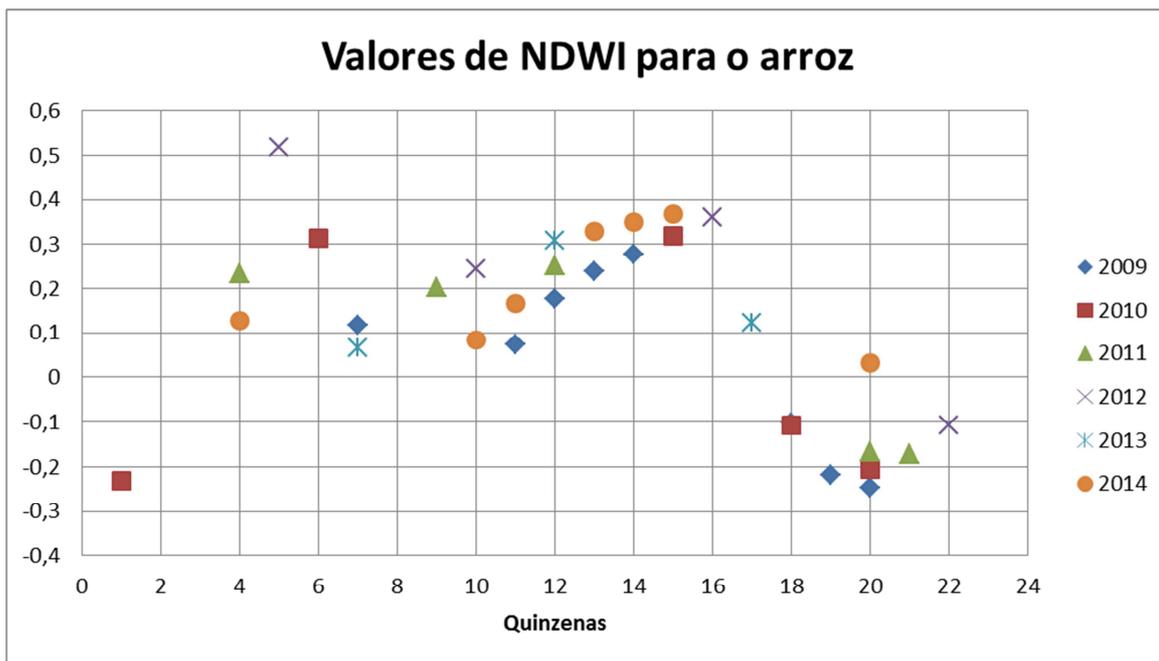


Figura 21 - Resultados de NDWI para a cultura do arroz em Viamão-RS nas seis safras analisadas

Como este índice está associado com a quantidade de água presente na planta, um maior IAF significaria um maior conteúdo de água em função de ser uma cultura irrigada, com água sempre disponível para a evapotranspiração, sem limitação de crescimento por déficit hídrico.

4.2.2 Determinação dos limiares para o mapeamento do arroz

Os resultados obtidos na avaliação da evolução temporal dos dois índices de vegetação, NDVI e NDWI, foram utilizados na definição dos limiares de corte visando a obtenção dos algoritmos para o mapeamento do uso da terra com arroz irrigado a partir das três imagens correspondentes às três principais fases (plantio, desenvolvimento vegetativo e colheita) do ciclo da cultura.

Os limiares foram determinados empiricamente a partir da observação do comportamento dos dois índices ao longo do ciclo fenológico da cultura do arroz. Comparando-se as curvas temporais para os dois índices, percebe-se uma tendência senoidal para a curva do NDVI e cossenoidal para o NDWI.

Neste contexto, o algoritmo do NDVI replica a tendência de variação da senóide, iniciando o ciclo a partir de um valor mínimo, alcançando o máximo e

posteriormente outro mínimo, ou seja, com dois limiares bem nítidos, respectivamente as transições entre o período de plantio e de pleno desenvolvimento vegetativo, e deste com o período de colheita. O primeiro limiar ficou situado próximo ao valor de 0,2 e o segundo próximo de 0,3, com picos de valores até 0,7 entre os dois pontos notáveis. O algoritmo de classificação utilizando o NDVI pode ser visualizado esquematicamente na figura 22.



Figura 22 - Árvore de decisão para a classificação através do algoritmo que utiliza o NDVI.

A análise da variação do NDWI, desconsiderando uma única observação isolada situada no mês de julho de 2009 e temporalmente localizada no período inicial dos trabalhos de plantio, apresenta similaridade com uma função cossenoidal, iniciando com um valor máximo, evoluindo até um valor mínimo.

A forma da curva definiu que a regra do algoritmo classificador apresentasse somente um valor de limiar, localizado entre o período de pleno desenvolvimento vegetativo e a fase da colheita. O algoritmo de classificação utilizando o NDWI pode ser visualizado na figura 23.

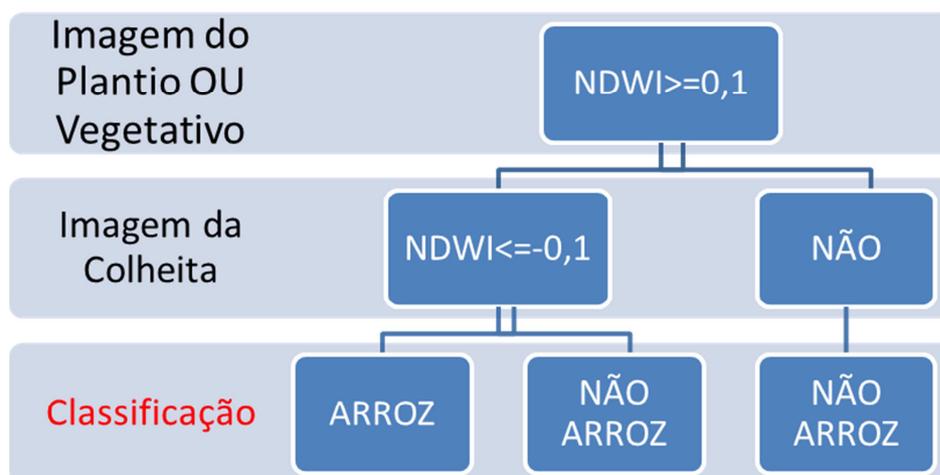


Figura 23 - Árvore de decisão para a classificação através do algoritmo que utiliza o NDWI.

4.3 Análise da acurácia dos algoritmos de mapeamento

Os resultados obtidos no mapeamento para os algoritmos de classificação temporal dos dois índices de vegetação para as três safras agrícolas testadas, encontram-se sumarizados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Resultados da análise de acurácia para o mapeador do NDVI

Safra agrícola	Concordância Global	Quantidade de discordância	Alocação da discordância	Índice Kappa	Número de amostras	Número de imagens
2010	77%	23%	zero	0,25	239	5
2011	63%	34%	3%	0,24	236	5
2012	77%	21%	2%	0,20	206	4

O algoritmo do NDVI para as três safras obteve índices Kappa de 0,25; 0,24 e 0,20 respectivamente, todos enquadrados na classe de concordância fraca considerando a escala de comparação.

Tabela 9 - Resultados da análise de acurácia para o mapeador do NDWI

Safra agrícola	Concordância Global	Discordância na quantidade	Discordância na alocação	Kappa	Número de amostras	Número de imagens
2010	88%	10%	2%	0,68	239	5
2011	59%	40%	1%	0,17	236	5
2012	76%	22%	2%	0,16	206	4

O algoritmo do NDWI para a safra 2009/10 foi o que apresentou melhor desempenho, com índice Kappa de 0,68 e considerado como adequado na escala

de comparação. As duas safras seguintes (2010/11 e 2011/12) apresentaram índices classificados como pobres, respectivamente de 0,17 e 0,16.

A análise comparada da acurácia dos dois algoritmos mapeadores para as três safras pode ser visualizada na Figura 24. A análise da discordância permite interpretar os resultados obtidos pelos dois mapeadores com relação às quantidades mapeadas, bem como, com relação à alocação da discordância.

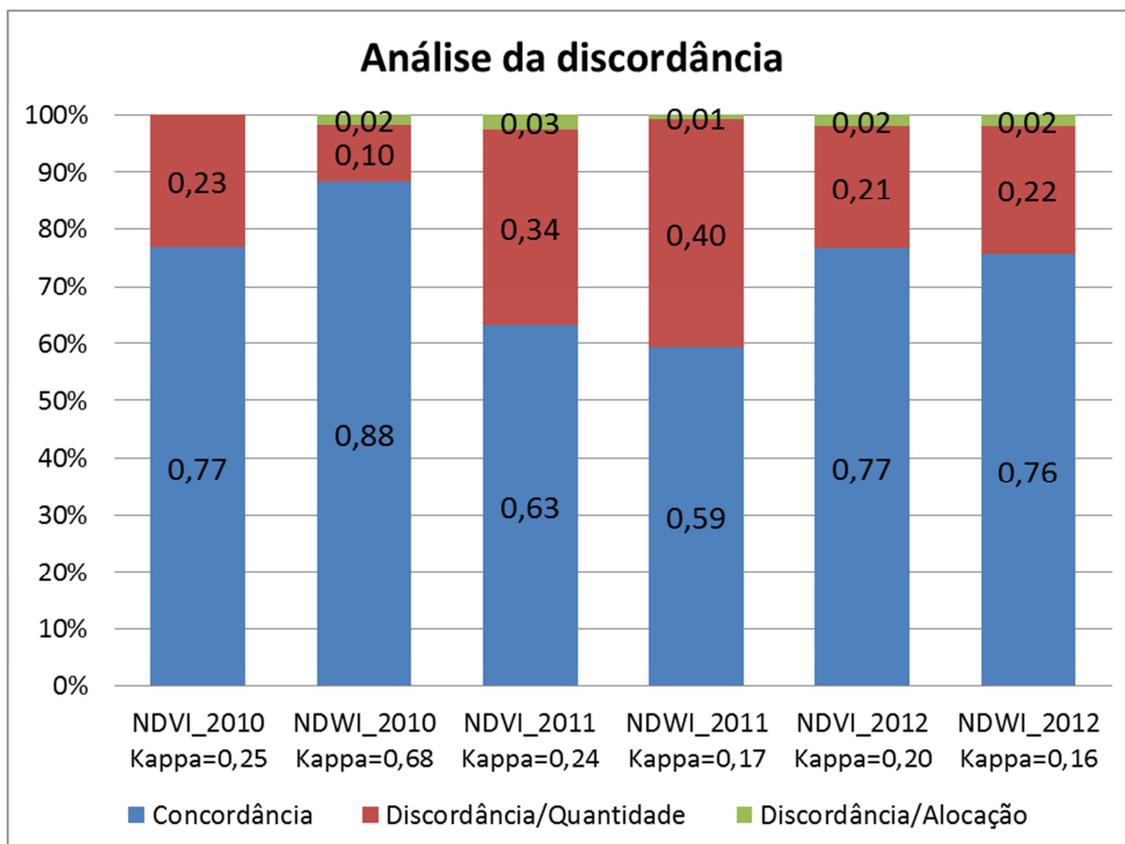


Figura 24 - Resultados do mapeamento da área de arroz para os dois algoritmos classificadores baseado nos valores de NDVI e NDWI para três safras agrícolas entre os anos de 2009 e 2012.

Considerando que a metodologia empregada tem como objetivo a auditoria dos lotes com arroz irrigado, a alocação da discordância passa a ser importante no sentido de estimar a precisão posicional do algoritmo mapeador.

Neste contexto, percebe-se que os dois algoritmos apresentaram pouca ou nenhuma discordância na alocação, remetendo a maior parte dos erros de classificação às quantidades estimadas, ou seja, os resultados obtidos remetem aos problemas relacionados à sensibilidade do algoritmo com relação aos limiares de

decisão, os quais provavelmente devem variar entre as safras agrícolas em função de alterações no calendário de plantio.

Outra questão verificada durante o decorrer do trabalho foi em relação à qualidade das amostras de referência de campo, As lavouras do perímetro irrigado apresentam uma alta variabilidade em relação às práticas de manejo, além de uma variação nos calendários de plantio entre os diversos agricultores envolvidos. A desuniformidade das amostras de lavouras da agricultura familiar influenciou decisivamente na sensibilidade dos algoritmos, não permitindo captar as diferentes fases dos plantios dentro de uma mesma data de passagem do sensor.

4.3.1 Análise de discordância da safra 2009/2010

Os resultados obtidos na classificação da safra agrícola 2009/2010 para o algoritmo que utiliza a chave do NDVI foram comparados com a imagem de referência (figura 25).

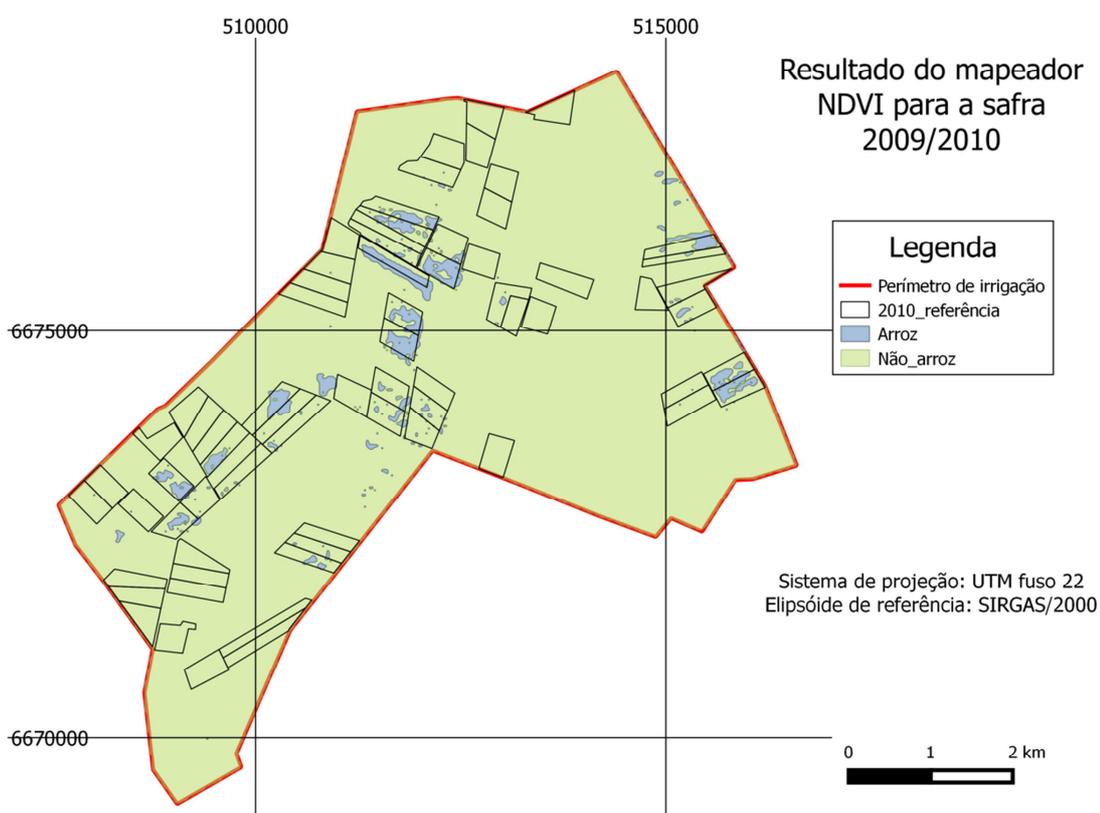


Figura 25 - Resultados do mapeamento do algoritmo classificador pelo índice NDVI na safra agrícola 2009/2010.

A matriz de confusão (Tabela 10) indicou um índice de concordância global de 77% (184 amostras) com treze amostras corretamente classificadas para a classe arroz e 171 amostras corretas para a classe não arroz. Considerando-se toda a área mapeada, a discordância global ficou em 23% dos pixels e se deve exclusivamente à discordância na quantidade (QD).

Considerando as classes individuais, apenas 19% dos pixels de referência de arroz foram corretamente classificados (AM), sendo o restante classificado como não arroz, o que resulta em erro de omissão de 81%. Para a classe não arroz todos os pixels de referência foram corretamente classificados.

Os dados à direita da tabela indicam que não houve inclusão de outras classes nas áreas classificadas como arroz, ou seja, todos os pixels mapeados como arroz pertencem de fato a esta classe, razão do erro de inclusão ser zero. Para a classe não arroz, 24% dos pixels atribuídos a esta classe eram na verdade áreas de arroz.

Tabela 10 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDVI na safra agrícola 2009/2010

Estimado pelo classificador	Referência de campo					
	Arroz	Não arroz	Total	AU	Inclusão	QD
Arroz	0,05	zero	0,05	1,00	zero	0,23
Não arroz	0,23	0,72	0,95	0,76	0,24	
Total	0,28	0,72				
AM	0,19	1,00				
Omissão	0,81	zero				
AD	zero				0,77	

Os resultados obtidos para o mapeamento do arroz na safra 2009/2010 utilizando o algoritmo do NDWI pode ser visualizado na figura 26 e a matriz de confusão é apresentada na Tabela 11.

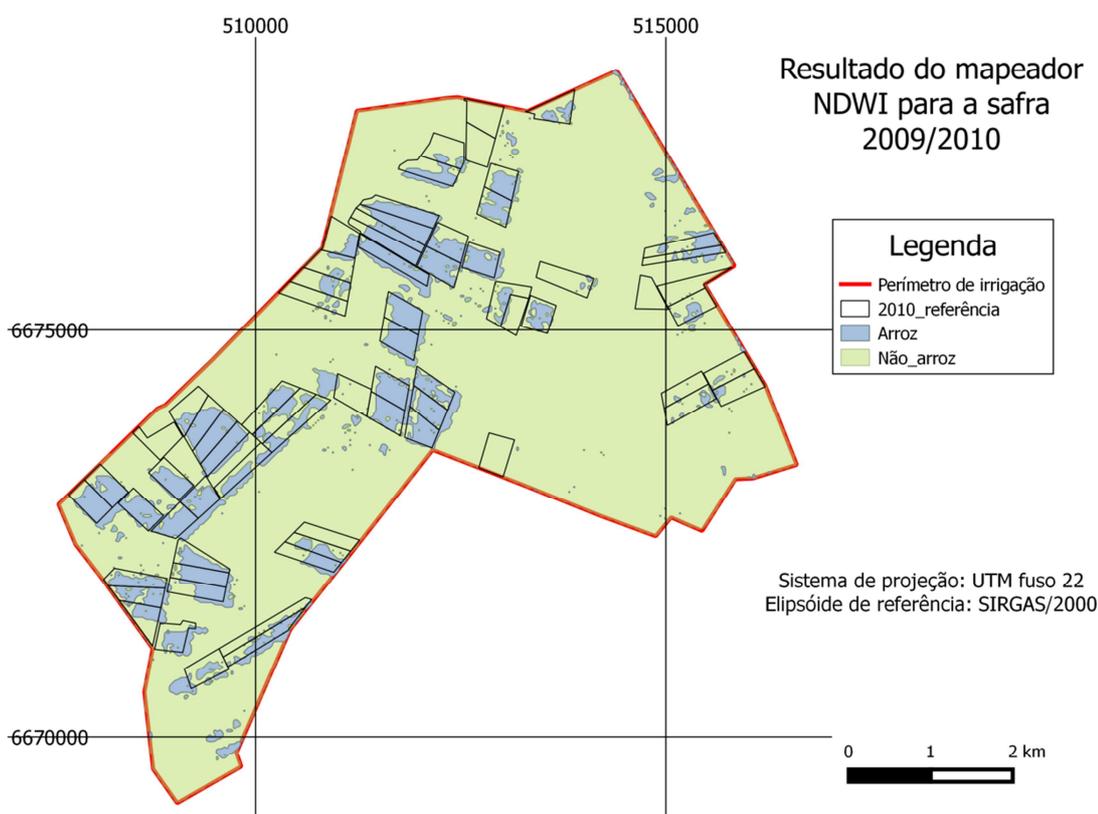


Figura 26 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDWI na safra agrícola 2009/2010.

A matriz de confusão indicou um índice de acerto de 88% (211 amostras) com 42 amostras sendo corretamente classificadas da classe arroz e 169 para a classe não arroz. A análise de discordância para o mapeamento das áreas de arroz pelo NDWI encontra-se sumarizada na Tabela 14 e mostra que este algoritmo apresentou o maior índice de acertos em todos os seis arranjos testados com 88% de eficiência.

Analisando individualmente, 62% dos pixels de referência de arroz foram corretamente classificados (AM), sendo o restante classificado como não arroz, o que resulta em erro de omissão de 38%. Para a classe não arroz a maioria dos pixels de referência foram corretamente classificados com omissão de somente 1%.

Os dados relacionados com a inclusão da classe não arroz nas áreas classificadas como arroz foram de 5%, enquanto para a classe não arroz, 87% dos pixels atribuídos a esta classe foram mapeados, resultando em um erro de inclusão de 13%.

Tabela 11 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDWI na safra agrícola 2009/2010

Referência de campo						
Estimado pelo classificador	Arroz	Não arroz	Total	AU	Inclusão	QD
Arroz	0,19	0,01	0,20	0,95	0,05	0,10
Não arroz	0,11	0,71	0,82	0,87	0,13	
Total	0,28	0,72				
AM	0,62	0,99				
Omissão	0,38	0,01				
AD	0,02				0,88	

4.3.2 Análise de discordância da safra 2010/2011

Os resultados obtidos na classificação da safra agrícola 2010/2011 para o algoritmo que utiliza a chave do NDVI foram comparados com a imagem de referência (Figura 27).

A análise de discordância da matriz de confusão encontra-se sumarizada pela Tabela 12. O algoritmo apresentou um índice de acerto de 63% com 149 amostras classificadas corretamente, sendo 30 para o arroz e 119 para a classe não arroz.

Tabela 12 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDVI na safra agrícola 2010/2011

Referência de campo						
Estimado pelo classificador	Arroz	Não arroz	Total	AU	Inclusão	QD
Arroz	0,13	0,01	0,14	0,91	0,09	0,34
Não arroz	0,36	0,50	0,86	0,59	0,42	0,34
Total	0,48	0,52				0,34
AM	0,26	0,98				
Omissão	0,74	0,02				
AD	0,02	0,02	0,02			0,63

Considerando as classes individuais, apenas 26% dos pixels de referência de arroz foram corretamente classificados (AM), sendo o restante classificado como não arroz, o que resulta em erro de omissão do classificador de 74%. Para a classe não arroz quase todos os pixels de referência foram corretamente classificados com 98%

de acerto, restando uma omissão de 2%. Os dados relativos à referência de campo mostram que a inclusão de outras classes nas áreas classificadas como arroz é de 9% e na classe não arroz, de 42%.

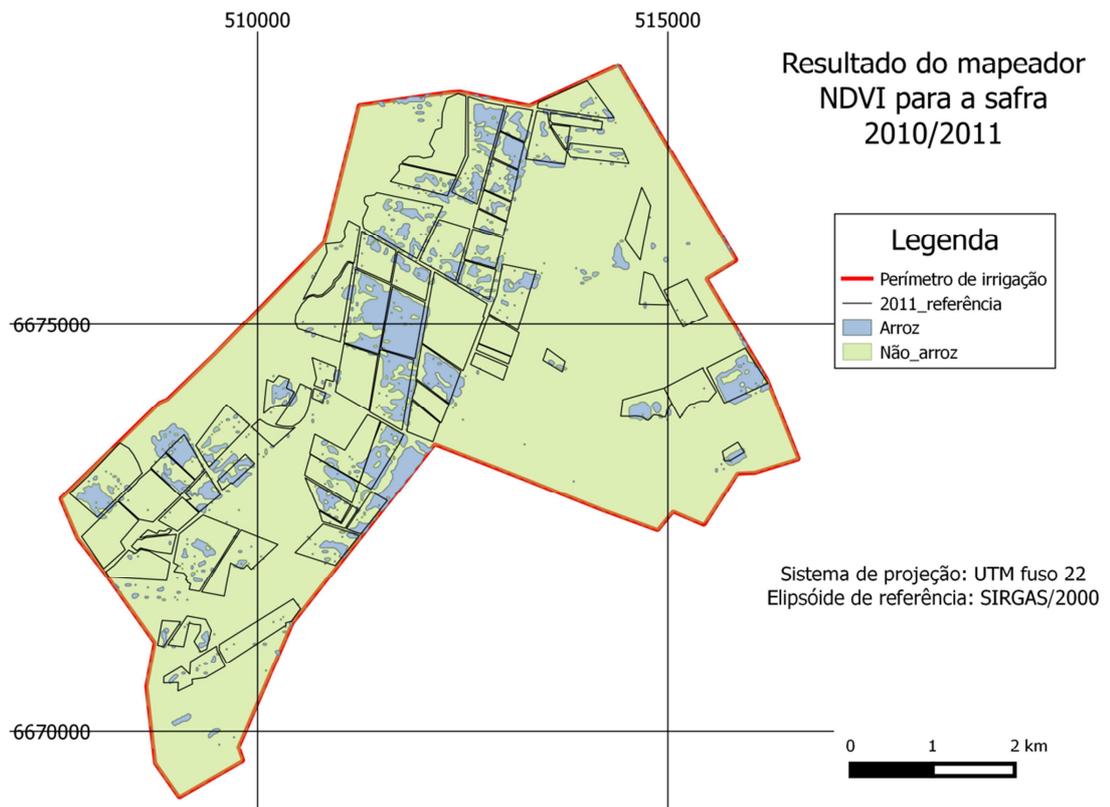


Figura 27 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDVI na safra agrícola 2010/2011.

Os resultados da análise da discordância para o algoritmo do NDWI na safra 2010/2011 é apresentado na Figura 28. A matriz de confusão indicou uma concordância de 56% (140 do total de 236 amostras), com 19 amostras corretamente classificadas para o arroz e 121 para a classe não arroz.

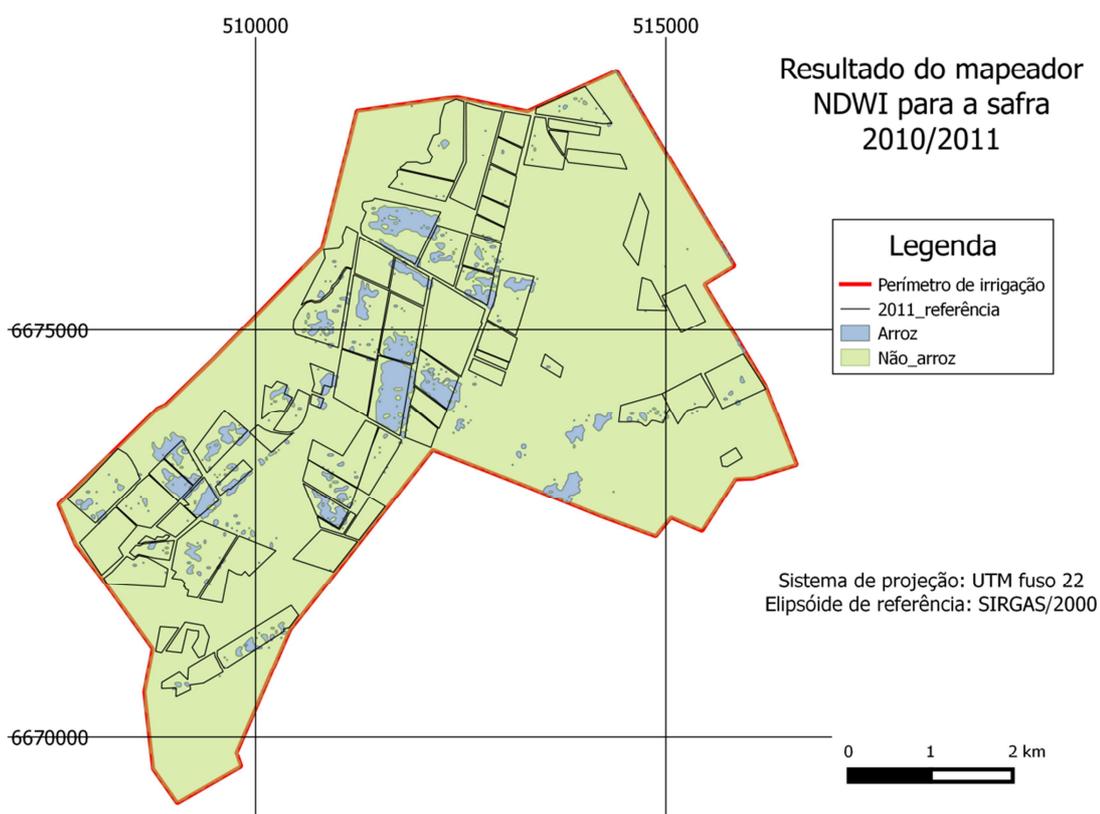


Figura 28 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDWI na safra agrícola 2010/2011.

A análise da matriz (Tabela 13) apontou 41% de discordância para este algoritmo, tratando-se do maior valor obtido para todas as seis comparações.

Tabela 13 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDWI na safra agrícola 2010/2011

Estimado pelo classificador	Referência de campo					
	Arroz	Não arroz	Total	AU	Inclusão	QD
Arroz	0,08	0,01	0,09	0,95	0,05	0,40
Não arroz	0,40	0,51	0,92	0,56	0,44	
Total	0,48	0,52				
AM	0,17	0,99				
Omissão	0,83	0,01				
AD	0,01				0,59	

Os dados relacionados com a inclusão de outras classes nas áreas classificadas como arroz ficou em 5%, enquanto na classe não arroz o erro de inclusão foi de 44%. Apenas 17% dos pixels de referência de arroz foram

corretamente classificados (AM), sendo o restante classificado como não arroz, o que resulta em erro de omissão de 83%. Para a classe não arroz a maioria dos pixels de referência foram corretamente classificados com omissão de somente 1%.

4.3.3 Análise de discordância da safra 2011/2012

Os resultados obtidos no mapeamento da safra de arroz 2011/2012 para o algoritmo que utiliza a chave do NDVI é mostrado na figura 29.

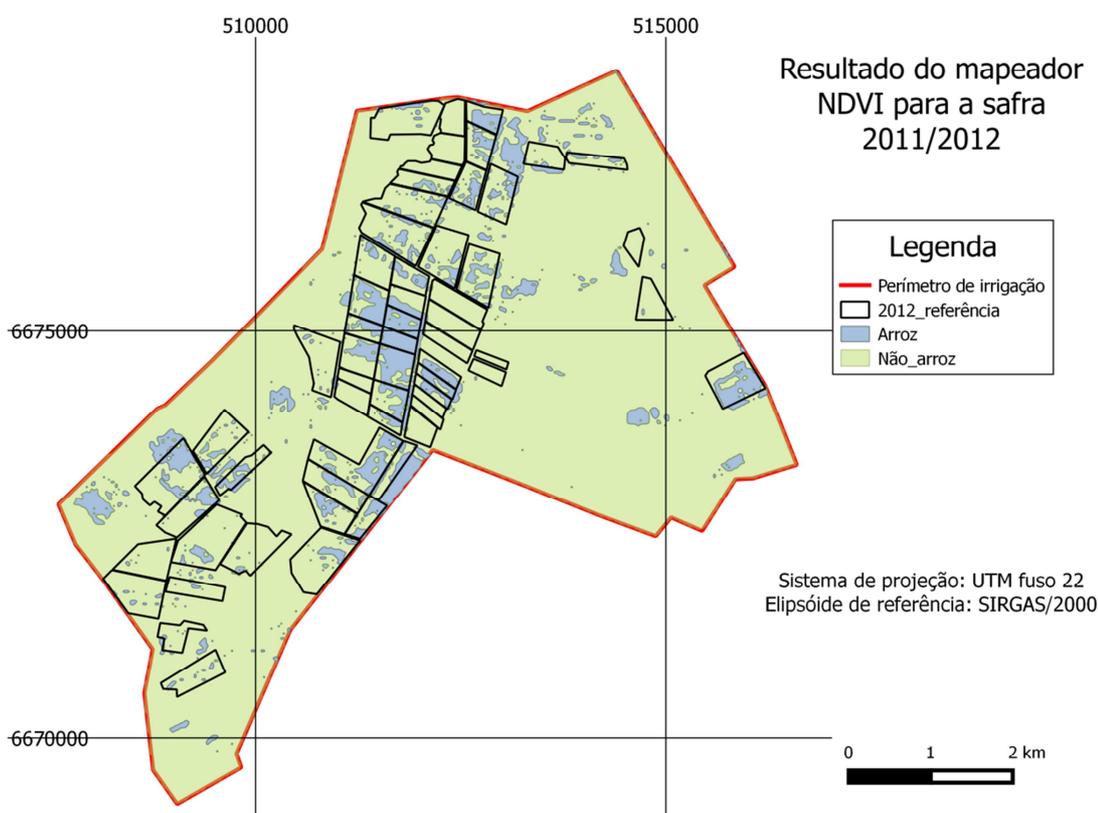


Figura 29 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDVI na safra agrícola 2011/2012.

A matriz de confusão (Tabela 14) indicou um índice de acerto de 77% com 158 amostras corretamente classificadas, sendo 9 para o arroz e 149 para a classe não arroz. A análise de discordância indicou 2% de erros devido à alocação e 21% devido à discordância nas quantidades, ou seja, do ponto de vista geográfico, novamente o classificador foi eficiente.

Tabela 14 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDVI na safra agrícola 2011/2012

Estimado pelo classificador	Referência de campo					
	Arroz	Não arroz	Total	AU	Inclusão	QD
Arroz	0,04	0,01	0,05	0,82	0,18	0,21
Não arroz	0,22	0,73	0,95	0,76	0,24	
Total	0,27	0,73				
AM	0,16	0,99				
Omissão	0,84	0,01			0,77	
AD	0,02					

A figura 30 apresenta o mapa resultante do algoritmo que utiliza a chave do NDWI para a safra agrícola 2011/2012.

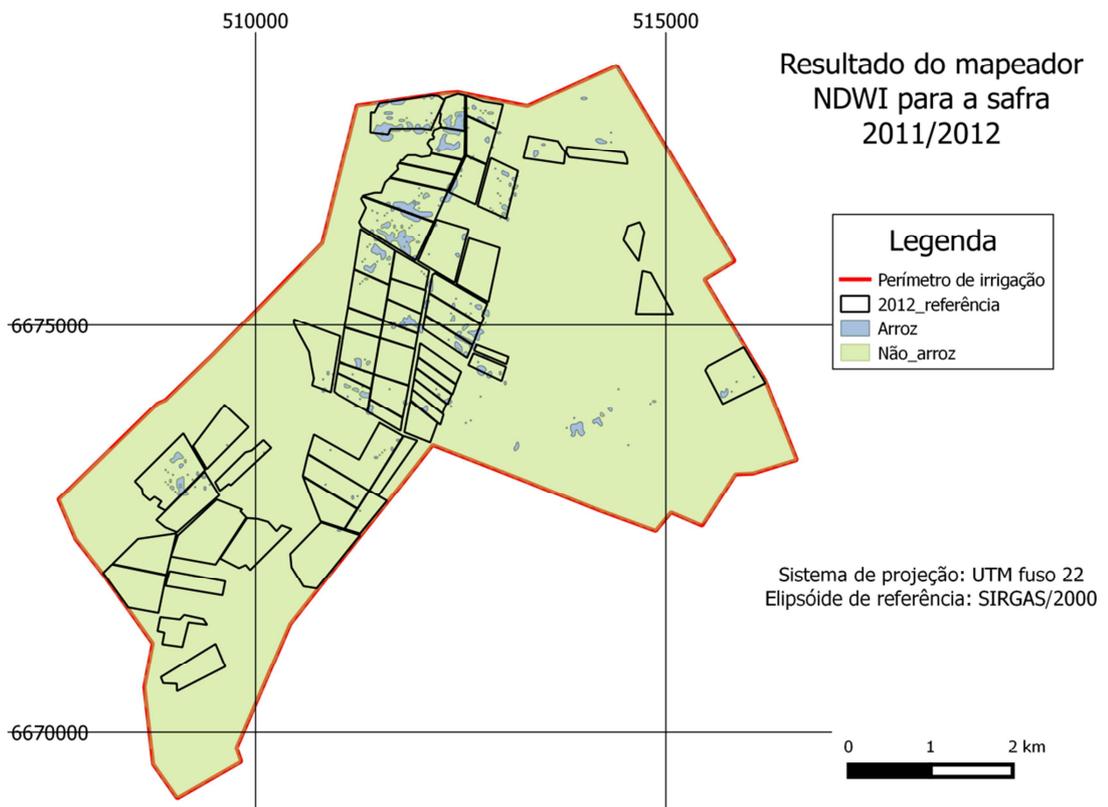


Figura 30 - Resultados do mapeamento da área de arroz para o classificador NDVI na safra agrícola 2011/2012.

A análise da matriz de confusão (Tabela 15) resultou em uma concordância global de 76% com 7 amostras corretamente classificadas para o arroz e 149 para a classe não arroz. Os erros de alocação ficaram em 2% e os erros devido à quantidade de discordância em 22%.

Tabela 15 - Resultados da análise de discordância para o algoritmo mapeador NDWI na safra agrícola 2011/2012

Estimado pelo classificador	Referência de campo					
	Arroz	Não arroz	Total	AU	Inclusão	QD
Arroz	0,03	0,01	0,04	0,78	0,22	0,22
Não arroz	0,23	0,73	0,96	0,76	0,24	
Total	0,26	0,74				
AM	0,13	0,99				
Omissão	0,87	0,01			0,76	
AD	0,02					

5 CONCLUSÃO

Com relação aos resultados do cálculo dos dois índices de vegetação gerados a partir de três sistemas sensores diferentes, TM/L5, LISS3/IRS-P6 e OLI/L8, não houve diferenças significativas para os valores dos índices calculado a partir dos sensores TM e LISS-III. O sensor OLI apresentou valores menores para o NDVI, entre um e dois décimos, e maiores para o NDWI, variando entre 0,05 e 0,1. Os resultados concordam com a literatura (Li *et al.*, 2014) e, considerando que o estudo considerou somente uma safra agrícola, julga-se importante proceder análise comparativa dos índices de vegetação nos moldes dos trabalhos citados anteriormente (Li *et al.*, 2014; Berra, 2013).

A comparação do comportamento espectro-temporal dos seis tipos de uso da terra analisados neste estudo (água, arroz, banhado, campo, mata e solo exposto) a partir dos dois índices utilizados (NDVI e NDWI), permitiu a definição de três padrões distintos de variação temporal, quais sejam: a vegetação natural, representada pelos banhados, campos e florestas, cuja curva de crescimento é condicionada pela temperatura média do ar e pela disponibilidade hídrica; a vegetação antrópica, representada pelas culturas agrícolas anuais, com ciclos de maior amplitude para os dois índices calculados quando comparada com a vegetação natural; e os usos que não apresentam variação sazonal, representados pelas lâminas de água e os solos expostos.

Considerando a proposição de um fluxograma de trabalho utilizando imagens de sensoriamento remoto como subsídio ao monitoramento do uso da terra, a partir do estabelecimento dos padrões de variação do arroz e aos outros usos da terra associados ao mesmo território (banhado, campos úmidos e lavouras de arroz em pousio), foi possível gerar valores de limiares para os dois índices de vegetação com o objetivo de obter o mapeamento das áreas com plantio de arroz a cada safra.

Comparando os resultados obtidos com a referência de campo, a sensibilidade dos algoritmos mapeadores está relacionada com a quantidade e a posição temporal das imagens relativas ao período de máximo desenvolvimento vegetativo com relação à fenologia da cultura.

Neste contexto, o melhor desempenho para os dois índices foi o da safra 2009/2010 com 77% e 88%, respectivamente para o NDVI e NDWI, seguida pela safra 2011/2012 com 77% e 76%, respectivamente para NDVI e NDWI. O pior resultado ocorreu para a safra agrícola 2010/2011, respectivamente com 63% e 59% para NDVI e NDWI.

Considerando o comportamento dos índices de vegetação para a discriminação do arroz irrigado, objeto central do estudo, a escolha dos valores limiares para a chave de classificação foi realizada de maneira empírica, pautando-se apenas pelos aspectos visuais das curvas temporais e determinando-se “pontos de corte” próximos a valores típicos. Neste tópico recomenda-se o emprego de metodologia para a determinação dos limiares a partir de algoritmos para árvores de decisão (SATO *et al.*, 2013) incorporando as variações climáticas anuais que condicionam o início da safra agrícola.

Outra perspectiva relacionada aos resultados obtidos faz referência à análise simultânea das três bandas espectrais de uso recorrente em estudos de vegetação (VER, IVP e IVM), empregadas neste estudo para o cálculo dos dois índices de vegetação. Sugere-se o acréscimo nas rotinas utilizadas pelo INCRA-RS de uma nova abordagem a partir da metodologia conhecidas como superfícies de resposta espectro-temporal (MELLO, 2009; RUDORFF *et al.* , 2007) em que as três bandas são consideradas para o cálculo de um único índice.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, B. S. *et al.* **Avaliação de técnicas de processamento digital de imagens para a estimativa de áreas de arroz irrigado: um estudo de caso no Município de Santa Vitória do Palmar/RS.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3961-3966.

ALVES, G. C. **Análise do modelo linear de mistura espectral aplicado a imagens MODIS para o mapeamento da cultura de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul.** 2009, 80f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, junho de 2009.

ANDERSON, J. H *et al.* **Intercalibration and Evaluation of ResourceSat-1 and Landsat-5 NDVI.** Canadian Journal of Remote Sensing, 37(2), 213-219, 10.5589/m11-032, 2011.

BERRA, E.F. **Avaliação e comparação de imagens LISS-III/RESOURCESAT-1 e TM/LANDSAT 5 para estimar volume de madeira de um plantio de Pinus Elliottii.** 2013, 127f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, abril de 2013.

CÂMARA, G. *et al.* **SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling.** Computers & Graphics, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

CÂMARA, G. *et al.* **Análise Espacial de Dados Geográficos.** São José dos Campos: INPE, 2001.

CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.; HELDER, D.L. **Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.** Remote Sensing of Environment, 113, p. 893–903, 2009.

D'ARCO, E. **O uso de geotecnologias para estimativa da área plantada de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul.** 2007. 206f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.

D'ARCO, E; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. **Análise de combinações dos índices de vegetação EVI e NDVI derivadas do sensor MODIS para identificação de áreas de arroz irrigado.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 91-94. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12575-PRE/7868). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.20.20.16>>. Acesso em: 19 nov. 2012.

DE ROSSO, A. F. **Caracterização genética e fenotípica para tolerância ao frio e características agrônômicas do arroz irrigado**. 2006, 98f, Tese (Doutorado) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Zoneamento agroclimático do arroz irrigado por épocas de semeadura no Estado do Rio Grande do Sul (Versão 4)**. 2014. <http://www.cpact.embrapa.br/agromet/zoneamento/arroz/resultados.php> acesso em 3 agosto de 2014

EPIPHANIO, J.C.N. *et al.* **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. 132 p.

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.

GUASSELLI, 2005. **Dinâmica da vegetação no banhado do Taim, RS**. Tese Doutorado IPH/UFRGS.

HARDISKY, M. A.; GROSS, M. F. & KLEMAS, V. **Remote Sensing of Coastal Wetlands**. Bioscience, 36, 453-460. 1986.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Catálogo de imagens**. 2013. Disponível em <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Acesso em 10 jul. 2013

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). **Estudos técnicos e apoio ao gerenciamento do perímetro de irrigação do Projeto de Assentamento Viamão**. Relatório técnico do convênio INCRA-RS/FAURGS/UFRGS 3480/2005. 2007. Não publicado.

INSTITUTO RIOGRADENSE DO ARROZ (IRGA). **Área e produção de arroz**. 2014a http://www.irga.rs.gov.br/upload/20131024101611producao_rs_e_brasil.pdf Acesso em 03 ago. 2014

INSTITUTO RIOGRADENSE DO ARROZ (IRGA). **Amostragem da participação dos sistemas de cultivo do arroz**. 2014b. Disponível em http://www.irga.rs.gov.br/upload/20140225133041sistema_cultivo_13_14_ii.pdf. Acesso em 03 ago. 2014

JACKSON, R.D.; HUETE, A.R. **Interpreting vegetation indices**. Preventive Veterinary Medicine, v. 11, n. 2, p. 185-200, 1991.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. 2ª edição. Tradução de José Carlos Neves Epiphânio (coordenador). São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

KLERING, E. V. **Avaliação do uso de imagens MODIS na modelagem agrometeorológica-espectral de rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado. CEPSSRM/UFRGS. Porto Alegre, RS. 2007.

KLERING, E.V. *et al.* **Relação entre os perfis temporais de NDVI/MODIS da cultura do arroz irrigado, a insolação e o rendimento na região da Campanha.** In: Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. v.1, 7105p. p.249.

KLERING, E. V.; PINTO, D. G.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. **Comparação entre os perfis temporais de arroz irrigado das coleções MODIS V004 e V005 para a região orizícola do Rio Grande do Sul.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 239-245. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.20.09>>. Acesso em: 19 nov. 2012.

KLERING, E. V.; WAGNER, A. P. L.; FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A. **Comparação entre dois métodos de estimativa de área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 191-198. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQTRW/39ULNK5>>. Acesso em: 19 nov. 2012.

KLERING, E. V. **Mapeamento da área cultivada e estimativa do rendimento de grãos de arroz irrigado a partir de modelos agrometeorológicos-espectrais para o Rio Grande do Sul.** 2012. 163 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia). UFRGS. Porto Alegre, RS. 2007.

LEE, K. H.; LUNETTA, R. S. **Wetlands detection methods.** IN: LYON, J. G. & McCARTY, J. (editors). Wetlands and environmental application of GIS. Lewis Publishers. 372p.; 1995.

LI, P.; JIANG, L. & FENG, Z. Cross-comparison of Vegetation Indices derived from Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) sensor. Remote Sensing, 2014, 6, 310-329.

MELLO, M. P. **Classificação espectro-temporal de imagens orbitais para o mapeamento da colheita da cana-de-açúcar com queima da Palha.** 2009, 130f. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos, 22 de maio de 2009.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** UNB/CNPQ, Brasília, 2012.

MMA. **Política Nacional dos Recursos Hídricos.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 19 nov 2012.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: Descrição, fundamentos e aplicações.** São Paulo: Editora da UNESP. 2000, 287p.

MOREIRA, M. A & RUDORFF, B. F. T. **Sensoriamento remoto aplicado à agricultura.** In: RUDORFF, B. F. T. *et al* (Ed.). Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. São José dos Campos: INPE, 2002. p. 19. Capítulo 9. (INPE-8984-PUD/62). Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/vcsr/pdf/capitulo_9.pdf> Acesso em: 12/12/2012.

NANNI, M.R. & DEMATTÊ, J.A.M. **Comportamento da linha do solo obtida por espectrorradiometria laboratorial para diferentes classes de solo.**

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Landsat 5.** Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/landsat5.html>>. Acesso em: 17 out. 2012. 2012 a.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **LDCM.** Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/about/ldcm.html>>. Acesso em: 17 out. 2012. 2012 b.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Landsat 8.** Disponível em: < <http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3186> >. Acesso em: 31 de março de 2014. 2014.

NOVO, E.M.L.M. 2001. **Comportamento espectral da água.** In: MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. UNB/CNPQ, Brasília, 2012.

OLIVEIRA, M. L. A. A.; BALBUENO, R. A.; SENNA, R. M. **Levantamento florístico de fragmentos florestais na bacia hidrográfica do rio Gravataí, RS, Brasil.** 2005. Iheringia vol.60, n.2, p.269-284, jul/dez 2005.

OLIVEIRA, L. C. B. **Dinâmica temporal do NDVI de remanescentes das fitofisionomias da mata atlântica, bacia do rio dos Sinos, RS.** 2013. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, novembro de 2013.

PETER, A. R.; RUHOFF, A. L. **Análise do comportamento de NDVI e NDWI para a cultura da soja no município de Tupanciretã-RS nas safras de 2000-2001 e 2004-2005.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. p. 31-38. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). Available from: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GKQG> >. Acesso em 25 fev. 2014 .

PONTIUS Jr., R. G. & MILLONES, M. **Death to Kappa:** birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. International Journal of Remote Sensing. Vol.32, No.15, 4407-4429, 2011.

PONZONI, F. J. & SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. 2009. Ed. Parêntese. São José dos Campos – SP.

RICHARDS, J.A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 4. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 454 p.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T. **Imagens Landsat na estimativa de área plantada com soja em municípios do Rio Grande do sul**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. Anais... São José dos Campos: INPE, 2003. p. 231-238.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa da produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 212p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

RIZZI, R.; RUDORFF F, B. F. T. **Estimativa da área de soja no Rio Grande do Sul por meio de imagens Landsat**. Revista Brasileira de Cartografia, v.57, p.226-234, 2005.

RIZZI, R.; RUDORFF, B.F.T; ADAMI, M. **Estimativa da área de soja no Estado do Rio Grande do Sul por um método de amostragem**. Ciência Rural, v.36, p. 30-35, 2006.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W., HARLAN, J.C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 1974, 371 p.

SATO, L. Y.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M.; GOMES, V. C. F. **Análise comparativa de algoritmos de árvore de decisão do sistema WEKA para classificação do uso e cobertura da terra**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. p. 2353-2360. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GFLK>>. Acesso em 2 de julho de 2014.

SERBINA, L. & MILLER, H. M. **Landsat and Water—Case Studies of the Uses and Benefits of Landsat Imagery in Water Resources**. Open-File Report 2014-1108. 61 p. 2014. Disponível em <http://pubs.usgs.gov/of/2014/1108/pdf/ofr2014-1108.pdf>. Acesso em 3 ago. 2014.

SHIMABUKURO, Y.E. , NOVO, E. M.; PONZONI, F. G. **Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal**. Pesq. Agropec. Bras., Brasília, v.33, Número Especial, p.1729-1737, out. 1998.

SIEGEL, S. & CASTELLAN JR., N. J. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. 2ª edição. Tradução de Sara Correa Carmona. Porto Alegre, RS: ARTMED, 2006.

SOSBAI. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. XXIX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado. Gravatal, SC. 2012. 179p., il.

VALERIANO, M.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. & OLIVEIRA, J.B. **Bi-directional reflectance factor of 14 soil classes from Brazil**. International Journal of Remote Sensing. V.16:113-128, 1995.

XIAO, X. *et al.* **Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data**. International Journal of Remote Sensing, London, v.23,n.15,p.:3009-3022, 2002.

XIAO, X. *et al.* **Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multitemporal MODIS images**. Remote Sensing of Environment, New York, n.100, p.:95-113, 2006.

WEBER *et al.* **Comparação entre resultados de classificação de imagens Landsat e CBERS para estimativa de área cultivada com soja no planalto do Rio Grande do Sul**. 2005

WEBER E. J.. **Projeto GEOSAFRAS: Relatório Final**. Porto Alegre: UFRGS/CEPSRM/CONAB. 2006

WEBER, E. J.; WAGNER, A. P. L.; FONTANA, D. C.; DUCATI, J. R. **Estimativa de área cultivada com arroz irrigado no Rio Grande do Sul na safra 2005/2006 através de imagens Landsat**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p. 465-472. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.16.18.24>>. Acesso em: 19 nov. 2012.

ANEXOS

ANEXO 1 – Resultados completos para os dois índices de vegetação

Resultados para a média (MED) e o desvio-padrão (DP) do NDVI calculado a partir de imagens TM/L5 das seis classes de uso da terra, Viamão, RS, período 2008-2011

Data da imagem	AGUA		ARROZ		BANHADO		CAMPO		MATA		SOLO	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
03/10/2008	-0,1681	0,0393	0,0139	0,0625	0,2662	0,0555	0,4903	0,0407	0,6005	0,0360	0,1056	0,0530
06/12/2008	-0,1485	0,0364	0,4181	0,1825	0,3925	0,0912	0,4634	0,0484	0,5022	0,1621	0,1299	0,0941
22/12/2008	-0,1558	0,0354	0,5332	0,1435	0,4572	0,0707	0,4502	0,0409	0,6663	0,0428	0,1044	0,0958
07/01/2009	-0,1515	0,0334	0,6341	0,0551	0,5025	0,0764	0,4816	0,0446	0,6782	0,0404	0,1024	0,0781
23/01/2009	-0,1141	0,0241	0,6622	0,0551	0,5356	0,0760	0,5415	0,0417	0,6813	0,0353	0,1120	0,0802
28/03/2009	-0,1301	0,0347	0,2291	0,1343	0,4994	0,0391	0,5143	0,0308	0,6262	0,0349	0,1154	0,0739
13/04/2009	-0,0876	0,0325	0,1774	0,0474	0,4594	0,0288	0,4644	0,0329	0,5926	0,0352	0,1195	0,0789
29/04/2009	-0,1537	0,0505	0,1757	0,0345	0,4531	0,0344	0,4347	0,0299	0,6077	0,0387	0,1229	0,0827
02/07/2009	-0,1649	0,0533	0,0768	0,0581	0,3055	0,0786	0,3827	0,0292	0,5636	0,0436	0,1262	0,0495
20/09/2009	-0,1537	0,0324	0,0519	0,0474	0,2792	0,0346	0,5245	0,0476	0,5985	0,0389	0,1318	0,0700
11/02/2010	0,0449	0,0313	0,5374	0,0632	0,4101	0,0617	0,4343	0,0356	0,6192	0,0356	0,1925	0,1446
31/03/2010	-0,1598	0,0542	0,1961	0,0762	0,5247	0,0384	0,5106	0,0462	0,6479	0,0757	0,2553	0,2024
16/04/2010	-0,1303	0,0459	0,2318	0,0479	0,5109	0,0332	0,4959	0,0441	0,6728	0,0328	0,1507	0,1120
22/08/2010	-0,1062	0,0115	-0,0409	0,0271	0,0583	0,0167	0,0783	0,0198	0,1414	0,0183	0,0480	0,0168
10/11/2010	-0,1141	0,0255	0,2274	0,1294	0,3382	0,0399	0,4883	0,0534	0,6044	0,1334	0,1473	0,1032
28/12/2010	-0,1444	0,0299	0,6630	0,1137	0,4619	0,0408	0,5026	0,0387	0,6887	0,0377	0,1270	0,1020
19/04/2011	-0,1084	0,0424	0,1601	0,0462	0,4633	0,0522	0,4492	0,0579	0,6470	0,0325	0,1696	0,1161
05/05/2011	-0,1828	0,0383	0,2040	0,0526	0,4496	0,0547	0,4326	0,0563	0,6509	0,0328	0,1769	0,1151
10/09/2011	-0,1632	0,0491	0,0419	0,0453	0,3066	0,0370	0,3662	0,0622	0,5786	0,0423	0,1557	0,0668
28/11/2011	-0,1350	0,0349	0,1002	0,1045	0,3832	0,0482	0,4725	0,0592	0,6792	0,0357	0,1626	0,1158

Resultados para a média (MED) e o desvio-padrão (DP) do NDVI calculado a partir de imagens LISS-III/IRS-P6 das seis classes de uso da terra, Viamão, RS, período 2012-2013

Data da imagem	AGUA		ARROZ		BANHADO		CAMPO		MATA		SOLO	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
17/02/2012	-0,0261	0,0201	0,3892	0,0571	0,3471	0,0325	0,3363	0,0436	0,3831	0,0306	0,0867	0,0740
23/05/2012	-0,1490	0,0334	0,0487	0,0455	0,2372	0,0839	0,2534	0,0556	0,4936	0,0358	0,0956	0,1106
14/10/2012	-0,1326	0,0225	0,0303	0,0612	0,3037	0,0465	0,3807	0,0558	0,5710	0,0363	0,1234	0,1222
25/12/2012	-0,0676	0,0172	0,5249	0,0632	0,3679	0,0387	0,3210	0,0463	0,5305	0,0396	0,1021	0,1292
07/03/2013	-0,1085	0,0373	0,2078	0,1100	0,4490	0,0356	0,4409	0,0553	0,6210	0,0311	0,0989	0,1077

Resultados para a média (MED) e o desvio-padrão (DP) do NDVI calculado a partir de imagens OLI/L8 das seis classes de uso da terra, Viamão, RS, período 2013-2014

Data da imagem	AGUA		ARROZ		BANHADO		CAMPO		MATA		SOLO	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
30/08/2013	-0,0150	0,0066	-0,0154	0,0813	0,1968	0,0229	0,1845	0,0442	0,3530	0,0300	0,1839	0,0698
18/11/2013	-0,0263	0,0031	0,1728	0,0632	0,3177	0,0263	0,3554	0,0326	0,5073	0,0356	0,2452	0,1210
04/12/2013	-0,0328	0,0053	0,3435	0,0925	0,3444	0,0284	0,3875	0,0384	0,4959	0,0325	0,2515	0,1164
05/01/2014	-0,0372	0,0019	0,5117	0,0579	0,3924	0,0321	0,3408	0,0322	0,4857	0,0331	0,2347	0,1180
21/01/2014	-0,0310	0,0020	0,4947	0,0446	0,3900	0,0254	0,3463	0,0369	0,4694	0,0279	0,2397	0,1100
06/02/2014	-0,0253	0,0020	0,4754	0,0358	0,3832	0,0217	0,3649	0,0511	0,4635	0,0211	0,2011	0,0724
27/04/2014	-0,0214	0,0273	0,1889	0,0337	0,3239	0,0346	0,2951	0,0587	0,4073	0,0230	0,1756	0,0599

Resultados para a média (MED) e o desvio-padrão (DP) do NDWI calculado a partir de imagens TM/L5 das seis classes de uso da terra, Viamão, RS, período 2008-2011

Data da imagem	AGUA		ARROZ		BANHADO		CAMPO		MATA		SOLO	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP

03/10/2008	0,2533	0,1011	0,1179	0,5034	-0,2721	0,0702	-0,0390	0,0580	0,1486	0,0526	-0,3064	0,0465
06/12/2008	0,2535	0,0819	0,0724	0,2515	-0,0723	0,0917	-0,0509	0,0548	0,2160	0,1134	-0,2794	0,0603
22/12/2008	0,2686	0,0991	0,1777	0,0829	-0,0548	0,0725	-0,0906	0,0424	0,2395	0,0557	-0,2953	0,0683
07/01/2009	0,2164	0,0828	0,2400	0,0735	-0,0058	0,0895	-0,0454	0,0534	0,2422	0,0554	-0,2951	0,0549
23/01/2009	0,0092	0,0398	0,2767	0,0661	0,0328	0,0897	0,0219	0,0505	0,2410	0,0517	-0,2887	0,0532
28/03/2009	0,2799	0,0911	-0,1010	0,1853	0,0233	0,0494	0,0192	0,0407	0,2280	0,0502	-0,2844	0,0622
13/04/2009	0,1365	0,0767	-0,2176	0,0778	-0,0035	0,0350	-0,0268	0,0376	0,1974	0,0501	-0,2799	0,0656
29/04/2009	0,2080	0,1133	-0,2472	0,0370	-0,0481	0,0488	-0,0865	0,0377	0,2063	0,0580	-0,3013	0,0665
02/07/2009	0,1938	0,1283	-0,2322	0,0905	-0,1881	0,1141	-0,0644	0,0348	0,1890	0,0652	-0,2683	0,0531
20/09/2009	0,1934	0,0870	0,3126	0,4118	-0,2704	0,0489	0,0453	0,0820	0,1441	0,0569	-0,2837	0,0613
11/02/2010	0,0925	0,0404	0,3178	0,0500	0,0445	0,0384	0,1234	0,0287	0,2372	0,0417	-0,1850	0,1271
31/03/2010	0,2296	0,1104	-0,1073	0,1067	0,0361	0,0530	0,0780	0,0406	0,2507	0,0747	-0,1451	0,1761
16/04/2010	0,1872	0,1053	-0,2057	0,0341	0,0025	0,0529	0,0189	0,0389	0,2545	0,0492	-0,2643	0,1064
22/08/2010	0,3653	0,0331	0,2337	0,2161	-0,1414	0,0411	-0,0834	0,0365	0,1197	0,0408	-0,2372	0,0721
10/11/2010	0,0324	0,0480	0,2016	0,1394	-0,1890	0,0525	-0,0260	0,0536	0,1629	0,0938	-0,2667	0,0693
28/12/2010	0,1286	0,0938	0,2518	0,0772	-0,0800	0,0441	-0,0132	0,0420	0,2352	0,0520	-0,3028	0,0737
19/04/2011	0,1018	0,0857	-0,1676	0,0564	-0,0077	0,0658	0,0182	0,0550	0,2462	0,0446	-0,2126	0,0870
05/05/2011	0,1689	0,1254	-0,1708	0,0552	-0,0372	0,0705	-0,0144	0,0660	0,2494	0,0442	-0,2001	0,1095
10/09/2011	0,2696	0,1216	0,5182	0,1660	-0,1819	0,0503	-0,0634	0,0795	0,1453	0,0493	-0,2016	0,0562
28/11/2011	0,1740	0,0736	0,2452	0,2131	-0,1405	0,0459	-0,0079	0,0788	0,2376	0,0491	-0,2597	0,0957

Resultados para a média (MED) e o desvio-padrão (DP) do NDWI calculado a partir de imagens LISS-III/IRS-P6 das seis classes de uso da terra, Viamão, RS, período 2012-2013

Data da imagem	AGUA		ARROZ		BANHADO		CAMPO		MATA		SOLO	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
17/02/2012	-0,0261	0,0201	0,3892	0,0571	0,3471	0,0325	0,3363	0,0436	0,3831	0,0306	0,0867	0,0740
23/05/2012	-0,1490	0,0334	0,0487	0,0455	0,2372	0,0839	0,2534	0,0556	0,4936	0,0358	0,0956	0,1106

14/10/2012	-0,1326	0,0225	0,0303	0,0612	0,3037	0,0465	0,3807	0,0558	0,5710	0,0363	0,1234	0,1222
25/12/2012	-0,0676	0,0172	0,5249	0,0632	0,3679	0,0387	0,3210	0,0463	0,5305	0,0396	0,1021	0,1292
07/03/2013	-0,1085	0,0373	0,2078	0,1100	0,4490	0,0356	0,4409	0,0553	0,6210	0,0311	0,0989	0,1077

Resultados para a média (MED) e o desvio-padrão (DP) do NDWI calculado a partir de imagens OLI/L8 das seis classes de uso da terra, Viamão, RS, período 2013-2014

Data da imagem	AGUA		ARROZ		BANHADO		CAMPO		MATA		SOLO	
	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP	MED	DP
30/08/2013	-0,0150	0,0066	-0,0154	0,0813	0,1968	0,0229	0,1845	0,0442	0,3530	0,0300	0,1839	0,0698
18/11/2013	-0,0263	0,0031	0,1728	0,0632	0,3177	0,0263	0,3554	0,0326	0,5073	0,0356	0,2452	0,1210
04/12/2013	-0,0328	0,0053	0,3435	0,0925	0,3444	0,0284	0,3875	0,0384	0,4959	0,0325	0,2515	0,1164
05/01/2014	-0,0372	0,0019	0,5117	0,0579	0,3924	0,0321	0,3408	0,0322	0,4857	0,0331	0,2347	0,1180
21/01/2014	-0,0310	0,0020	0,4947	0,0446	0,3900	0,0254	0,3463	0,0369	0,4694	0,0279	0,2397	0,1100
06/02/2014	-0,0253	0,0020	0,4754	0,0358	0,3832	0,0217	0,3649	0,0511	0,4635	0,0211	0,2011	0,0724
27/04/2014	-0,0214	0,0273	0,1889	0,0337	0,3239	0,0346	0,2951	0,0587	0,4073	0,0230	0,1756	0,0599

ANEXO 2 Fotos da área do estudo



Foto da área de estudo em vistoria de campo realizada em setembro de 2012 na época de plantio da lavoura de arroz mostrando o aspecto de uma lavoura que utiliza o sistema pré-germinado.



Foto da área de estudo em vistoria de campo realizada em setembro de 2012 na época de plantio da lavoura de arroz mostrando o aspecto de uma lavoura em pousio.