

Londrina, PR / Novembro, 2024

Características espectrais e impactos da deficiência hídrica sobre áreas agrícolas no estado do Paraná, safra 2021/2022



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura e Pecuária

ISSN 2176-2937

Documentos 468

Novembro, 2024

Características espectrais e impactos da deficiência hídrica sobre áreas agrícolas no estado do Paraná, safra 2021/2022

Sergio Luiz Gonçalves

Norman Neumaier

José Renato Bouças Farias

Luís Guilherme Teixeira Crusiol

Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli

Embrapa Soja

Londrina, PR

2024

Embrapa Soja Publicação digital: PDF
Rod. Carlos João Strass, s/n Edição executiva
Acesso Orlando Amaral, Distrito da Warta *Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol*
CEP 86065-981 Revisão de texto
Caixa Postal 4006 *Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite*
Londrina, PR Normalização
Fone: (43) 3371 6000 *Valéria de Fátima Cardoso*
www.embrapa.br/soja Projeto gráfico
www.embrapa.br/fale-conosco/sac *Leandro Sousa Fazio*
Comitê Local de Publicações da Embrapa Soja Diagramação
Presidente *Marisa Yuri Horikawa*
Roberta Aparecida Carnevalli Foto da capa
Secretária-executiva *Sergio Luiz Gonçalves*
Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite
Membros
Claudine Dinali Santos Seixas, Clara Beatriz Hoffmann-Campo, Fernando Augusto Henning, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Leandro Eugênio Cardamone Diniz, Maria Cristina Neves de Oliveira, Mônica Juliani Zavaglia Pereira e Norman Neumaier

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Soja

Características espectrais e impactos da deficiência hídrica sobre áreas agrícolas no estado do Paraná, safra 2021/2022/ Sergio Luiz Gonçalves... [et al.]. – Londrina : Embrapa Soja, 2024.

67 p. -- (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 468).

1. Espectrometria. 2. Deficiência hídrica. 3. Agricultura. I. Gonçalves, Sergio Luiz. II. Neumaier, Norman. III. Farias, José Renato Bouças. IV. Crusiol, Luís Guilherme Teixeira. V. Sibaldelli, Rubson Natal Ribeiro. VII. Série.

CDD (21. ed.) 535.84

Autores

Sergio Luiz Gonçalves

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

Norman Neumaier

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Agronomia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

José Renato Bouças Farias

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

Luís Guilherme Teixeira Crusiol

Geógrafo, doutor em Agronomia, pesquisador visitante, bolsista FAPED/Embrapa Soja, Londrina, PR

Rubson Natal Ribeiro Sibaldelli

Matemático, especialista em Estatística, Londrina, PR
outor, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

Apresentação

No contexto atual da agricultura, destacam-se temas fundamentais como adversidades climáticas, riscos climáticos regionais para a produtividade das culturas, o uso de sensores digitais e o sensoriamento remoto. Este trabalho focaliza métodos de agrometeorologia com ênfase em cálculos de balanço hídrico regional, evapotranspiração e déficit de pressão de vapor (DPV), aplicados para identificar a ocorrência de seca em áreas agrícolas prejudicadas.

Utilizando imagens de satélite de duas regiões distintas do estado do Paraná, o estudo diferenciou áreas sob estresse hídrico de áreas que mantiveram condições normais. As análises de reflectância e os cálculos de índices de vegetação compararam áreas estressadas e não estressadas ao longo do ciclo das lavouras de verão, com destaque para a cultura da soja. A safra 2021/2022 foi o foco, permitindo a comparação entre a região oeste do Paraná, que apresentou baixa produtividade agrícola, e a região sul, onde a produção permaneceu em níveis normais.

As imagens do satélite Sentinel-2 revelaram com precisão a evolução das reflectâncias, do NDVI e dos níveis de clorofila em todas as fases de desenvolvimento das plantas, evidenciando as diferenças entre áreas prejudicadas pela seca e áreas sem impacto significativo. Essas diferenças foram observadas em diversos comprimentos de onda do espectro eletromagnético, desde o visível até o infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Desta forma, a Embrapa Soja disponibiliza a aplicação dessa metodologia que permite a identificação regional de áreas atingidas por seca, oferecendo uma análise em tempo real durante o evento adverso, o que pode aprimorar significativamente o monitoramento e a resposta a esses fenômenos na agricultura.

Roberta Aparecida Carnevalli

Chefe-Adjunta de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Soja

Sumário

| | |
|--|-----------|
| Introdução | 9 |
| Material e métodos | 16 |
| Resultados e discussão..... | 17 |
| Região Oeste: Data de 22 de outubro de 2021..... | 17 |
| Região Oeste: Data de 21 de novembro de 2021 | 24 |
| Região Oeste: Data de 26 de dezembro de 2021 | 29 |
| Região Oeste: Data de 10 de janeiro de 2022 | 34 |
| Região Sul: Data de 23 de novembro de 2021 | 38 |
| Região Sul: Data de 28 de dezembro de 2021 | 44 |
| Região Sul: Data de 11 de fevereiro de 2022..... | 48 |
| Região Sul: Data de 26 de fevereiro de 2022 | 52 |
| Região Sul: Data de 5 de março de 2022 | 56 |
| Considerações finais | 61 |
| Referências | 63 |

Introdução

As imprevisibilidades e incertezas das previsões climáticas e a impossibilidade de medidas imediatas de controle para vários eventos têm sido um entrave para a agricultura. Deficiências, em primeiro plano, e excessos hídricos para as lavouras, são importantes causas de perdas. Com o aumento das áreas cultivadas, a diversificação de espécies agrícolas e as irregularidades climáticas, são grandes as chances de perdas em função de épocas e locais de cultivo, com maior ou menor grau de risco. Os níveis de perdas por diferentes eventos climáticos adversos no Brasil, para as culturas de soja, milho e trigo, foram descritos por Gonçalves et al. (2019), onde foi constatado que a deficiência hídrica é a principal causa de perdas para soja e milho.

Muitas irregularidades climáticas têm sido estudadas com frequência nas últimas décadas à luz dos avanços pertinentes à área, havendo diferentes teorias para explicar causas e fenômenos. Alguns desses fenômenos, como por exemplo El Niño e La Niña, são previstos com certa antecedência. A NOAA (2022), em seu boletim de fevereiro de 2022, afirmou que, a partir de julho de 2021, a temperatura da superfície do Oceano Pacífico ficou abaixo da média, persistindo até meados de janeiro de 2022, quando passaram novamente a ficar acima da média. Esse período enfatizado é extremamente importante para a agricultura brasileira porque é o momento de implantação e desenvolvimento das culturas de primavera/verão em grande parte do Brasil, quando são cultivadas importantes culturas como, por exemplo, soja e milho, entre outras. O fenômeno La Niña, citado acima, é caracterizado pelo resfriamento das águas no Oceano Pacífico, com consequências importantes no regime de chuvas de várias regiões, como por exemplo o Sul do Brasil. É importante destacar que esse fenômeno causa grande irregularidade na distribuição de chuvas, podendo se configurar em chuvas mal distribuídas para as plantas, acarretando deficiências hídricas importantes em determinados

momentos ou, ainda, provocar excessos hídricos, que também podem ser prejudiciais.

Pelos boletins do INMET para acompanhamento do clima nas regiões brasileiras durante a safra 2021/2022, no Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, de meados de 2021 até o início de 2022 (INMET, [2024a]), essas regiões apresentaram poucas chuvas em junho, julho e setembro, enquanto que em agosto ocorreu uma grande irregularidade nas quantidades, havendo excessos em algumas subregiões e falta em outras. De modo geral as chuvas começaram a aumentar em outubro, principalmente no Mato Grosso do Sul e continuaram ocorrendo em boas quantidades em novembro e dezembro (exceto no Mato Grosso do Sul, onde choveu menos em dezembro), voltando a ser altamente irregulares em janeiro de 2022. Já na região Sul, ocorreram chuvas normais e em boas quantidades de junho a setembro, nos três estados do Sul, com exceção do norte do Paraná. Em outubro as chuvas aumentaram ainda mais em toda a região Sul, com exceção do centro-sul do Rio Grande do Sul. No entanto, de novembro de 2021 a janeiro de 2022 as chuvas foram poucas, sendo boas apenas nas porções leste do Paraná e de Santa Catarina em novembro, com destaque para as poucas chuvas ocorridas no Rio Grande do Sul e no noroeste do Paraná.

Considerando o aspecto geral do relatado acima é possível destacar a irregularidade da distribuição de chuvas ao longo do tempo. Em seu boletim de monitoramento agrícola, sobre as condições climáticas da safra 2021/2022, a Conab (2022) destacou que devido à influência do fenômeno La Niña, ocorreram precipitações de baixo volume e irregulares na parte Oeste da região Sul e no Sudoeste do Mato Grosso do Sul.

A consequência maior de toda essa irregularidade na distribuição hídrica é que ocorreu, na região Centro-Sul do Brasil uma seca agromônica. Esta foi caracterizada, em várias regiões, por alternâncias de períodos chuvosos com períodos secos coincidentes com períodos de maior suscetibilidade de lavouras de verão. Para a cultura da soja os prejuízos foram gigantescos, chegando à casa de bilhões de reais em perdas desde a implantação das lavouras até milhões de

toneladas que deixaram de ser colhidas. Foram verificados os impactos negativos ocorridos na cultura da soja em várias regiões do Sul do Brasil e no Mato Grosso do Sul, com destaque especial para as regiões Sul do Mato Grosso do Sul, Noroeste do Rio Grande do Sul e Sudoeste, Oeste e Noroeste do Paraná. Especificamente na região Oeste do Paraná, a região mais prejudicada do Paraná, foi constatado, por meio de dados de estações meteorológicas (INMET, [2024b]), que as quantidades de chuvas foram extremamente mal distribuídas, ocorrendo excessos hídricos em outubro de 2021 e diminuição drástica de chuvas em novembro e dezembro de 2021 e janeiro de 2022. Além disso, a baixa ocorrência de chuvas foi sempre acompanhada de altas temperaturas. Esses aspectos geraram regionalmente ambientes extremamente secos com alta demanda hídrica pela atmosfera. Isto pode ser comprovado pelo elevado déficit de pressão de vapor (DPV) verificado regionalmente.

O DPV dá uma ideia do poder que a atmosfera tem de retirar água da superfície terrestre, sendo calculado em função da temperatura média e da umidade relativa do ar de um determinado local. Da mesma forma que a elevação da temperatura aumenta a capacidade de retenção de umidade no ar, a elevação do DPV intensifica a afinidade do ar atmosférico por vapor de água, aprofundando o gradiente de potencial hídrico entre o dossel da lavoura e a atmosfera circundante. Estando submetidas a um gradiente altamente demandante de umidade, as plantas transpiram mais, não só devido ao potencial hídrico negativo da atmosfera em relação ao dossel das plantas, mas, também, pela necessidade das plantas controlarem a temperatura dos seus tecidos vegetais aumentando a transpiração através dos estômatos nas folhas, o que acarreta aumento da extração de água do solo pelas raízes, principalmente em dias quentes. Quando as raízes não conseguem suprir a demanda da parte aérea da planta por água, seja por excessiva transpiração ou esgotamento das reservas hídricas do solo, antes mesmo das plantas fecharem seus estômatos elas já começam a sofrer danos devido à desidratação e hipertermia, podendo chegar à morte, caso as condições hídricas e térmicas desfavoráveis perdurem por mais tempo.

Os efeitos do DPV sobre a produtividade da soja foram relatados por Gonçalves et al. (2024). Os impactos foram extremos para a agricultura do Oeste do Paraná principalmente porque a soja é a cultura mais importante, com área cultivada extremamente significativa. Somente nos dois núcleos regionais da Secretaria da Agricultura do Paraná, de Cascavel e Toledo, a área cultivada de soja foi superior a um milhão de hectares na safra 2021/2022. Nessa região, segundo Paraná ([2024a]), ao final das colheitas a produtividade média da soja foi 73% menor que a obtida na safra 2020/2021. Em regiões onde praticamente não aconteceram secas, como por exemplo o Sul do Paraná, as plantas se desenvolveram bem e as produtividades das lavouras foram normais. A cultura do milho, embora menos importante no verão, na região Oeste, também teve uma queda média de rendimento ao redor de 38% em comparação com a safra anterior.

Diante do exposto e para tentar entender o ocorrido, existem diversos meios de estimativas e quantificações que explicam situações como estas. Estudos agrometeorológicos juntamente com o uso do sensoriamento remoto orbital podem ser úteis para a compreensão do ocorrido. A agrometeorologia, por meio da série de dados de clima como precipitação, temperaturas e umidade relativa, permite cálculos de evapotranspiração e déficit de pressão de vapor, para uma determinada região, possibilitando a realização de um completo balanço hídrico regional, dando uma ideia exata da situação ambiental e as possibilidades de um desenvolvimento vegetativo normal para plantas e lavouras agrícolas. O sensoriamento remoto, por sua vez, além de possibilitar o monitoramento por imagens, possibilita o uso das reflectâncias dos alvos terrestres, que trazem informações relevantes sobre a saúde da vegetação mesmo à distância, constituindo-se num ponto chave para essas questões.

Segundo Ponzoni et al. (2012), na comparação dos fatores de reflectância entre uma folha isolada e as de um dossel, existe muita semelhança dentro de uma mesma faixa espectral. Considerando que existem diferenças entre diferentes espécies, de modo geral, nas regiões espectrais do visível (380 a 760 nm), NIR (760 a 1300 nm) e SWIR (1300 a 3000 nm) (Meneses et al., 2019), é possível observar

os seguintes níveis de reflectâncias: em plantas saudáveis as reflectâncias do visível devem ser baixas, sendo menores que 5% na região do azul e do vermelho, com um pico maior de reflectância no verde, geralmente acima de 6% e muitas vezes acima de 10%. Reflectâncias mais altas no vermelho e no azul indicam falhas na absorção de energia, com prejuízos à clorofila e à realização de fotossíntese. Isso pode sugerir estresses os mais variados como deficiências nutricionais, deficiências hídricas, ataque de pragas e doenças, entre outras causas. Já na região do NIR, segundo Formaggio e Sanches (2017), as reflectâncias de folhas verdes sadias apresentam altos valores, situando-se entre 45 e 50%. Na região do SWIR, por sua vez, o controle da reflectância ocorre devido à presença de água nas folhas das plantas (Meneses et al., 2019). Geralmente, quando a planta é rica em água essa reflectância é inferior a 6%.

Outro ponto importante além da análise de reflectâncias são os índices de vegetação que podem ser obtidos por meio delas. Alguns índices de vegetação são importantes para a avaliação do desenvolvimento das plantas, explicando a sua evolução ao longo do tempo. Por exemplo, os níveis de clorofila nas folhas podem explicar vários problemas que acontecem com as plantas. Sua quantificação pode ser obtida de diversas maneiras, existindo alguns métodos que utilizam dados de sensores remotos. Um deles, considera a alta correlação de níveis de clorofila, como a razão da reflectância da banda verde (B3), do satélite Sentinel-2, com a banda do vermelho (B4) (Ha et al., 2017; Sampaio, 2023), possibilitando a discriminação de níveis altos, médios e baixos.

Outro índice conhecido e muito útil para o monitoramento do comportamento da vegetação é o NDVI (Rouse et al., 1974), sendo denominado índice de vegetação por diferença normalizada. É obtido entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (Red) e é um indicador que ajuda a compreender o quanto uma vegetação é saudável ou não. Segundo Tucker et al. (1979), a curva do NDVI tem uma natureza assintótica, onde o NDVI atinge um nível máximo quando a cobertura vegetal atinge 100% e mantém-se alto, mesmo com as plantas continuando a produzir novas folhas. Essa característica

assintótica é conhecida como saturação do NDVI e poderia ser uma limitação do índice em estudos dos dosséis vegetais. No entanto, no caso de estudos de estresses, entre eles o hídrico, o NDVI é muito útil porque quando ele é reduzido e não atinge um nível máximo ou quando sobe até um certo ponto e depois cai abruptamente, indica uma consequência de anormalidade no desenvolvimento das plantas.

Para a obtenção dos dois índices acima citados utilizam-se bandas do espectro eletromagnético (REM) situadas na região do visível até o infravermelho próximo (NIR). Outra parte desse espectro e que tem muita importância quando o assunto é conteúdo de água nas folhas das plantas é a região do infravermelho de ondas curtas (SWIR). A fundamentação teórica é que os espectros de reflectância da vegetação verde, entre 900 e 2500 nm, são dominados pela absorção devido à água. Utilizando-se bandas desta região do espectro eletromagnético é possível obter mais dois índices de vegetação importantes para a verificação do teor de água nas folhas das plantas. O primeiro deles é o MSI (Moisture Stress Index) (Hunt Jr.; Rock, 1989), que originariamente considera relações entre reflectâncias do infravermelho médio (MIR; acima de 3000 nm) e do infravermelho próximo (NIR) para a verificação do status hídrico de plantas. Pode ser obtido também pela combinação das reflectâncias de uma banda sensível ao conteúdo de água, como por exemplo uma banda do infravermelho de ondas curtas (SWIR) com outra pouco sensível, como por exemplo o NIR para a obtenção do índice. A banda do NIR serve como uma referência e a do SWIR indica o teor de água, pela razão Banda SWIR/Banda NIR. No caso do uso de bandas do satélite Sentinel 2, é possível obter a relação dividindo a reflectância da banda 11 (1610) pela da banda 8 (842 nm) (Drusch et al., 2012). Na interpretação do resultado, quanto menor o valor obtido, maior é o conteúdo de água nas plantas.

Outro índice que pode ser obtido nessa faixa do espectro eletromagnético é o NDWI (Normalized Difference Water Index), proposto por Gao (1996). Ele possibilita uma medida de moléculas de água líquida na vegetação, sendo sensível às quantidades totais de água líquida nas folhas e as mudanças no conteúdo de água no dossel,

pela absorção de energia pela água na faixa de 1240 nm. Atualmente, com o advento do satélite Sentinel 2 é possível, para o cálculo deste índice, o uso das suas bandas situadas entre 900 e 2500 nm, com predominância da absorção de energia devido à água, como por exemplo as bandas 11 (1610 nm) e 12 (2190 nm), juntamente com a banda 8A (865 nm), do NIR. É importante lembrar que essas bandas do Sentinel 2, da região do SWIR, estão localizadas em janelas atmosféricas onde a transmitância é alta, com baixa interferência do vapor d'água sobre os raios luminosos (Gao et al., 1993; Baptista, 2019).

Diante da situação exposta acima, o objetivo deste trabalho foi detalhar os impactos das irregularidades na distribuição hídrica, sobre áreas agrícolas, no estado do Paraná, safra 2021/2022, em regiões importantes para soja e milho, utilizando-se conhecimentos de agrometeorologia e de sensoriamento remoto. Foram então detalhadas as condições hídricas e atmosféricas regionais, por cálculos de balanço hídrico e do déficit de pressão de vapor (DPV). O sensoriamento remoto, por sua vez, viabilizou o uso de imagens e reflectâncias de áreas agrícolas, auxiliando a detalhar e caracterizar áreas secas, por meio de interpretação espectral dos alvos agrícolas em imagens e cálculos de índices de vegetação. Os estudos foram realizados para caracterizar áreas secas e áreas saudáveis de duas regiões do Paraná na safra 2021/2022. A primeira, o Oeste, onde as perdas em soja e milho foram muito grandes. A segunda, o Sul, onde não ocorreram problemas graves com seca e as produtividades foram normais.

Material e métodos

Foi utilizado um modelo de balanço hídrico climatológico para estimativas de deficiência hídrica no solo, na camada a ser explorada pelo sistema radicular de uma cultura, para períodos decendiais, utilizando-se o método de Thornthwaite e Matter (1955) e calculados em planilha eletrônica, conforme Rolim et al. (1998). Assim, partindo-se de dados de temperatura e chuva, foi realizado um balanço hídrico, que possibilita a visualização das entradas e saídas de água num local, num dado momento do ano. Com isto, puderam ser verificados os períodos de déficit e os de superávit hídrico ao longo do tempo, tornando-se um indicador climatológico da disponibilidade hídrica de um local ao longo do ano. Os dados meteorológicos utilizados foram os da série de dados de estações automáticas do INMET ([2024b]) presentes no Anexo 1, obtidos em diferentes regiões do Paraná, com ênfase para locais onde as irregularidades hídricas foram mais significativas. Foi também, calculado o DPV (déficit de pressão de vapor) pela equação de Tetens (1930), diariamente, para o período compreendido entre setembro de 2021 e fevereiro de 2022.

Com os resultados calculados do balanço hídrico e do DPV, foi possível verificar os períodos, durante a safra, com maior deficiência hídrica regional e coincidentes com áreas agrícolas cultivadas no campo. Com essas informações, buscou-se as imagens do satélite Sentinel 2 das áreas de interesse nas datas mais críticas, pelas plataformas Google Earth Engine ([2024]) e Land Viewer ([2021]). Dentro da imagem representativa da região estudada, foram selecionadas quatro áreas agrícolas e uma mata. Para elas e para cada data estudada foram obtidas as reflectâncias que auxiliaram a interpretação de imagens e possibilitaram cálculos de índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI. As imagens utilizadas foram as de composição colorida (RGB), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Com as reflectâncias obtidas para algumas bandas do satélite foram feitas análises dos seus níveis e tiradas conclusões sobre o

desenvolvimento dos dosséis. Também, com as reflectâncias, foram calculados os índices de vegetação descritos acima. A metodologia revelou o estado vegetativo das lavouras de cada região, possibilitando a comparação das informações obtidas pelo estudo com as produtividades obtidas regionalmente, principalmente da cultura da soja, que é predominante nas duas regiões estudadas.

Resultados e discussão

Os resultados são apresentados em sequência, pela ordem: Oeste e Sul.

Região Oeste: Data de 22 de outubro de 2021

A Figura 1 exibe o balanço hídrico regional, representativo do Oeste do Paraná na safra em estudo (2021/2022), obtido pelos dados das estações meteorológicas do INMET ([2024b]), localizadas no Oeste e Sudoeste, mais precisamente em Campo Bonito, Foz do Iguaçu, Guaíra, Goioerê, Marechal Cândido Rondon e Planalto. Tal balanço hídrico demonstrou que houve um período bastante chuvoso durante todo o mês de outubro. Notadamente, do início de novembro em diante, a região não recebeu mais chuvas significativas até fevereiro de 2022. Ficou evidenciado que nesse período seco, principalmente para lavouras semeadas em final de outubro e início de novembro, a evapotranspiração foi maior que as quantidades de chuvas. Isso caracterizou um importante déficit hídrico nos momentos críticos de emissão de flor e formação de grãos das culturas agrícolas, como soja e milho, cujos impactos puderam ser verificados pela grande redução da produtividade das lavouras.

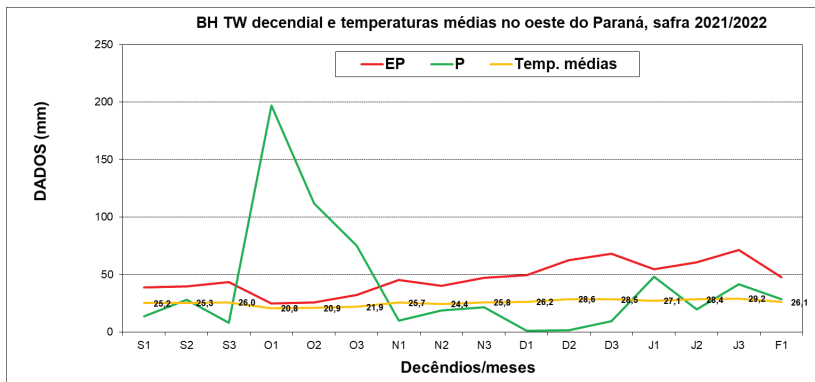


Figura 1. Síntese da oferta e da deficiência hídrica nas regiões oeste do Paraná, safra 2021/2022.

Fonte: INMET ([2024b]) - estações meteorológicas de Campo Bonito, Foz do Iguaçu, Guaíra, Goioerê, Marechal Cândido Rondon e Planalto, com dados climáticos de setembro de 2021 a março de 2022. Balanço hídrico de Thornthwaite (TW), adaptado por Rolim et al. (1998). EP = Evapotranspiração Potencial; P= Precipitação.

A Tabela 1 mostra decendialmente o DPV calculado para a safra 2021/2022, que teve o seu período mais crítico no mês de dezembro de 2021, com alta demanda evaporativa pela atmosfera.

Na sequência são apresentados os resultados obtidos pelo sensoriamento remoto. A Figura 2 é um recorte de uma composição colorida (RGB 4, 3, 2) de áreas agrícolas do município de Palotina. Na imagem, estão indicadas as cinco áreas selecionadas: uma mata nativa, duas áreas irrigadas sob pivot (Pv Esq e Pv Dir) e duas outras lavouras de sequeiro (Lav 1 e Lav 2). Para essas áreas foram obtidos dados de reflectâncias de 7 bandas do satélite Sentinel 2, apresentadas na Tabela 2. Os índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI obtidos, estão na Tabela 3.

Tabela 1. Valores de médias decendiais de déficit de pressão de vapor (DPV), em KPa, calculados para a região de Palotina – PR, com a utilização de dados da estação meteorológica do INMET ([2024b]) localizada no município vizinho de Marechal Cândido Rondon-PR.

| Período | | DPV |
|-------------|----------|------|
| 1º decêndio | out/2021 | 0,46 |
| 2º decêndio | out/2021 | 0,77 |
| 3º decêndio | out/2021 | 1,28 |
| 1º decêndio | nov/2021 | 1,23 |
| 2º decêndio | nov/2021 | 1,13 |
| 3º decêndio | nov/2021 | 1,26 |
| 1º decêndio | dez/2021 | 1,62 |
| 2º decêndio | dez/2021 | 1,65 |
| 3º decêndio | dez/2021 | 1,89 |
| 1º decêndio | jan/2022 | 1,16 |
| 2º decêndio | jan/2022 | 1,26 |
| 3º decêndio | jan/2022 | 1,1 |

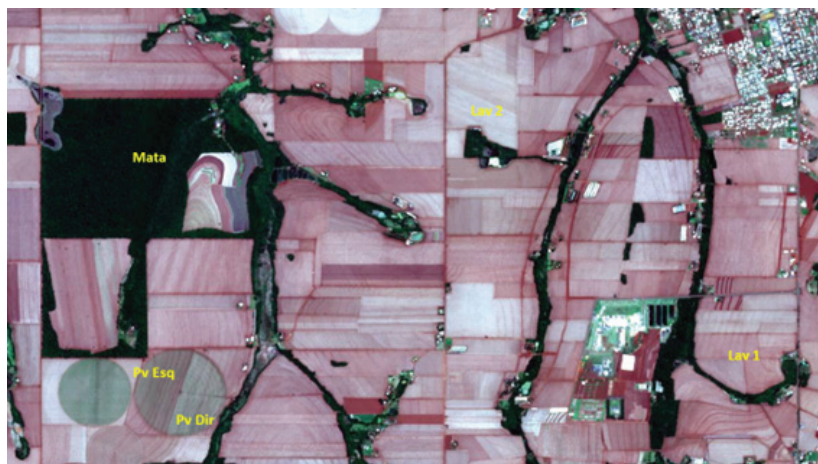


Figura 2. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4, 3, 2), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 22 de outubro de 2021.

A Tabela 2 reúne para cada área selecionada, as reflectâncias de sete bandas do satélite Sentinel 2, abrangendo a radiação do espectro eletromagnético (REM) desde o visível, passando pelo infravermelho próximo (NIR) até o infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Tabela 2. Reflectâncias de áreas agrícolas em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 22 de outubro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na Mata, nas Lavouras de sequeiro 1 e 2, nos Pivô Esquerdo e Pivô Direito, na região de Palotina, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 2 | 4 | 2 | 34 | 34 | 14 | 6 |
| Lav 1 | 7 | 9 | 15 | 19 | 20 | 30 | 27 |
| Lav 2 | 8 | 11 | 16 | 24 | 24 | 38 | 33 |
| Pv Esq | 5 | 8 | 10 | 22 | 22 | 25 | 20 |
| Pv Dir | 6 | 9 | 11 | 24 | 25 | 32 | 25 |

Na Tabela 3, encontram-se os resultados dos cálculos dos índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI para as áreas já visíveis espectralmente.

Tabela 3. Índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 22 de outubro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na Mata e nos Pivôs Esquerdo e Direito, na região de Palotina, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|-------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 2,40 | 0,90 | 0,42 | 0,67 |
| Pv Esq | 0,77 | 0,36 | 1,13 | 0,04 |
| Pv Dir | 0,78 | 0,36 | 1,33 | 0,006 |

As Figuras 3 e 4 apresentam as mesmas áreas, também para a data de 22 de outubro de 2021, porém em composições diferentes de falsa cor. A Figura 3 é uma composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3,

NIR), da região do infravermelho próximo. Ela indica vegetação saudável na cor vermelha e áreas sem ou com pouca vegetação em tons de ciano. A Figura 4 também é uma composição em falsa cor, porém da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR). Nela, a vegetação saudável está na cor verde e áreas sem vegetação, ou com vegetação ainda não estabelecida, em tons arroxeados.

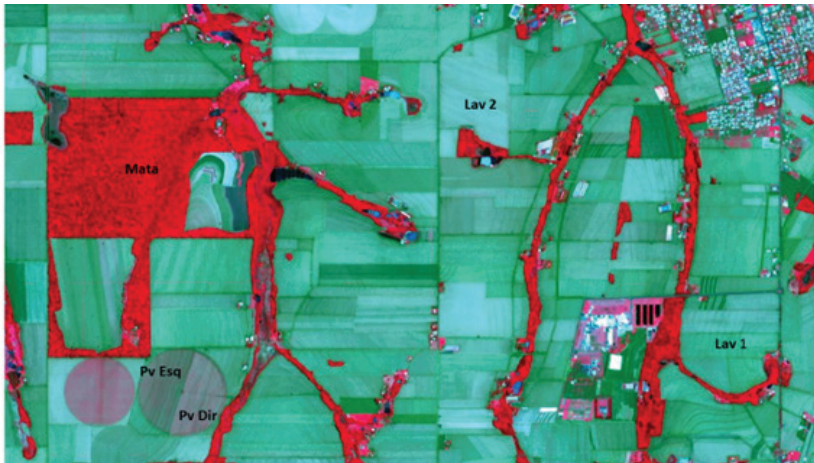


Figura 3. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 22 de outubro de 2021.

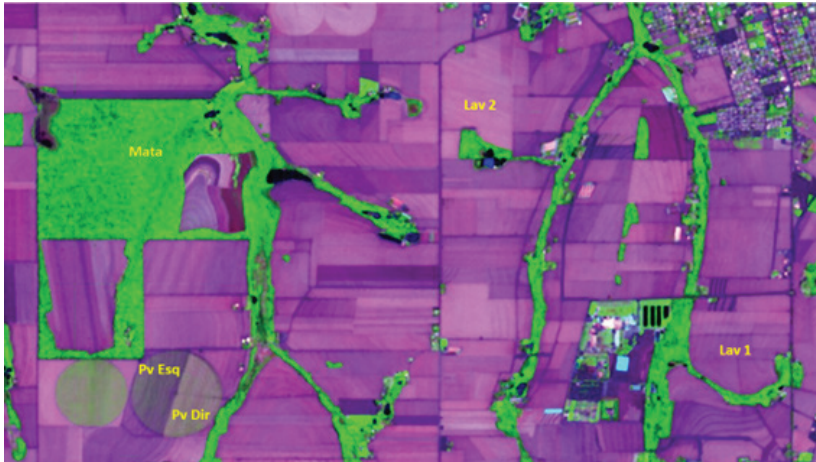


Figura 4. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12, 8A, 4, SWIR), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 22 de outubro de 2021.

Para a interpretação dos resultados foi possível fazer uma análise conjunta das imagens (Figuras 2 a 4) com os dados das Tabelas 2 e 3.

Na data de 22 de outubro de 2021, a área de Mata, apresentava a reflectância de 34% na Banda 8 e 6% na Banda 12, mostrando vegetação normal, sugerindo não haver estresse hídrico nas folhas das plantas. Além disso, indicava boa absorção de energia no visível (baixa reflectância nas bandas 2 (azul) e 4 (vermelho) e reflectância mais elevada na banda 3 (verde). Mostrou também um alto índice de clorofila (2,40) e NDVI de 0,90, significando alta densidade da vegetação, um baixo MSI (0,42) e um alto NDWI (0,67), confirmando bom teor de água nas folhas. A cor verde da composição colorida (Figura 2) e da composição do SWIR (Figura 4) e o vermelho da composição do NIR (Figura 3) confirmam os dados das Tabelas 2 e 3.

Nas áreas cultivadas e denominadas Lav 1 e Lav 2, as reflectâncias da Banda 8 (19 e 24%) e da Banda 12 (27 e 33%) sugerem áreas sem vegetação ou com vegetação ainda em estágios muito iniciais de desenvolvimento vegetativo. Elas ainda não estão visíveis

nas imagens (Figuras 2 a 4), revelando apenas a aparência de solos sem plantas, com forte contribuição do solo para as reflectâncias. Estima-se que tenham sido semeadas na segunda quinzena de outubro de 2021. Cabe lembrar também que, segundo Tucker et al. (1979), culturas como soja e milho só são visíveis espectralmente após a cobertura vegetal atingir de 30 a 35% e 20 a 25%, respectivamente. Como há predominância da reflectância dos solos, sendo que, com o dossel ainda não completamente fechado, os valores dos índices de vegetação calculados podem não refletir a realidade e, portanto, não foram apresentados na Tabela 3.

As plantas dentro do círculo, que se supõe serem áreas irrigadas, denominadas Pv Esq e Pv Dir, já aparecem nas imagens (Figuras 2 a 4), estimando-se que tenham sido semeadas na segunda quinzena de setembro de 2021. As reflectâncias da Banda 8 (22 e 24%) e da Banda 12 (20 e 25%) assemelham-se àquelas das lavouras Lav 1 e Lav 2, sugerindo lavouras ainda em fase de estabelecimento. No visível, as reflectâncias da Banda 4 (vermelho), de 10 e 11%, são altas, maiores até que a reflectância da Banda 3 (verde; 8 e 9%), indicando ainda uma absorção de energia anormalmente baixa para a realização da fotossíntese. O NDVI de 0,36, para ambas as áreas PV, sugere uma vegetação que está moderadamente saudável. Os índices de clorofila ainda estão baixos (0,77 e 0,78) e o MSI é menor que os das áreas anteriores (Lav 1 e Lav 2), porém são bem mais altos do que o da área de Mata, indicando limitações hídricas. Além disso, o NDWI positivo (0,04 e 0,06) sugere baixa umidade nas folhas. Há também grande contribuição dos solos para a reflectância, levando a crer que os índices de vegetação calculados ainda não são confiáveis.

Em síntese, pode-se dizer que nas quatro áreas de lavouras há uma importante contribuição dos solos para a reflectância. Como os solos exercem grande influência nas reflectâncias, a pequena área foliar das plantas existentes pode ser ainda insignificante para os cálculos dos índices de vegetação, que podem conter imprecisões. Porém, os índices vegetativos calculados podem e servem de marco

inicial para este estudo nas futuras comparações com os resultados das datas subsequentes. A rigor, neste momento, a única área com um desenvolvimento vegetativo e índices vegetativos dentro do esperado é a área de Mata. Isto é, apresentou baixas reflectâncias no visível, uma reflectância dentro do esperado no NIR e baixa reflectância no SWIR.

Região Oeste: Data de 21 de novembro de 2021

A Figura 5 mostra o recorte da composição colorida (RGB 4, 3, 2) das mesmas áreas do município de Palotina já abordadas anteriormente, só que agora, da data de 21 de novembro de 2021.

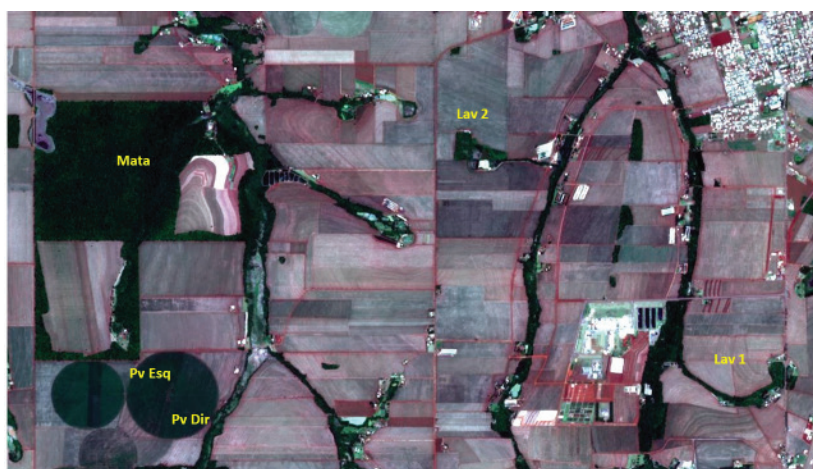


Figura 5. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4,3,2), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 21 de novembro de 2021.

A Tabela 4 reúne as reflectâncias das sete bandas do satélite Sentinel 2, já mencionadas anteriormente, para 21 de novembro de 2021.

Tabela 4. Reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 21 de novembro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na Mata, nas lavouras de sequeiro 1 e 2 e nos Pivôs Esquerdo e Direito, na região de Palotina, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 2 | 4 | 2 | 39 | 41 | 16 | 7 |
| Lav 1 | 5 | 8 | 10 | 24 | 26 | 27 | 20 |
| Lav 2 | 5 | 8 | 8 | 31 | 33 | 29 | 19 |
| Pv Esq | 3 | 5 | 2 | 54 | 55 | 23 | 10 |
| Pv Dir | 3 | 5 | 3 | 48 | 46 | 21 | 10 |

Na Tabela 5 estão os índices de clorofila, e NDVI, MSI e NDWI calculados a partir das reflectâncias obtidas para a data de 21 de novembro de 2021.

Tabela 5. Índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 21 de novembro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na Mata, nas Lavouras de sequeiro 1 e 2, nos Pivô Esquerdo e Pivô Direito, na região de Palotina, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 2,45 | 0,90 | 0,41 | 0,71 |
| Lav 1 | 0,84 | 0,42 | 1,12 | 0,11 |
| Lav 2 | 0,95 | 0,58 | 0,93 | 0,25 |
| Pv Esq | 2,27 | 0,91 | 0,42 | 0,68 |
| Pv Dir | 1,86 | 0,89 | 0,43 | 0,63 |

As Figuras 6 e 7 indicam as mesmas áreas, também para a data de 21 de novembro de 2021, em composições de falsa cor. A Figura 6 é a composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), da região do infravermelho próximo. A Figura 7 é a composição em falsa cor da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR).

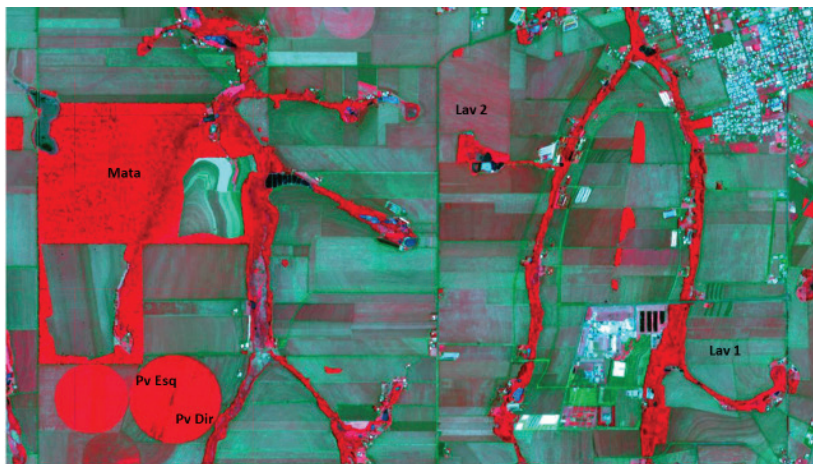


Figura 6. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 21 de novembro de 2021.

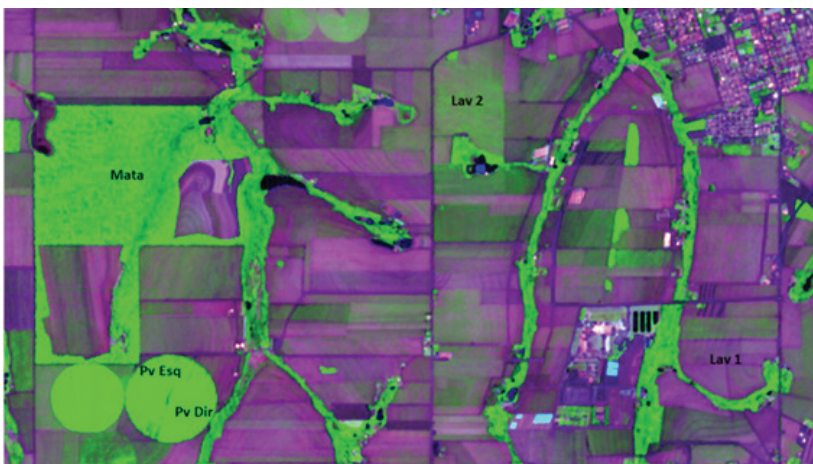


Figura 7. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12, 8A, 4, SWIR), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 21 de novembro de 2021.

Para a interpretação dos resultados foi feita uma análise conjunta das imagens (Figuras 5 a 7) com os dados das Tabelas 4 e 5.

Na data de 21 de novembro de 2021, a área de Mata, apresentava a reflectância de 39% na Banda 8 e 7% na Banda 12, melhorando o seu desempenho vegetativo e mostrando ausência de estresse hídrico para as plantas. O índice de clorofila (2,45) continuava alto, o NDVI de 0,90 mantinha alta a densidade da vegetação. O MSI baixo (0,41) e o NDWI alto (0,71), confirmavam o bom teor de água para as plantas. A cor verde da composição colorida (Figura 5) e da composição do SWIR (Figura 7) e o vermelho da composição do NIR (Figura 6) confirmam os dados das Tabelas 4 e 5.

As áreas dentro do círculo, Pv Esq e Pv Dir, nesta data de 21 de novembro, aparecem bem estabelecidas nas imagens (Figuras 5 a 7). As reflectâncias da Banda 8 (54 e 48%) agora superam a da área de Mata. As reflectâncias da região do visível (Bandas 2, 3 e 4) são semelhantes àquelas de Mata, com maior absorção de energia nas bandas 2 e 4 (azul e vermelho) com um pico de maior reflexão na banda 3 (verde). A banda 12 também apresenta reflectâncias inferiores à data de 22 de outubro (10 e 10%), embora ainda relativamente altas, indicam evolução quanto ao teor de água nas folhas. O resultado aponta que, as áreas estavam neste momento, com índices de clorofila alto e médio (2,27 e 1,86), alto NDVI (0,91 e 0,89), baixo MSI (0,42 e 0,43) e bons valores de NDWI (0,68 e 0,63) indicando ausência ou uma pequena deficiência hídrica. De modo geral, pode-se dizer que, em comparação com a data anterior (22 de outubro) ocorreu uma evolução no desenvolvimento das plantas.

A área denominada Lav. 2, já visível nas imagens (Figuras 5 a 7), revela que fora semeada antes da Lav 1. O seu NDVI (0,58) indica uma vegetação moderadamente saudável. Porém ainda existem valores semelhantes de alta reflectância (8%) na Banda 4 (vermelho) e a mesma reflectância (8%) na banda 3 (verde), o que pode implicar em algum estresse prejudicial à fotossíntese. Apresenta reflectância ainda relativamente baixa nas bandas 8 (31%) e 8 A (33%), indicando um desenvolvimento ainda em evolução. As reflectâncias das bandas 11 (29%) e 12 (19%), são altas e demonstram que podem existir

limitações hídricas para as plantas. De um modo geral, pode-se dizer que houve evolução nesta área em relação à data anterior. No entanto, os índices de clorofila ainda são baixos (0,95), o MSI (0,93), o NDWI (0,25) são índices intermediários, demonstrando que a evolução das plantas pode não estar ocorrendo dentro do esperado inicialmente.

A área denominada Lav 1, era a menos desenvolvida neste momento. O seu NDVI, de 0,42 apresenta uma vegetação moderadamente saudável, embora com densidade inferior à da Lav 2. As reflectâncias da Banda 8 (24%), da banda 8A (26%) e as das Banda 11 (27%) e Banda 12 (20%) sugerem uma área com vegetação ainda em estágio muito inicial de desenvolvimento vegetativo (Figuras 5 a 7), revelando grande influência do solo na reflectância, sugerindo ser a última área a ser semeada nesta amostragem. Na região do visível, a reflectância da banda 4 (10%) é superior àquela da banda 3 (8%), sugerindo problemas de absorção de energia para a fotossíntese. Os índices de clorofila ainda baixos (0,84), indicavam uma vegetação apenas moderadamente saudável ou apresentando estresse. O MSI (1,12) e NDWI (0,11) sinalizavam um desenvolvimento ainda aquém do esperado, com as plantas atestando haver disponibilidade hídrica limitada, confirmada pela banda 12. Como na Lav 2, houve uma evolução no desenvolvimento das plantas em relação à data anterior. No entanto, a área pode estar sofrendo estresses por limitação hídrica, o que está coerente com as condições ambientais vigentes no período (Figura 1 e Tabela 1).

Região Oeste: Data de 26 de dezembro de 2021

A Figura 8 mostra o recorte da composição colorida (RGB 4, 3, 2) das mesmas áreas do município de Palotina já abordadas anteriormente, só que agora na data de 26 de dezembro de 2021.

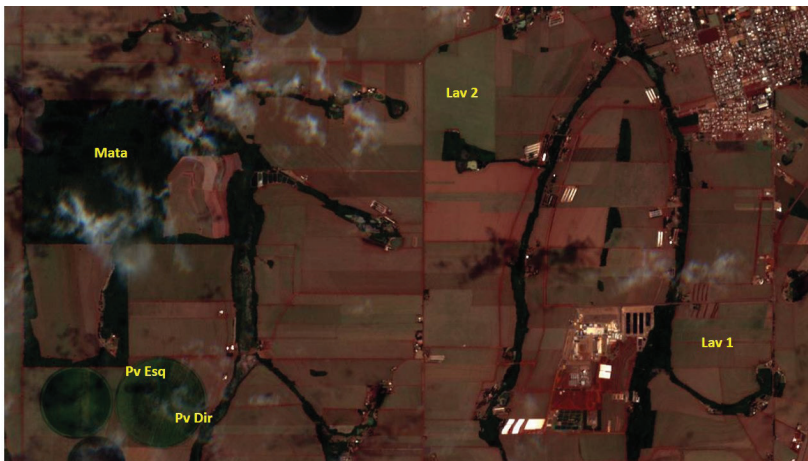


Figura 8. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4, 3, 2), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 26 de dezembro de 2021.

A Tabela 6 reúne as reflectâncias das 7 bandas do satélite Sentinel 2 em estudo, para 26 de dezembro de 2021.

Tabela 6. Reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 26 de dezembro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Palotina, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 3 | 6 | 3 | 41 | 42 | 17 | 7 |
| Lav 1 | 6 | 9 | 11 | 28 | 31 | 27 | 19 |
| Lav 2 | 7 | 11 | 11 | 36 | 39 | 33 | 21 |
| Pv Esq | 5 | 9 | 7 | 36 | 41 | 22 | 12 |
| Pv Dir | 4 | 8 | 6 | 35 | 38 | 19 | 10 |

A Tabela 7 apresenta os resultados dos cálculos dos níveis de clorofila, NDVI, MSI e NDWI com as reflectâncias obtidas para a data de 26 de dezembro de 2021.

Tabela 7. Índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 26 de dezembro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Palotina, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 1,75 | 0,84 | 0,41 | 0,69 |
| Lav 1 | 0,85 | 0,41 | 0,96 | 0,23 |
| Lav 2 | 0,97 | 0,51 | 0,91 | 0,30 |
| Pv Esq | 1,37 | 0,67 | 0,61 | 0,52 |
| Pv Dir | 1,33 | 0,70 | 0,54 | 0,56 |

As Figuras 9 e 10 apresentam as mesmas áreas, também para a data de 26 de dezembro de 2021 em composições de falsa cor. A Figura 9 é a composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), da região do infravermelho próximo. A Figura 10 é a composição em falsa cor da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR).

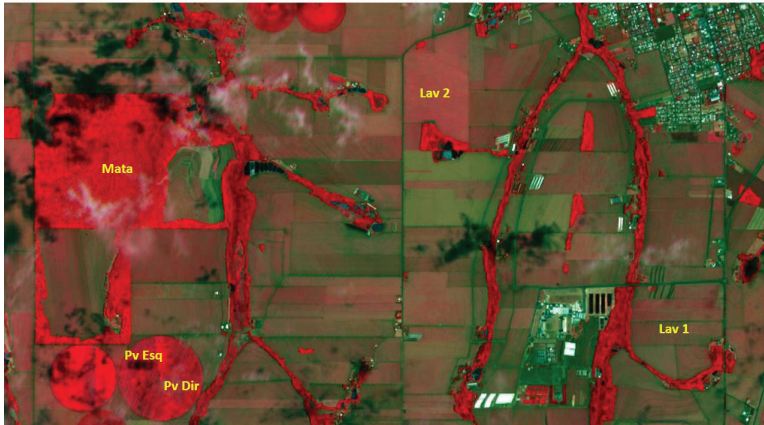


Figura 9. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8,4,3, NIR), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 26 de dezembro de 2021.

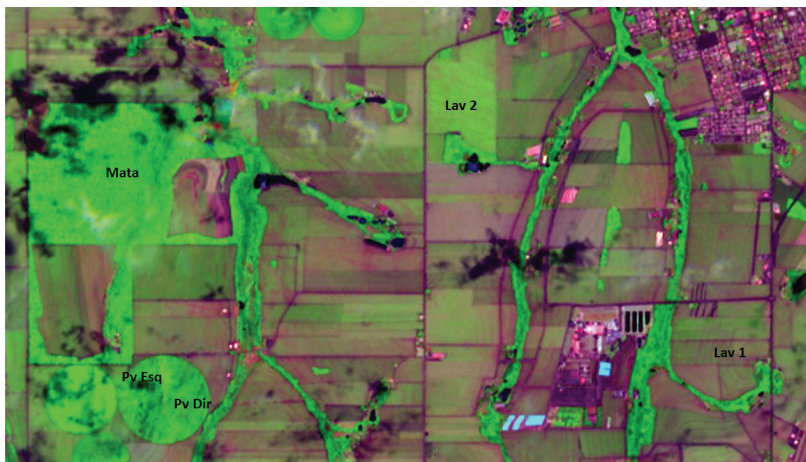


Figura 10. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12,8A,4, SWIR), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 26 de dezembro de 2021.

Para a interpretação dos resultados foi possível fazer uma análise conjunta das imagens (Figuras 8 a 10) com os dados das Tabelas 6 e 7.

Os dados da Figura 1 mostram que, após o mês de outubro de 2021, ocorreu um período bastante seco na região, com a evapotranspiração sendo sempre maior que a oferta hídrica, desde o primeiro decêndio de novembro de 2021 até fevereiro e março de 2022, com um agravamento no mês de dezembro de 2021. Neste período o déficit de pressão de vapor foi sempre elevado, especialmente no mês de dezembro, quando atingiu valores de 1,62 a 1,89 KPa (Tabela 1), deixando a atmosfera extremamente seca e com alta demanda evaporativa. As imagens da data de 26 de dezembro de 2021 (Figuras 8 a 10) apresentam as áreas neste momento. Foi possível verificar que, em comparação com a data anterior, de 21 de novembro, portanto apenas 35 dias antes, ocorreram transformações importantes no desenvolvimento das plantas. A área de Mata, que apresentava um desempenho normal até então, manteve-se ainda num bom estado, porém com pequenas modificações para pior. No espectro

visível, a reflectância subiu um pouco (Tabela 6), indicando, talvez, alguma redução da eficiência da fotossíntese. Uma das consequências foi a redução do NDVI, que caiu de 0,90 para 0,84. Houve também redução dos índices de clorofila de 2,45 para 1,75. O MSI e o NDWI mantiveram-se em níveis semelhantes aos anteriores (0,41 e 0,69). As reflectâncias do NIR e do SWIR foram semelhantes àquelas da data anterior.

As áreas dos pivôs, Esq e Dir, tiveram sensível redução das reflectâncias na Banda 8, ficando inferiores novamente à de mata. Na banda 12 foram semelhantes às da mata. Os índices de clorofila caíram (1,37 e 1,33). O mesmo aconteceu com o NDWI (0,52 e 0,56), enquanto que o MSI subiu (0,61 e 0,54), demonstrando redução no teor de água disponível para as plantas em comparação com a data anterior. O NDVI, por sua vez também foi menor (0,67 e 0,70), o que mostra queda na densidade da vegetação. Pode-se dizer que em apenas 35 dias, as plantas que estavam num desenvolvimento vegetativo em evolução mostraram um retrocesso em seu desenvolvimento. Cabe aqui, uma pergunta: isto ocorreu por questões naturais e de senescência devido ao início do final de ciclo das plantas ou foi motivado pelo estresse hídrico vigente na região? Para responder podemos abordar dois lados importantes da questão. O primeiro é que essas duas áreas foram semeadas ainda em setembro e após a sua emergência ocorreu um período muito chuvoso que foi o mês de outubro. Estima-se que o seu NDVI já no início de novembro era superior a 0,70, chegando a 0,91 e 0,89 em 21 de novembro para depois, em 26 de dezembro, caírem para 0,67 e 0,70. Isso indica que as áreas tiveram uma densidade relativamente normal, com NDVI superior a 0,70 em quase dois meses. Índice que poderia ter sido melhor se a evapotranspiração e o déficit de pressão de vapor tivessem sido mais favoráveis, fatores que contribuiriam para diminuir a disponibilidade de água para as plantas mesmo em áreas irrigadas. O segundo ponto é que, com a condição ambiental extremamente adversa (Figura 1 e Tabela 1), nos períodos mais críticos do ciclo das plantas, nos momentos de passagem de estádios vegetativos para reprodutivos e formação da produção, as adversidades ocorridas mostraram potencial

para prejudicar o desenvolvimento das plantas e causar possíveis quedas de rendimento.

A área denominada Lav 2, que fora semeada após o período chuvoso de outubro, teve boa disponibilidade hídrica no estabelecimento das plantas. Após isso, iniciou-se o período seco de novembro e dezembro, que teve consequências negativas para as plantas. Nesta data de 26 de dezembro, essa área apresentava alta reflectância na Banda 4 (vermelho), indicando possíveis estresses e prejuízos à fotossíntese. A reflectância no NIR (banda 8), era semelhante às áreas dos pivôs. No entanto, a reflectância da banda 12 (21%) era alta (Tabela 6), indicando baixo teor de água nas folhas. O seu índice de clorofila foi semelhante à data anterior (0,97), continuando baixo. O mesmo aconteceu com o MSI e o NDWI, que se mantiveram em níveis semelhantes aos anteriores. O NDVI caiu para 0,51, reduzindo um pouco mais a densidade do dossel (Tabela 7). Com essa queda no NDVI, as plantas não tiveram um desenvolvimento vegetativo normal, pois nem atingiram um valor significativo deste índice e já houve uma redução do mesmo, indicando que o estresse hídrico causou sérias consequências no rendimento das plantas.

A área denominada Lav 1 foi a mais prejudicada pela condição ambiental verificada. Semeada após a Lav 2, no final de outubro de 2021, teve grande parte do seu desenvolvimento em condições climáticas adversas. Pode-se destacar, nesta área, que as reflectâncias do visível, notadamente a da banda vermelha foram altas, prejudicando a ação da clorofila e conseqüentemente prejudicando a fotossíntese. A reflectância do NIR foi a mais baixa de todas as áreas e a reflectância da banda 12 (19%) foi alta, indicando pouca água nas folhas. No entanto, os índices vegetativos foram semelhantes àqueles da data anterior, continuando nos mesmos níveis o índice de clorofila (0,85), o MSI (0,96), o NDWI (0,23) e o NDVI (0,41). Na prática, é possível verificar que nos 35 dias que separam as datas de 21 de novembro e 26 de dezembro, houve uma estagnação no desenvolvimento das plantas, que não tiveram como reagir diante da adversidade ocorrida.

Região Oeste: Data de 10 de janeiro de 2022

A Figura 11 apresenta o recorte da composição colorida (RGB 4, 3, 2) das mesmas áreas do município de Palotina já abordadas anteriormente, só que agora, da data de 10 de janeiro de 2021.



Figura 11. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4,3,2), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 10 de janeiro de 2022.

Tabela 8. Reflectâncias (%) de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 10 de janeiro de 2022, obtidas pelo Google Earth Engine, na Mata, nas Lavouras de sequeiro 1 e 2, no Pivô Esquerdo e Pivô Direito, na região de Palotina, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 2 | 4 | 1 | 38 | 38 | 15 | 6 |
| Lav 1 | 6 | 8 | 10 | 21 | 23 | 26 | 21 |
| Lav 2 | 7 | 10 | 12 | 26 | 28 | 35 | 27 |
| Pv Esq | 5 | 8 | 12 | 26 | 28 | 35 | 30 |
| Pv Dir | 5 | 8 | 12 | 23 | 25 | 28 | 30 |

A Tabela 9 apresenta os resultados dos cálculos dos índices vegetativos CGI, NDVI e NDWI com as reflectâncias obtidas para a data de 10 de janeiro de 2022.

Tabela 9. Índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 10 de janeiro de 2022, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Palotina, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|-------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 2,64 | 0,91 | 0,39 | 0,71 |
| Lav 1 | 0,80 | 0,34 | 1,23 | 0,04 |
| Lav 2 | 0,78 | 0,35 | 1,34 | 0,01 |
| Pv Esq | 0,68 | 0,36 | 1,34 | -0,03 |
| Pv Dir | 0,68 | 0,30 | 1,21 | 0,09 |

As Figuras 12 e 13 representam as mesmas áreas, na data de 10 de janeiro de 2022 em composições de falsa cor. A Figura 12 é a composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), da região do infravermelho próximo. A Figura 13 é a composição em falsa cor da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR).

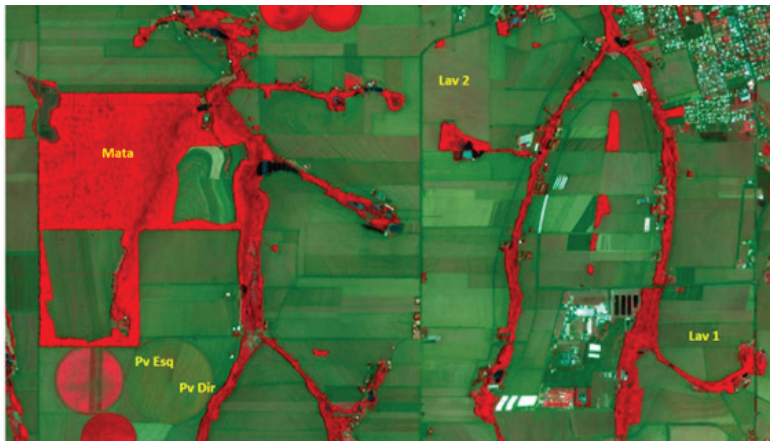


Figura 12. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8,4,3, NIR), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 10 de janeiro de 2022.

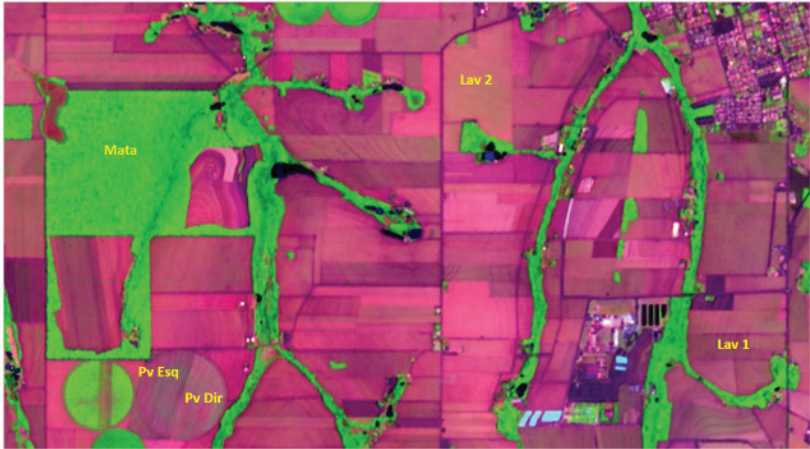


Figura 13. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12, 8A, 4, SWIR), em áreas de agricultura na região de Palotina, oeste do Paraná, em 10 de janeiro de 2022.

A Figura 14 ilustra a evolução do NDVI durante os períodos estudados, desde outubro de 2021 até janeiro de 2022.

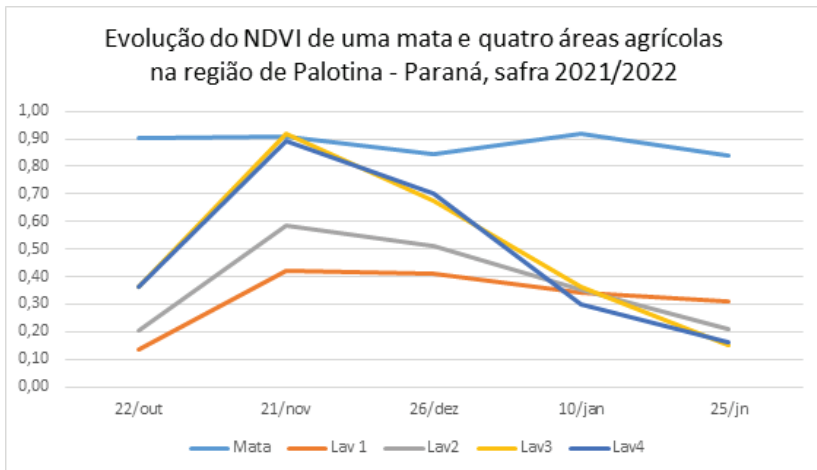


Figura 14. Evolução do índice de vegetação NDVI, em cinco diferentes datas, de outubro de 2021 a janeiro de 2022, em cinco áreas vegetadas da região de Palotina, oeste do Paraná, na safra agrícola de 2021/2022.

Para a interpretar os resultados, foi feita uma análise conjunta das imagens (Figuras 11 a 14) com os dados das Tabelas 8 e 9.

Foi possível verificar que, em 10 de janeiro de 2022, em comparação com a data anterior de 26 de dezembro, portanto, duas semanas depois, apenas a Mata se encontrava em condições vegetativas normais. Nela, as reflectâncias do visível continuavam baixas, dentro do esperado. As reflectâncias da banda 8 e da banda 12 apresentavam um desenvolvimento normal, com boa densidade e bom teor de água nas folhas. O índice de clorofila mantinha-se de médio a alto (2,64), e um alto NDVI (0,91). Os índices MSI (0,39) e NDWI (0,71) também confirmavam um bom desempenho das plantas. As áreas das lavouras encontravam-se em fase de final de ciclo, próximas da colheita, que ocorreriam entre 10 e 31 de janeiro. Estima-se que as áreas dos pivôs tenham sido colhidas entre 10 e 15 de janeiro, enquanto que as Lav 1 e Lav 2, tenham sido colhidas no final do mês. As áreas dos pivôs devem ter tido uma produtividade quase normal, com alguma redução de produtividade em função das adversidades climáticas, notadamente a evapotranspiração alta e o déficit de pressão de vapor também muito alto. As áreas Lav 1 e Lav 2, semeadas imediatamente antes do início do período mais crítico do evento climático, apresentaram anomalias significativas ao longo do período: foi possível verificar que não tiveram um desenvolvimento normal durante todo o seu ciclo, mostrando reflectâncias altas no visível, baixas no NIR e altas no SWIR, principalmente na banda 12. Isso indicou altos níveis de estresses. O NDVI (Figura 14), por sua vez foi sempre relativamente baixo, indicando densidade da vegetação aquém do necessário para bons rendimentos.

A região agrícola focada, o Oeste do Paraná, tem o predomínio quase absoluto da cultura da soja no verão, com participação reduzida de milho e outras culturas de menor expressão. A consequência do fenômeno climático sobre a produtividade pode ser verificada após as colheitas. Os dados de produção e produtividade de soja obtidos junto à Secretaria de Agricultura do Paraná, por meio do Departamento de Economia Rural - DERAL, que faz a estimativa de safra oficial para o estado (Paraná, [2024b]), mostraram a extensão dos prejuízos

causados pela seca. Por esses dados oficiais, ficou constatado que a produtividade da soja teve uma redução de 73%, em relação à safra anterior, ficando em apenas 922 kg/ha, enquanto que para o milho a redução foi de 38%, ficando em 4696 kg/ha.

Região Sul: Data de 23 de novembro de 2021

O balanço hídrico regional, representativo do sul do Paraná na safra em estudo (2021/2022), elaborado com dados das estações meteorológicas do INMET ([2024b]), localizadas nos municípios de Castro, Colombo, Inácio Martins, General Carneiro, Irati e Clevelândia foi apresentado na Figura 15. Tal balanço hídrico demonstrou que houve um período bastante chuvoso durante todo o mês de outubro. De meados de novembro ao final de dezembro ocorreu um período ligeiramente mais seco, quando a evapotranspiração foi superior à oferta hídrica. Do início de janeiro até meados de fevereiro as condições ambientais voltaram ao normal, com a evapotranspiração sendo menor que a quantidade de chuvas.

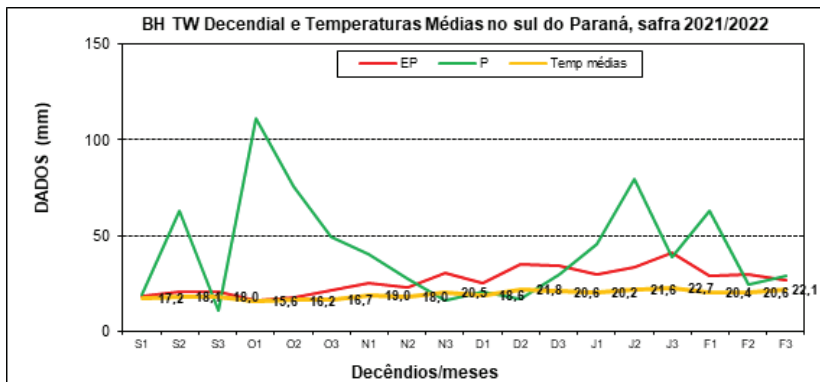


Figura 15. Síntese da oferta e da deficiência hídrica nas regiões sul do Paraná, safra 2021/2022.

Fonte: INMET ([2024b]) - estações meteorológicas de Castro, Colombo, Inácio Martins, General Carneiro, Irati e Clevelândia, com dados climáticos de setembro de 2021 a março de 2022. Balanço hídrico de Thornthwaite (TW), adaptado por Rolim et al. (1998). EP= Evapotranspiração Potencial; P= Precipitação.

O DPV decendial calculado para a safra, que teve o seu período de maior elevação do terceiro decêndio de novembro até o terceiro decêndio de dezembro de 2021, coincidindo com o período mais seco da safra em questão (Tabela 10).

Tabela 10. Valores de médias decendiais de déficit de pressão de vapor (DPV), em KPa, calculados para a região de Carambeí – PR, com a utilização de dados das estações meteorológicas do INMET ([2024b]) localizadas nos municípios de Colombo, Irati e Ivaí-PR.

| Período | | DPV |
|-------------|----------|------|
| 1º decêndio | out/2021 | 0,29 |
| 2º decêndio | out/2021 | 0,47 |
| 3º decêndio | out/2021 | 0,40 |
| 1º decêndio | nov/2021 | 0,50 |
| 2º decêndio | nov/2021 | 0,88 |
| 3º decêndio | nov/2021 | 0,59 |
| 1º decêndio | dez/2021 | 0,79 |
| 2º decêndio | dez/2021 | 0,64 |
| 3º decêndio | dez/2021 | 0,46 |
| 1º decêndio | jan/2022 | 0,40 |
| 2º decêndio | jan/2022 | 0,50 |
| 3º decêndio | jan/2022 | 0,55 |

Na sequência, são apresentados os resultados obtidos a partir das imagens orbitais. A Figura 16 é um recorte de uma composição colorida (RGB 4, 3, 2) de áreas agrícolas do município de Carambeí. Dentro da imagem, estão indicadas as cinco áreas selecionadas: Uma mata nativa e quatro áreas agrícolas (Lav 1, Lav 2, Lav 3 e Lav4). Para elas foram obtidos dados de reflectâncias de sete bandas do satélite Sentinel 2, apresentadas na Tabela 11. Os índices de clofrola, NDVI, MSI e NDWI obtidos estão na Tabela 12.



Figura 16. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4, 3, 2), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 23 de novembro de 2021.

A Tabela 11 reúne para cada área selecionada, as reflectâncias de sete bandas do satélite Sentinel 2, abrangendo a radiação do espectro eletromagnético (REM) desde o visível, passando pelo infravermelho próximo (NIR) até o infravermelho de ondas curtas (SWIR). As reflectâncias apresentadas na Tabela 11, com exceção da área de Mata, referem-se exclusivamente aos solos e coberturas dos solos, visto que as áreas agrícolas foram semeadas posteriormente, provavelmente no mês de novembro.

Os resultados dos cálculos dos índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI da área de Mata, a única com total cobertura verde em 23 de novembro de 2021 estão na Tabela 12.

Tabela 11. Reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 23 de novembro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 2 | 3 | 2 | 27 | 29 | 8 | 3 |
| Lav 1 | 8 | 12 | 18 | 26 | 28 | 38 | 27 |
| Lav 2 | 8 | 12 | 18 | 31 | 33 | 40 | 27 |
| Lav 3 | 8 | 12 | 19 | 26 | 28 | 39 | 29 |
| Lav 4 | 7 | 10 | 16 | 24 | 26 | 37 | 28 |

Tabela 12. Índices de Clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 23 de novembro de 2021, na área de Mata, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 1,5 | 0,86 | 0,27 | 0,81 |

As Figuras 17 e 18 apresentam as mesmas áreas, também para a data de 23 de novembro de 2021, em composições de falsa cor. A Figura 17 é uma composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), da região do infravermelho próximo. Ela indica vegetação saudável na cor vermelha e áreas sem ou com pouca vegetação em tons de ciano. A Figura 18 também é uma composição em falsa cor, porém da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR). Nela, a vegetação saudável está na cor verde e áreas sem vegetação, ou com vegetação ainda não estabelecida, em tons arroxeados.

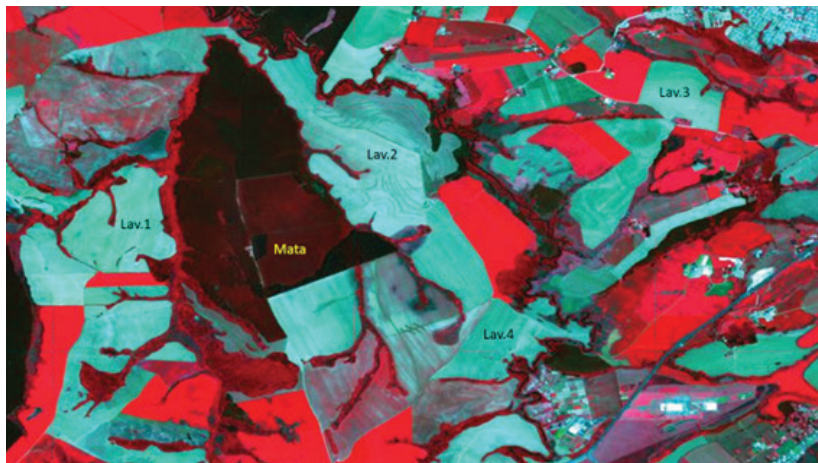


Figura 17. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8, 4, 3; NIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 23 de novembro de 2021.

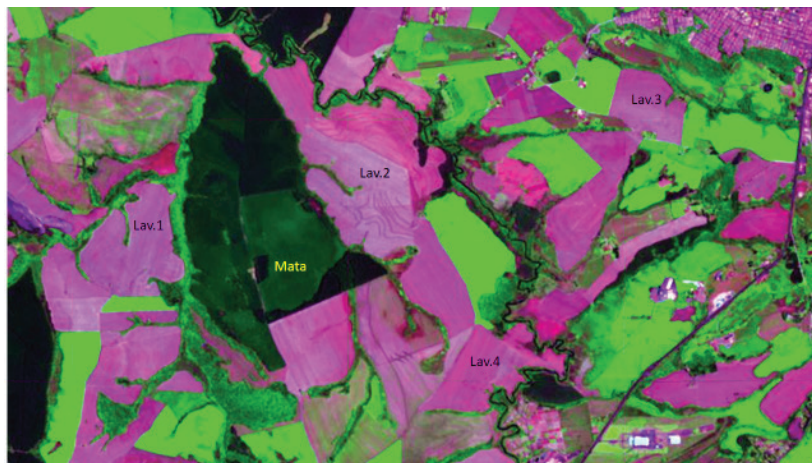


Figura 18. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12, 8A, 4; SWIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 23 de novembro de 2021.

Para a interpretação dos resultados, foi feita uma análise conjunta das imagens (Figuras 16 a 18) com os dados das Tabelas 11 e 12.

Na data de 23 de novembro de 2021, dentre as áreas estudadas, a única área visivelmente vegetada era a de Mata. Observando o espectro eletromagnético na região do visível, as reflectâncias podem ser consideradas normais, entre 2 a 3%, mostrando uma absorção de energia normal para a realização de fotossíntese. A região do NIR, onde a reflexão de energia é maior, os valores de 27 e 29% (Bandas 8 e 8A), apesar de haver variação entre espécies, também podem ser considerados normais. Por sua vez, as bandas do SWIR (11 e 12) apresentavam reflectâncias baixas, principalmente na Banda 12, indicando bom teor de água nas folhas. Pode-se dizer que a área de Mata estava em desenvolvimento vegetativo saudável, confirmado pelo verde das Figuras 16 e 18 e pelo vermelho da Figura 17. Pela Tabela 12 verifica-se que o índice de clorofila era mediano (1,5), mas o NDVI (0,86), o MSI (0,27) e o NDWI (0,81) encontravam-se dentro do esperado para uma vegetação em bom estado vegetativo.

As áreas denominadas Lav 1, Lav 2, Lav 3 e Lav4, na data de 23 de novembro, ainda não eram visíveis espectralmente, podendo estar em estádios muito iniciais de desenvolvimento ou ainda não ter ocorrido a semeadura, sendo portanto não visíveis nas Figuras 16 a 18. Nelas, pode-se dizer que, nesse momento, havia uma grande contribuição dos solos e das palhadas para a reflectância, sendo que as poucas plantas existentes ou a inexistência delas inutilizam cálculos dos índices de vegetação, que podem conter imprecisões e, por isso, os índices de clorofila e de vegetação não são apresentados na Tabela 12. Porém, as reflectâncias dos solos e a ausência de vegetação sugerem que as datas de semeadura ocorreram entre meados de outubro e o início de dezembro.

Região Sul: Data de 28 de dezembro de 2021

Na sequência são apresentadas imagens orbitais para a data de 28 de dezembro de 2021. A Figura 19 é um recorte da composição colorida (RGB 4, 3, 2) das áreas em estudo, agora para a data de 28 de dezembro de 2021. Para elas as reflectâncias obtidas e os índices vegetativos são apresentados nas Tabelas 13 e 14.

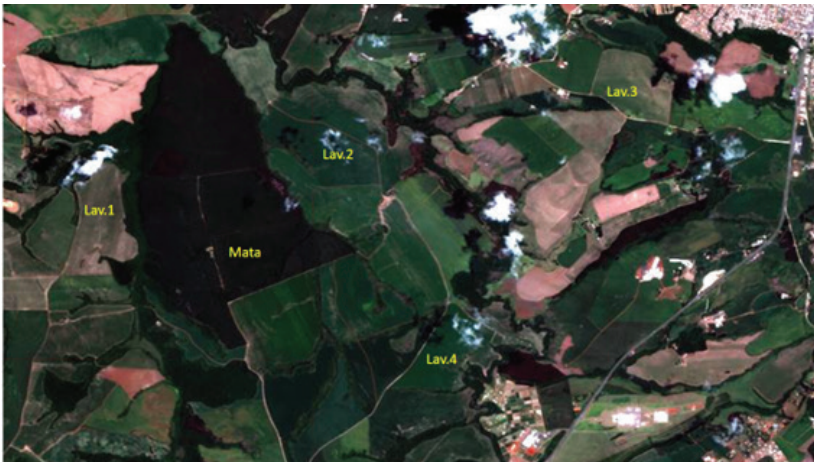


Figura 19. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4, 3, 2), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 28 de dezembro de 2021.

A Tabela 13 reúne para cada área selecionada, as reflectâncias de sete bandas do satélite Sentinel 2. As reflectâncias apresentadas na Tabela 13 foram obtidas num momento em que todas as áreas estavam verdes e em pleno desenvolvimento vegetativo.

Os resultados dos cálculos dos índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, nas áreas em estudo, na data de 28 de dezembro de 2021 estão na Tabela 14.

Tabela 13. Reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 28 de dezembro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 1 | 3 | 1 | 26 | 29 | 7 | 2 |
| Lav 1 | 3 | 6 | 5 | 35 | 37 | 23 | 12 |
| Lav 2 | 2 | 4 | 2 | 56 | 58 | 22 | 10 |
| Lav 3 | 4 | 7 | 6 | 41 | 43 | 29 | 16 |
| Lav 4 | 2 | 5 | 2 | 57 | 61 | 24 | 11 |

Tabela 14. Índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 28 de dezembro de 2021, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 3,00 | 0,93 | 0,24 | 0,87 |
| Lav 1 | 1,13 | 0,74 | 0,61 | 0,51 |
| Lav 2 | 2,00 | 0,93 | 0,38 | 0,71 |
| Lav 3 | 1,16 | 0,73 | 0,67 | 0,47 |
| Lav 4 | 2,67 | 0,93 | 0,39 | 0,69 |

As Figuras 20 e 21 apresentam as mesmas áreas, também para a data de 28 de dezembro de 2021, em composições de falsa cor. A Figura 20 é uma composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), da região do infravermelho próximo. A Figura 21 também é uma composição em falsa cor, porém da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR).

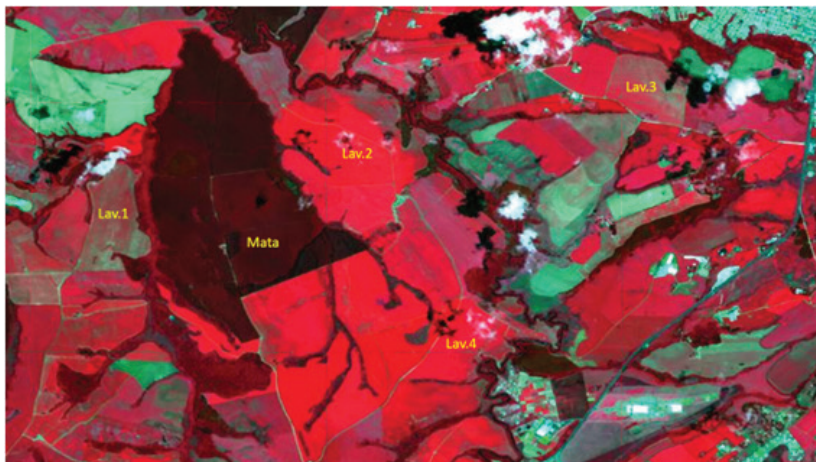


Figura 20. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8, 4, 3; NIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 28 de dezembro de 2021.

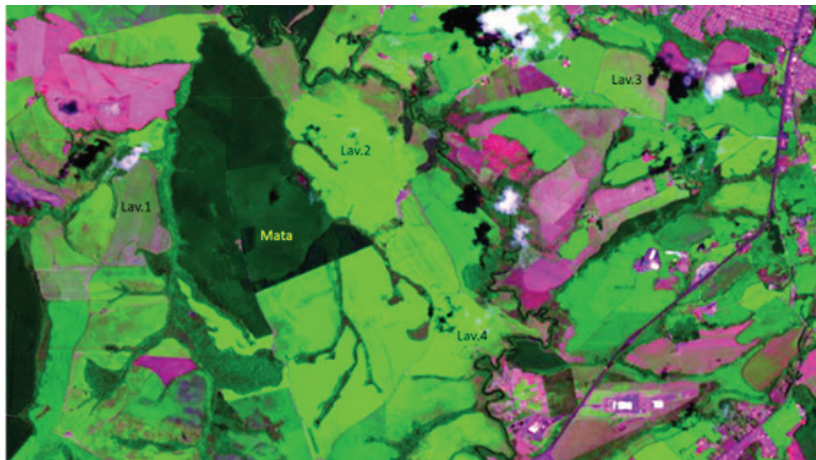


Figura 21. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12, 8A, 4; SWIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 28 de dezembro de 2021.

Para a interpretação dos resultados, foi feita uma análise conjunta das imagens (Figuras 19 a 21) com os dados das Tabelas 13 e 14.

Em 28 de dezembro de 2021, a área de Mata, apresentava reflectâncias relativamente baixas no visível, indicando boas condições para a realização da fotossíntese. Na banda 8, a reflectância de 26%, aparentemente é normal para as espécies que compõem a mata. Além disso, a baixa reflectância na banda 12 (2%), indica bom teor de água nas folhas. Os índices de vegetação sugerem plantas saudáveis, com alto índice de clorofila (3), alto NDVI (0,93) mostrando boa densidade da vegetação e MSI e NDWI (0,24 e 0,87) confirmando não haver estresses para as plantas.

As áreas das lavouras (Lav 1, Lav 2, Lav 3, Lav 4) podem ser divididas em duas análises. Todas as áreas foram semeadas aproximadamente entre meados de outubro e o início de dezembro de 2021. No entanto, as próprias imagens das Figuras 19 a 21 indicam que a Lav 2 e a Lav 4 foram semeadas antes da Lav 1 e a Lav 3, provavelmente entre meados de outubro e início de novembro. Elas ainda não aparecem na imagem de 23 de novembro, porém em 28 de dezembro já estão bem estabelecidas. Para Lav 2 e Lav 4, as reflectâncias no campo do visível indicavam um bom desenvolvimento das plantas, com baixa reflectância nas bandas 2 e 4 e um pouco mais elevada na banda 3. Isso indicava um desenvolvimento saudável das plantas e boas condições para a fotossíntese. As reflectâncias do NIR mostravam plantas com um desenvolvimento normal, sendo superiores àquelas da Mata. O mesmo aconteceu com as reflectâncias do SWIR. Os índices de vegetação confirmavam o bom desenvolvimento das plantas, com a clorofila mostrando índice de 2,00 e 2,67 (médio a alto), alto NDVI (0,93 e 0,93), bom MSI (0,38 e 0,39) e bom NDWI (0,71 e 0,69). Nesta data de 28 de dezembro, as áreas Lav 1 e Lav 3, por sua vez, encontravam-se ainda em evolução e estabelecimento. No campo do visível, as reflectâncias do azul (3 e 4%) estavam num nível normal, embora a reflectância do vermelho (5 e 6%) estivessem ligeiramente acima daquilo que seria o ótimo. As bandas do NIR ainda davam um desenvolvimento normal, acima das da Mata e inferiores àquelas das Lav 2 e Lav 4. As reflectância do SWIR, notadamente

a da banda 12 (12 e 16%) ainda eram altas indicando uma possível limitação de água nas folhas. Pelas imagens das Figuras 19, 20 e 21 é possível perceber que essas áreas ainda não estavam bem estabelecidas, uma vez que, provavelmente tenham sido semeadas no final de novembro ou no início de dezembro. Assim, em 28 de dezembro o seu desenvolvimento vegetativo ainda estava incompleto. Provavelmente as reflectâncias desse momento ainda tenham um significativo efeito dos solos. Os índices de vegetação são característicos de uma vegetação ainda em formação. Os índices de clorofila são ainda baixos (1,13 e 1,16), o NDVI em evolução (0,74 e 0,73) e o MSI e o NDWI ainda intermediários (0,61 e 0,67; 0,51 e 0,47), para Lav 1 e Lav 3, respectivamente.

Região Sul: Data de 11 de fevereiro de 2022

Na sequência são apresentadas imagens orbitais para a data de 11 de fevereiro de 2022. A Figura 22 é um recorte da composição colorida (RGB 4, 3, 2) das áreas em estudo, agora para a data de 11 de fevereiro de 2022. As reflectâncias obtidas e os índices vegetativos são apresentados nas Tabelas 15 e 16.



Figura 22. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4, 3, 2), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 11 de fevereiro de 2022.

A Tabela 15 reúne as reflectâncias de 7 bandas do satélite Sentinel 2 para as áreas selecionadas, abrangendo a radiação do espectro eletromagnético (REM) do visível ao infravermelho de ondas curtas (SWIR).

Tabela 15. Reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 11 de fevereiro de 2022, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 2 | 4 | 2 | 31 | 31 | 9 | 3 |
| Lav 1 | 2 | 4 | 2 | 57 | 61 | 22 | 9 |
| Lav 2 | 2 | 4 | 2 | 59 | 62 | 24 | 10 |
| Lav 3 | 2 | 4 | 2 | 59 | 62 | 27 | 11 |
| Lav 4 | 2 | 4 | 2 | 59 | 62 | 23 | 10 |

A Tabela 16 apresenta os resultados dos cálculos dos índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI.

Tabela 16. Índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 11 de fevereiro de 2022, obtidas pelo Google Earth Engine, na Mata, nas lavouras de sequeiro 1 e 2 e no Pivô Esquerdo e Direito, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 2,0 | 0,88 | 0,29 | 0,82 |
| Lav 1 | 1,8 | 0,93 | 0,36 | 0,74 |
| Lav 2 | 2,0 | 0,93 | 0,39 | 0,72 |
| Lav 3 | 2,0 | 0,93 | 0,43 | 0,69 |
| Lav 4 | 2,0 | 0,93 | 0,37 | 0,72 |

As Figuras 23 e 24 apresentam as mesmas áreas, para a data de 11 de fevereiro de 2022, em composições de falsa cor. A Figura 23 é uma composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), da região do infravermelho próximo. A Figura 24 é uma composição em falsa cor, da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR).

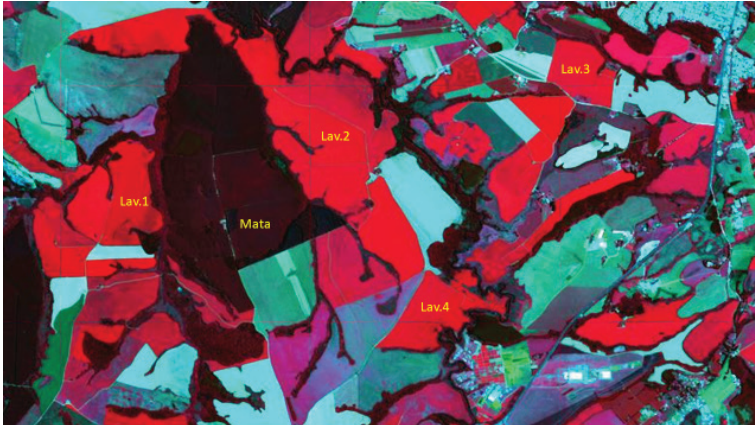


Figura 23. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8,4,3; NIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 11 de fevereiro de 2022.

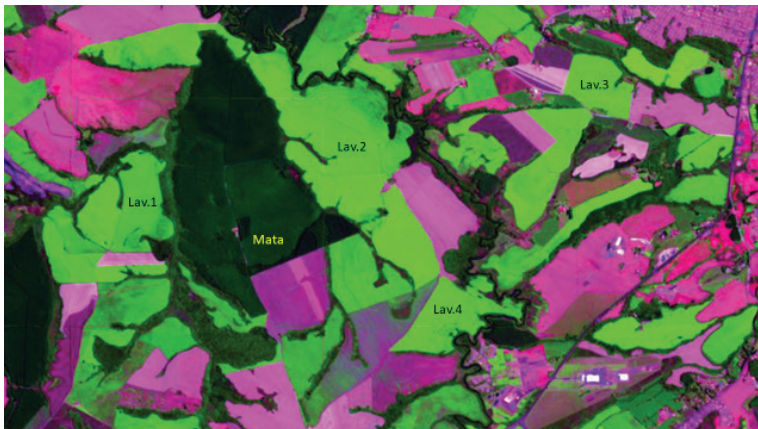


Figura 24. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12, 8A, 4; SWIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 11 de fevereiro de 2022.

Para a interpretação dos resultados, foi feita uma análise conjunta das imagens orbitais das Figuras 22 a 24 com os dados das Tabelas 15 e 16.

Em 11 de fevereiro de 2022, a área de Mata, apresentava reflectâncias baixas no visível, características de plantas em boas condições para a realização da fotossíntese. Nas bandas do NIR, as reflectâncias indicaram um ligeiro aumento em comparação com a data anterior, continuando num patamar inferior em relação às demais áreas, provavelmente em função das espécies características que compõem a Mata. As baixas reflectâncias do SWIR, principalmente a da banda 12 (3%) indicam um bom teor de água nas folhas. As plantas continuavam saudáveis, porém houve uma redução no índice de clorofila, que caiu para 2 e no NDVI, que teve uma pequena queda para 0,88. O MSI (0,29) e o NDWI (0,82) ainda mostravam não haver estresses para as plantas.

Todas as áreas das lavouras (Lav. 1, Lav. 2, Lav. 3, Lav. 4) estavam, nesse momento, em bom estado de desenvolvimento. Na Figura 21, da composição do visível, é possível observar que todas elas tinham um verde intenso. O mesmo aconteceu com o vermelho do NIR (Figura 22) e com o verde do SWIR (Figura 23). As reflectâncias do visível apresentavam características de um bom desempenho das reações de fotossíntese, e sem estresses, com valores de 2% na banda 3 (azul) e na banda 4 (vermelho), com reflectância de 4% na banda 3 (verde). Na região do NIR, principalmente na banda 8, a reflectância de 57% (Lav. 1) e de 59% (Lav. 2, Lav. 3 e Lav. 4), indicavam um desenvolvimento normal para todas essas áreas. Na região do SWIR, principalmente na banda 12, mostravam-se ainda ligeiramente altas (de 9 a 11%), sendo que o ideal seria num nível ao redor de 6% ou menor. A clorofila apresentava níveis de médios a altos (1,83 e 2), os NDVI altos (todos em 0,93), os MSI relativamente baixos, portanto bons (de 0,36 a 0,43) e NDWI também com bom nível, variando de 0,69 na Lav. 4 e 0,74 na Lav. 1.

Região Sul: Data de 26 de fevereiro de 2022

Na sequência são apresentadas imagens orbitais para a data de 26 de fevereiro de 2022. A Figura 25 é um recorte da composição colorida (RGB 4, 3, 2) das áreas em estudo, agora para a data de 26 de fevereiro de 2022. Para elas as reflectâncias obtidas e os índices vegetativos são apresentados nas Tabelas 17 e 18.

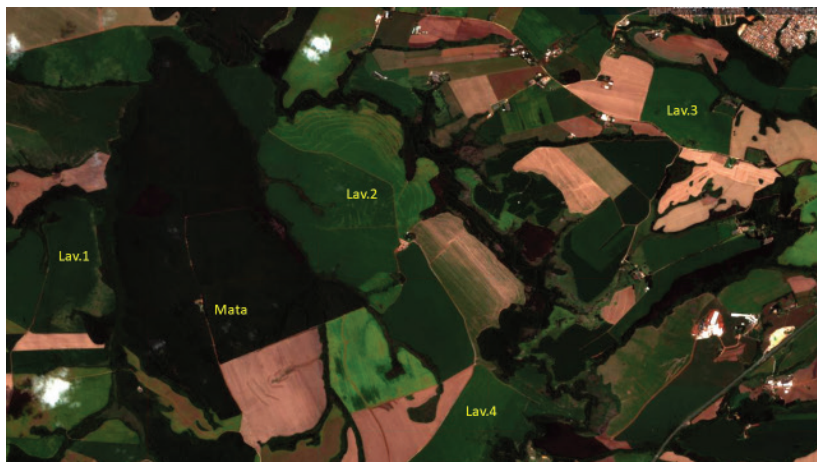


Figura 25. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4, 3, 2), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 26 de fevereiro de 2022.

A Tabela 17 reúne as reflectâncias de 7 bandas do satélite Sentinel 2 para as áreas selecionadas, abrangendo a radiação do espectro eletromagnético (REM) do visível ao infravermelho de ondas curtas (SWIR).

A Tabela 18 apresenta os resultados dos cálculos dos índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, nas áreas de estudo, na data de 26 de fevereiro de 2022.

Tabela 17. Reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 26 de fevereiro de 2022, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 2 | 3 | 2 | 25 | 26 | 7 | 2 |
| Lav 1 | 2 | 4 | 2 | 49 | 51 | 19 | 8 |
| Lav 2 | 2 | 5 | 2 | 51 | 53 | 23 | 10 |
| Lav 3 | 2 | 5 | 2 | 49 | 52 | 23 | 10 |
| Lav 4 | 3 | 6 | 3 | 43 | 46 | 22 | 10 |

Tabela 18. Índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 26 de fevereiro de 2022, obtidas pelo Google Earth Engine, na Mata, nas lavouras de sequeiro 1 e 2 e no Pivô Esquerdo e Direito, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 1,5 | 0,85 | 0,27 | 0,86 |
| Lav 1 | 2,0 | 0,92 | 0,37 | 0,73 |
| Lav 2 | 2,5 | 0,92 | 0,43 | 0,68 |
| Lav 3 | 2,5 | 0,92 | 0,44 | 0,68 |
| Lav 4 | 2,0 | 0,87 | 0,48 | 0,64 |

As Figuras 26 e 27 apresentam as mesmas áreas, para a data de 26 de fevereiro de 2022, em composições de falsa cor. A Figura 26 é uma composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), da região do infravermelho próximo. A Figura 27 é uma composição em falsa cor, da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR).

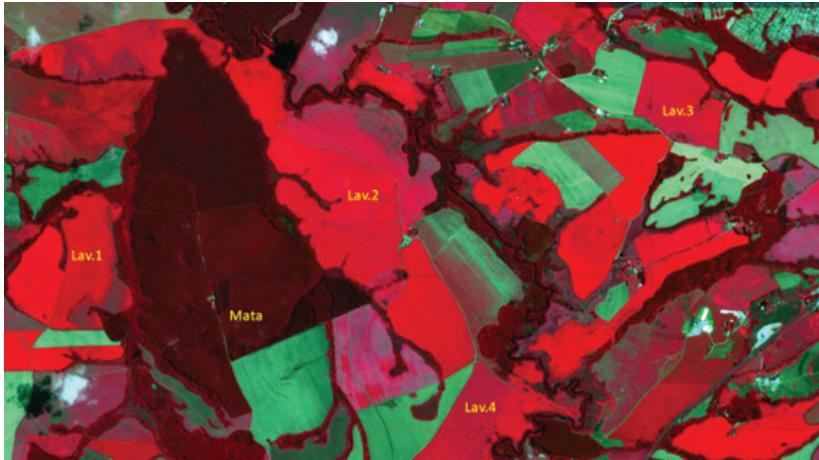


Figura 26. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8, 4, 3; NIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 26 de fevereiro de 2022.



Figura 27. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12, 8A, 4; SWIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 26 de fevereiro de 2022.

Para a interpretação dos resultados, foi feita uma análise conjunta das imagens orbitais das Figuras 25 a 27 com os dados das Tabelas 17 e 18.

Em 26 de fevereiro de 2022, a área de Mata, continuava a apresentar reflectâncias baixas no visível e boas condições para a realização da fotossíntese. As reflectâncias do NIR continuavam nos mesmos patamares das datas anteriores, continuando inferiores às áreas agrícolas, provavelmente em função de características das espécies de mata. As reflectâncias do SWIR, principalmente a da banda 12 (2%) continuava indicando grande absorção de energia pela água, característica de bons teores de água nas folhas. Houve uma redução ainda maior do índice de clorofila, que caiu para 1,5 enquanto o NDVI teve uma ligeira queda para 0,85. O MSI (0,27) e o NDWI (0,85) continuavam mostrando não haver estresses para as plantas.

Todas as áreas das lavouras (Lav. 1, Lav. 2, Lav. 3, Lav. 4) continuavam, ainda nesse momento e em primeira análise, em bom estado de desenvolvimento. Na Figura 25, da composição colorida é possível observar que todas elas ainda estavam bem verdes. O mesmo pode ser confirmado pelo vermelho do NIR (Figura 26) e o verde do SWIR (Figura 27). As reflectâncias do visível continuavam baixas, dentro do esperado, portanto possibilitando boas condições para a realização de fotossíntese. Na região do NIR, no entanto, principalmente na banda 8, no geral as reflectâncias caíram para níveis entre 43% (Lav. 4) e 51% (Lav. 2), mostrando um indício de diminuição da densidade das plantas. Na região do SWIR, principalmente na banda 12, as reflectâncias mostravam-se ligeiramente altas (em torno de 10%), anunciando sinais de início de desidratação das folhas. A clorofila ainda apresentava níveis de médios a altos (2 a 2,5), os NDVI continuando altos (0,92 para Lav. 1, Lav. 2 e Lav. 3 e 0,87 para Lav. 4), os MSI mais altos que na data anterior (de 0,37 a 0,48) e NDWI um pouco mais baixos, variando de 0,64 na Lav. 4 e 0,73 na Lav.1. Isso indica que a disponibilidade hídrica havia diminuído em comparação com a data anterior.

Região Sul: Data de 5 de março de 2022

Na sequência são apresentadas imagens orbitais para a data de 5 de março de 2022. A Figura 28 é um recorte da composição colorida (RGB 4, 3, 2) das áreas em estudo, agora para a data de 5 de março de 2022. Para elas as reflectâncias obtidas e os índices vegetativos são apresentados nas Tabelas 19 e 20.

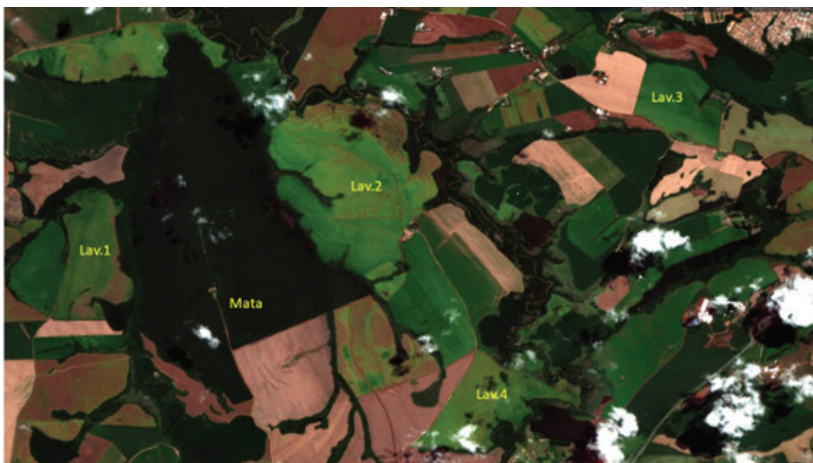


Figura 28. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em cor natural (RGB 4, 3, 2), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 05 de março de 2022.

A Tabela 19 reúne as reflectâncias de 7 bandas do satélite Sentinel 2 para as áreas selecionadas, abrangendo a radiação do espectro eletromagnético (REM) do visível ao infravermelho de ondas curtas (SWIR).

A Tabela 20 apresenta os resultados dos cálculos dos índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, na região de estudo, na data de 5 de março de 2022.

Tabela 19. Reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 05 de março de 2022, obtidas pelo Google Earth Engine, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Reflectâncias (%) | | | | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|
| | Banda 2 (azul) | Banda 3 (verde) | Banda 4 (vermelho) | Banda 8 (NIR) | Banda 8A (NIR) | Banda 11 (SWIR) | Banda 12 (SWIR) |
| Mata | 2 | 3 | 2 | 27 | 30 | 9 | 3 |
| Lav 1 | 4 | 9 | 6 | 36 | 40 | 20 | 10 |
| Lav 2 | 4 | 11 | 8 | 40 | 46 | 21 | 11 |
| Lav 3 | 3 | 9 | 4 | 40 | 45 | 23 | 11 |
| Lav 4 | 4 | 11 | 7 | 39 | 42 | 23 | 12 |

Tabela 20. Índices de clorofila, NDVI, MSI e NDWI, calculados com reflectâncias de áreas agrícolas, em um recorte de imagem do satélite Sentinel 2, de 05 de março de 2022, obtidas pelo Google Earth Engine, na Mata, nas lavouras de sequeiro 1 e 2 e no Pivô Esquerdo e Direito, na região de Carambeí, PR.

| Área de estudo | Índices | | | |
|----------------|-----------|------|------|------|
| | Clorofila | NDVI | MSI | NDWI |
| Mata | 1,50 | 0,86 | 0,30 | 0,82 |
| Lav 1 | 1,50 | 0,71 | 0,50 | 0,60 |
| Lav 2 | 1,38 | 0,67 | 0,46 | 0,61 |
| Lav 3 | 2,25 | 0,82 | 0,51 | 0,61 |
| Lav 4 | 1,57 | 0,70 | 0,55 | 0,56 |

As Figuras 29 e 30 apresentam as mesmas áreas, para a data de 5 de março de 2022, em composições de falsa cor. A Figura 29 é uma composição em falsa cor (RGB 8, 4, 3, NIR), da região do infravermelho próximo. A Figura 30 é uma composição em falsa cor, da região do infravermelho de ondas curtas (RGB 12, 8A, 4, SWIR).

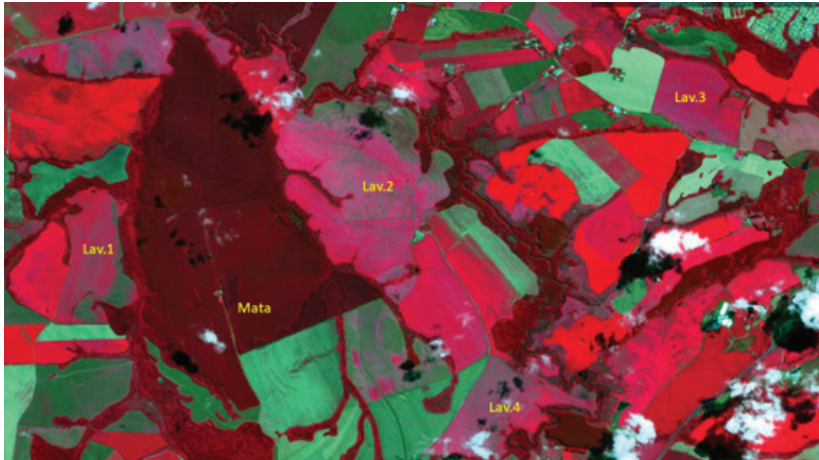


Figura 29. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 8, 4, 3; NIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 05 de março de 2022.



Figura 30. Recorte de imagem do satélite Sentinel 2, em falsa cor (RGB 12, 8A, 4; SWIR), em áreas de agricultura na região de Carambeí, sul do Paraná, em 05 de março de 2022.

Para interpretação dos dados, foi feita uma análise conjunta das imagens orbitais das Figuras 28 a 30 com os dados das Tabelas 19 e 20.

Em 05 de março de 2022, a área de Mata, continuava a apresentar reflectâncias baixas no visível e boas condições para a realização da fotossíntese. As reflectâncias do NIR continuavam nos mesmos patamares das datas anteriores, continuando inferiores às áreas agrícolas, mantendo-se estáveis. As reflectâncias do SWIR, principalmente a da banda 12 (3%) continuava baixa, indicando boa absorção de energia, indicando bons teores de água nas folhas. O índice de clorofila manteve-se igual à data anterior (1,5), enquanto o NDVI não teve alterações significativas (0,86). O MSI (0,30) e o NDWI (0,82) continuavam mostrando não haver problemas hídricos para as plantas.

As áreas das lavouras (Lav. 1, Lav. 2, Lav. 3, Lav. 4) a partir deste momento mostravam uma redução dos seus níveis de verde. Na Figura 28, da composição colorida é possível observar que elas já apresentavam um amarelecimento, contrastando com o verde 26 de fevereiro. A queda da intensidade do vermelho do NIR (Figura 29) e do verde do SWIR (Figura 30) confirmam esta redução. As reflectâncias do visível estavam alteradas, com aumento significativo na faixa vermelha do espectro eletromagnético (banda 4), principalmente na Lav. 1, na Lav. 2 e na Lav. 4, com exceção da Lav. 3. Isso explica diminuições dos índices de clorofila apresentados na Tabela 20. Os NDVI destas áreas caíram para valores entre 0,67 e 0,71, também com exceção da Lav. 3, que ainda tinha um NDVI de 0,82. Na região do NIR, principalmente na banda 8, no geral as reflectâncias caíram ainda mais em comparação com a data anterior, para níveis entre 36% (Lav. 1) e 40% (Lav. 2), com diminuição da densidade das plantas. Na região do SWIR, principalmente na banda 12, as reflectâncias tornaram-se mais altas, principalmente na Lav. 2 e Lav. 3 (11%) e na Lav. 4 (12%), indicando uma vegetação com sinais de desidratação. A elevação dos MSI, para a faixa de 0,46 a 0,55 e a diminuição do NDWI para a faixa de 0,56 a 0,61 confirmam essa limitação hídrica.

Todas as áreas das lavouras (Lav. 1, Lav. 2, Lav. 3, Lav. 4) evoluíram para o seu final de ciclo, tendo sido colhidas em, aproximadamente, entre o final de março e a primeira quinzena de abril de 2022.

A Figura 31 ilustra a evolução do NDVI durante os períodos estudados, na região sul, município de Carambeí – PR, desde novembro 2021 até março de 2022.

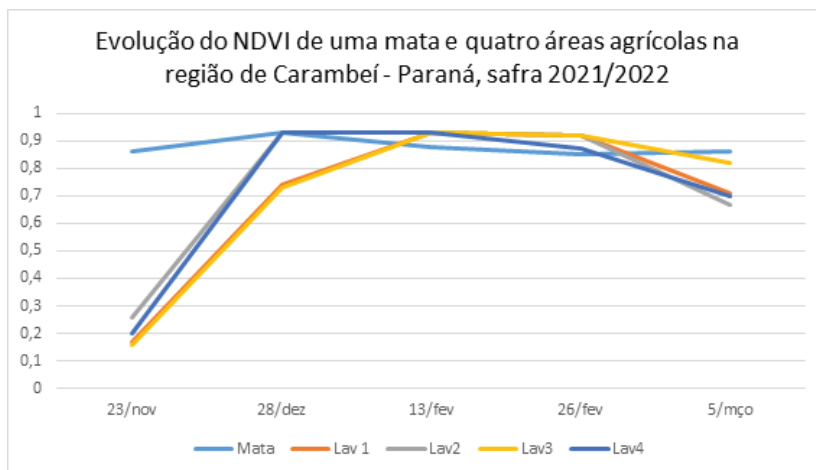


Figura 31. Evolução do índice de vegetação NDVI, em cinco diferentes datas, de outubro de 2021 a janeiro de 2022, em cinco áreas vegetadas da região de Carambeí, sul do Paraná, na safra agrícola de 2021/2022.

A sequência dos NDVI (Figura 31) para as áreas agrícolas revelou que após as emergências das lavouras o seu desenvolvimento vegetativo foi normal e a evolução foi gradativa. O NDVI manteve-se alto durante longos períodos, demonstrando densidade adequada de plantas, baixos níveis de estresses, mantendo plantas saudáveis, condição necessária para bons rendimentos. Pode-se dizer, que nesta região, as condições para o desenvolvimento de lavouras agrícolas, na safra 2021/2022 foi praticamente normal. Aconteceu um pequeno período de estresse hídrico principalmente entre o terceiro decêndio de novembro e o segundo decêndio de dezembro (Figura 14), com ligeira elevação do DPV, o que pode ter causado pequenos

estresses hídricos em lavouras em momentos críticos. A realidade de campo mostrou que as produtividades foram boas. Segundo Paraná ([2024b]), na região Sul a produtividade da soja foi de 3364 Kg/ha, 8% menor que na safra anterior, enquanto que a do milho foi de 7586 Kg/ha, 13% menor que a safra anterior.

Considerações finais

Este trabalho buscou unir conhecimentos de agrometeorologia e de sensoriamento remoto orbital para a caracterização e interpretação de condições ambientais de áreas agrícolas e suas consequências na produtividade das lavouras. A safra de 2021/2022 apresentou irregularidades na distribuição de chuvas, produzindo grandes adversidades para culturas agrícolas em regiões do sul do Brasil. As duas regiões estudadas, o oeste e o sul do Paraná, com grandes contrastes com relação às condições para o desenvolvimento vegetativo de plantas. Como já foi destacado, a região oeste teve um grande período seco, entre novembro de 2021 e fevereiro de 2022, com balanço hídrico e déficit de pressão de vapor altamente desfavoráveis para as plantas, consequentemente as áreas agrícolas tiveram produtividade de lavouras baixíssimas. A região sul, por sua vez, mostrou boas condições ambientais para as lavouras, com um balanço hídrico e déficit de pressão de vapor mais favoráveis que na região oeste. Como consequência, as produtividades das lavouras foram boas, apesar de uma ligeira redução de produtividade com relação à safra anterior, de 2020/2021.

As imagens orbitais, obtidas exclusivamente do satélite Sentinel 2, apesar de limitações, foram extremamente úteis para a interpretação e caracterização do problema enfocado, no caso, a seca. Na região oeste, durante todo o período seco, a disponibilidade de imagens foi grande, devido à pouca presença de nuvens no período. O mesmo não ocorreu na região sul, uma vez que, com a ocorrência de chuvas

sendo praticamente normais, muitas imagens não puderam ser usadas em função da presença de nuvens.

O ponto central para o entendimento e diferenciação de áreas estressadas e não estressadas foi o uso das reflectâncias dos alvos estudados. As bandas do satélite escolhidas, abrangeram partes do espectro eletromagnético, do visível ao SWIR, que possibilitassem estudos de estresses e possibilitassem cálculos de índices de vegetação. Quando se analisa as bandas do visível, é possível detectar mudanças nas reflectâncias que ocorrem devido a estresses, os mais variados. A clorofila é um pigmento fundamental para as plantas na realização da fotossíntese, absorvendo energia no azul e no vermelho e refletindo no verde. Quando ocorrem estresses, como por exemplo os das secas, a produção de clorofila pode ser reduzida, ocorrendo mudanças significativas nas reflectâncias do visível. Neste caso a reflectância do vermelho aumenta muito, sendo que o normal é ocorrer baixas reflectâncias no azul e no vermelho e um pouco mais alta no verde. Nas áreas da região oeste, representada pelo município de Palotina, apenas a área de Mata teve reflectâncias normais na região do visível. Nas áreas do sul, representadas por Carambeí, sem estresses muito significativos, todas as áreas apresentaram reflectâncias no visível correspondentes a vegetação saudável.

Outro ponto importante é a reflectância do NIR (bandas 8 e 8A), que são influenciadas pela estrutura foliar e conteúdo de água nas plantas, sendo que plantas saudáveis refletem mais no NIR. De modo geral elas foram menores nas áreas do oeste. Além disso elas têm importância no cálculo do NDVI, sendo que se elas forem baixas o NDVI cai, indicando redução na densidade da vegetação. A reflectância do SWIR é uma faixa do espectro eletromagnético muito sensível ao conteúdo de água nas folhas, indicando que quanto maior o conteúdo de água nas folhas menor é a reflectância no SWIR. No presente trabalho, na região oeste, de modo geral, com os estresses observado as reflectâncias do SWIR mais elevadas que aquelas verificadas na região sul.

Os índices de vegetação calculados a partir das reflectâncias foram úteis para o entendimento e compreensão dos possíveis

problemas que estavam ocorrendo com as plantas. No entanto, os cálculos devem ser efetuados apenas a partir do momento em que as plantas já estão bem estabelecidas no campo, em função da forte interferência dos solos na obtenção das reflectâncias. Essas, nos momentos iniciais de estabelecimento das lavouras, indicam a cobertura dos solos que são importantes para a definição de épocas de semeadura. Outro ponto a ser destacado é a importância do DPV. Na região oeste, em função da época de semeadura ter ocorrido um pouco mais cedo, tornou o mês de dezembro um momento muito crítico com relação à frutificação das plantas. Entre dezembro e o início de janeiro, o DPV médio foi superior a 1,5. Considerando a cultura da soja, segundo Gonçalves et al. (2024), nestas condições, as produtividades estimadas ficam em torno de 1329 kg/ha, não muito acima dos 922 kg/ha de produtividade média obtida na região (Paraná, [2024b]), indicando que quando o DPV é alto nos períodos críticos a produtividade tende a cair. Para a região sul, com semeadura um pouco mais tarde, o DPV médio de dezembro e janeiro foi de aproximadamente 0,56, possibilitando uma estimativa de 3265 kg/ha, bem próximo da realidade obtida no campo que foi de 3364 kg/ha.

Referências

BAPTISTA, G. M. de M. **Sensoriamento Remoto Hiperespectral: o novo paradigma nos estudos de solos tropicais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2019. 204 p.

CONAB. Cultivos de verão: safra 2021/22. **Boletim de monitoramento agrícola**, v. 11, n. 2, fev. 2022. 20 p. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/monitoramento-agricola/item/download/41300_83d0685cbc6950962a8301d71ada2672. Acesso em: 13 maio 2024..

DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.;

MEYGRET, A.; SPOTO, F.; MARCHESE, F.; BARGELLINI, P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote Sensing of Environment**, v. 120, p. 25-36, 2012. DOI: 10.1016/j.rse.2011.11.026.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. A. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 285 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, n. 3, p. 257-266, 1996. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

GAO, B. C.; HEIDEBRECHT, K. B.; GOETZ, A. F. H. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2-3, p. 165-178, 1993. DOI: 10.1016/0034-4257(93)90014-0.

GONÇALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B.; CRUSIOL, L. G. T.; SIBALDELLI, R. N. R.; NEUMAIER, N. **Déficit de pressão de vapor (DPV) como referência de produtividade em soja - primeira aproximação**. Londrina: Embrapa Soja, 2024. 9 p. (Embrapa Soja. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 31).

GONÇALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B.; SIBALDELLI, R. N. R. **Eventos climáticos adversos e seus impactos para as culturas de soja, milho e trigo no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2019. 48 p. (Embrapa Soja. Documentos, 420).

GOOGLE EARTH ENGINE. **Google Earth Engine code editor**. [2024]. Disponível em: code.earthengine.google.com. Acessos em: 21 fev. 2021 a 10 mar. 2022.

HA, N. T. T.; THAO, N. T. P.; KOIKE, K.; NHUAN, M. T. Selecting the best band ratio to estimate chlorophyll-a concentration in a tropical freshwater lake using Sentinel 2A images from a case study of Lake Ba Be (Northern Vietnam). **International Journal of Geo-Information**, v. 6, 290, 2017. DOI: 10.3390/ijgi6090290.

HUNT JR., E. R.; ROCK, B. N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 30, n. 1, p. 43-54, 1989. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90046-1.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Boletins agroclimatológicos**: 2021 e 2022. [2024a]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/boletinsagro>. Acesso em: 13 maio 2024.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações automáticas**. [2024b]. Disponível em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Acesso em: 13 maio 2024.

LAND VIEWER. **Earth Observing System**. [2021]. Disponível em: <https://eos.com/landviewer/>. Acessos em: 21 fev. 2021 a 10 mar. 2022.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de; BAPTISTA, G. M. de M. (ed.). **Reflectância dos materiais terrestres**: análise e interpretação. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 334 p.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Climate Prediction Center / NCEP. **ENSO**: Recent Evolution, Current Status and Predictions. 28 fev. 2022. Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf?lv=true. Acesso em: 22 mar. 2022.

PARANÁ. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Departamento de Economia Rural (DERAL). **Estimativas de safra**: quadros 2022. [2024a]. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/safra>. Acesso em: 22 mar. 2022.

PARANÁ. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Departamento de Economia Rural (DERAL). **Estimativas de safra**: quadros 2023. [2024b]. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/safra>. Acesso em: 20 out. 2023.

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

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de culturas e de produtividade real e potencial. **Revista de Agrometeorologia**, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings...** Washington, DC: NASA, 1974. v. 1, p. 309-317.

SAMPAIO, D. M. **Modelagem orbital e monitoramento remoto de clorofila, sólidos suspensos e densidade celular de Ceratium na Barragem Santa Bárbara, Pelotas, RS**. 2023. 90 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

TETENS, O. Über einige meteorologische Begriffe. **Zeitschrift für Geophysik**, v. 6, n. 1, p. 297-309, 1930.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology).

TUCKER, C. J.; ELGIN JR., J. H.; MCMURTREY III, J. E. Temporal-spectral measurements of corn and soybean crops. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 45, n. 5, p. 643-653, 1979.

Anexo 1. Coordenadas geográficas e altitude média dos municípios do Paraná, com estação meteorológica do INMET, cujos dados foram utilizados para cálculos de balanço hídrico regional.

| Local | Latitude | Longitude | Altitude municipal (m) | Região |
|-------------------------|----------|-----------|------------------------|----------------|
| Campo Bonito | -25.10 | -52.59 | 687 | Oeste |
| Campo Mourão | -24.02 | -52.22 | 630 | Centro |
| Castro | -24.78 | -49.99 | 994 | Sul |
| Clevelândia | -26.41 | -52.34 | 966 | Sudoeste |
| Cidade Gaúcha | -23.35 | -52.93 | 366 | Noroeste |
| Colombo | -25.32 | -49.15 | 950 | Sul |
| Diamante do Norte | -22.63 | -52.89 | 368 | Noroeste |
| Dois Vizinhos | -25.69 | -53.09 | 546 | Sudoeste |
| Foz do Iguaçu | -25.60 | -54.48 | 235 | Oeste |
| Francisco Beltrão | -26.04 | -53.03 | 571 | Sudoeste |
| General Carneiro | -26.39 | -51.35 | 1009 | Sul |
| Goioerê | -24.15 | -53.01 | 505 | Oeste |
| Guaíra | -24.07 | -54.25 | 245 | Oeste |
| Icaraíma | -23.39 | -53.63 | 381 | Noroeste |
| Inácio Martins | -25.56 | -51.07 | 1208 | Sul |
| Irati | -25.50 | -50.63 | 881 | Sul |
| Marechal Cândido Rondon | -24.53 | -54.01 | 392 | Oeste |
| Maringá | -23.4 | -51.93 | 549 | Norte/Noroeste |
| Paranapoema | -22.65 | -52.13 | 309 | Noroeste/Norte |
| Planalto | -25.72 | -53.74 | 399 | Sudoeste |
| Ramilândia | -25.11 | -54.04 | 550 | Oeste |

Fonte: INMET ([2024b]).

