

Londrina, PR / Agosto, 2026

Elevado NDVI não garante alta produtividade em soja: evidências da influência do Déficit de Pressão de Vapor (DPV) e do estado hídrico da cultura

Sergio Luiz Gonçalves⁽¹⁾, José Renato Bouças Farias⁽²⁾, Luís Guilherme Teixeira Crusiol⁽³⁾, Giovani Veronezzi⁽⁴⁾, Gabriela Santos Arruda de Lima⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR. ⁽²⁾ Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR. ⁽³⁾ Geógrafo, doutor em Agronomia, pesquisador visitante, bolsista FAPED/Embrapa Soja, Londrina, PR. ⁽⁴⁾ Biólogo, especialista em Bioquímica Aplicada, Londrina, PR. ⁽⁵⁾ Graduada em Geoprocessamento e geógrafa, doutora em Geografia, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Resumo – O presente trabalho comparou índices de vegetação de duas safras de soja. A primeira (2023/2024) apresentou produtividade municipal média relativamente baixa, em decorrência da deficiência hídrica, enquanto a segunda (2025/2026) registrou produtividade considerada normal. Os índices de vegetação foram obtidos, considerando que, no espectro eletromagnético (REM), as reflectâncias dos comprimentos de onda da região do visível (principalmente da banda do vermelho), do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR) permitem o cálculo desses índices de vegetação, que neste trabalho foram o NDVI, o NDWI, o NDMI e o MSI. Além disso, como complementação foi calculado o indicador agrometeorológico DPV (déficit de pressão de vapor) para o auxílio e compreensão de períodos de deficiência hídrica. Durante todo o ciclo das lavouras o NDVI da safra com deficiência hídrica (2023/2024) foi superior àquele da safra 2025/2026. A deficiência hídrica observada na safra 2023/2024, acelerou o ciclo da lavoura, antecipando o fechamento do dossel em comparação com a safra 2025/2026, na qual não ocorreu estresse hídrico significativo. Em ambas as safras, o NDVI máximo atingiu valores muito elevados (acima de 0,90), refletindo alto volume de biomassa até o florescimento e início de formação de grãos. Na safra 2023/2024, no entanto, a baixa quantidade de chuvas de dezembro, associada a elevados déficits de pressão de vapor (DPV), prejudicaram o enchimento de grãos das plantas. E mesmo com um NDVI alto, a produtividade foi baixa. Na safra 2025/2026, a boa distribuição hídrica de dezembro, no momento da formação de flores e grãos, com DPV mais baixo e índices de vegetação mais favoráveis, possibilitou um desenvolvimento de plantas mais estável, com um ciclo mais longo e produtividade maior. O NDVI mostra que é um indicador da quantidade de vegetação verde (vigor vegetativo e biomassa verde), mas possui limitações para detectar estresses fisiológicos em estágios iniciais. Os índices NDWI, NDMI e o MSI, além do DPV, contribuíram para a compreensão dos efeitos da deficiência hídrica e contribuíram para a comparação das duas safras estudadas. Para

Embrapa Soja

Rod. Carlos João Strass, s/n,
acesso Orlando Amaral
Caixa Postal 4006,
CEP 86085-981
Distrito de Warta
Londrina, PR
(43) 3371 6000
www.embrapa.br/soja
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Roberta Aparecida Carnevalli

Secretária-executiva

Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Membros

Adônis Moreira, Clara Beatriz Hoffmann-Campo, Claudine Dinali Santos Seixas, Claudio Guilherme Portela de Carvalho, Fernando Augusto Henning, Leandro Eugênio Cardamone Diniz, Liliane Márcia Mertz-Henning, Maria Cristina Neves de Oliveira

Edição executiva

Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol

Revisão de texto

Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Normalização

Valéria de Fátima Cardoso (CRB- 9/1188)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Marisa Yuri Horikawa
Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

a compreensão da variabilidade da produtividade da soja a interpretação conjunta do NDVI com DPV, a precipitação e os índices espectrais relacionados ao estado hídrico da vegetação (NDWI, NDMI e MSI), fornece uma explicação mais consistente, evidenciando a importância da integração entre solo, planta e atmosfera.

Termos para indexação: NDWI, NDMI, MSI

High NDVI does not guarantee high soybean yield: evidence of the influence of Vapor Pressure Deficit (VPD) and crop water status

Abstract – This study compared vegetation indices from two soybean seasons. The first (2023/2024) showed relatively low average municipal yield due to water deficit, whereas the second (2025/2026) recorded a yield considered normal. Vegetation indices were derived based on electromagnetic spectrum (EMS) reflectance values in the visible (primarily the red band), near-infrared (NIR), and shortwave infrared (SWIR) regions; the specific indices calculated in this study were NDVI, NDWI, NDMI, and MSI. Additionally, the agrometeorological indicator Vapor Pressure Deficit (VPD) was calculated to help understand periods of water deficit. Throughout the crop cycle, the NDVI of the water-deficient season (2023/2024) was higher than that of the 2025/2026 season. The water deficit observed in the 2023/2024 season accelerated the crop cycle, leading to earlier canopy closure compared to the 2025/2026 season, during which no significant water stress occurred. In both seasons, maximum NDVI reached very high values (above 0.90), reflecting a large volume of biomass up to the flowering and early grain-filling stages. However, in the 2023/2024 season, low rainfall in December, combined with high vapor pressure deficits (VPD), impaired grain filling. Consequently, despite the high NDVI, yield was low. In the 2025/2026 season, favorable water distribution in December—coinciding with flowering and grain formation—combined with lower vapor pressure deficit (VPD) and more favorable vegetation indices, enabled more stable plant development, a longer growth cycle, and higher productivity. While NDVI serves as an indicator of green vegetation quantity (vegetative vigor and green biomass), it has limitations in detecting physiological stress at early stages. The NDWI, NDMI, and MSI indices, along with VPD, aided in understanding the effects of water deficit and facilitated the comparison of the two seasons under study. To understand soybean yield variability, the combined

interpretation of NDVI with VPD, precipitation, and spectral indices related to vegetation water status (NDWI, NDMI, and MSI) provides a more consistent explanation, highlighting the importance of the soil-plant-atmosphere continuum.

Index terms: NDWI, NDMI, MSI

Introdução

Atualmente a superfície terrestre é cada vez mais monitorada pelas tecnologias geoespaciais. Observações constantes permitem o acompanhamento da atividade humana, seja nas áreas urbanas, nos campos, nos mares, nos desertos ou nas florestas. As tecnologias de sensoriamento remoto, pelo uso de modernos sensores, permitem a compreensão e entendimento, à distância, de eventos como poluição e devastação de rios, mares e florestas. Isso tem possibilitado a visualização das transformações de grandes extensões territoriais, pela grande diversidade que ocorre no campo, por exemplo, entre culturas agrícolas perenes e anuais, áreas ocupadas por pecuária e outros tipos de ocupação territorial. Com isso é possível fazer estimativas e medições de áreas, estimativas de áreas degradadas, estimativas de safras, acompanhamento de eventos climáticos adversos, como geadas e secas, entre outros.

Na detecção de informações remotas, um objeto alvo na superfície terrestre, recebe parte ou uma porção direta da radiação eletromagnética (REM) proveniente do sol. Esse objeto alvo reflete esse fluxo de radiações, que poderão ser registradas num sensor localizado num determinado satélite. Tais reflectâncias ocorrem segundo as características próprias dos diferentes alvos terrestres. Segundo Formaggio e Sanches (2017), a reflectância da energia solar é representada pela razão entre o fluxo de radiação que incide numa superfície e o fluxo de radiação que é refletido por ela, sendo um dos princípios fundamentais do sensoriamento remoto, que baseia-se no comportamento das reflectâncias dos alvos, em distintas regiões do espectro eletromagnético.

Após várias técnicas de processamento e correções dos dados oriundos dos sensores dos satélites, são obtidas inúmeras informações, entre elas os valores das já referidas reflectâncias dos alvos terrestres, para cada banda do satélite, sendo estas posicionadas em diferentes regiões do espectro eletromagnético. É possível, então, o cálculo de índices de vegetação, que são muito úteis na interpretação das imagens e na compreensão do comportamento de cada alvo estudado (Meneses et al., 2019). Um método muito utilizado para visualizar áreas

terrestres é o uso do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse et al., 1974), que é calculado utilizando-se as faixas do vermelho (617 a 760 nm), com baixos valores de reflectância devido à absorção da REM pela clorofila e do infravermelho próximo (NIR; 760 a 910 nm), com altos valores de reflectância devido às estruturas internas das folhas verdes. O NDVI é obtido pela fórmula: $NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red)$. Os valores de NDVI variam de -1 a +1, sendo que os valores próximos de 1 correspondem a alvos densamente vegetados, enquanto que valores negativos indicam ausência de vegetação. Atualmente o NDVI possibilita muitas aplicações práticas no campo, entre elas a identificação de áreas, avaliação do vigor de plantas, acompanhamento de safras, monitoramentos de desmatamentos, de estresses e outros. Portanto, ele é importante para a agricultura de precisão e para a gestão de riscos agrícolas. Atualmente é particularmente importante em aplicações como perícias de crédito rural e seguro agrícola. Em síntese, ele mede a intensidade do verde da vegetação. Valores baixos e estáveis (próximos de 0,10 a 0,15) indicam solo exposto ou cobertura vegetal mínima, típica do período imediatamente anterior ou do momento da semeadura ou da emergência de plantas anuais. O surgimento gradual do NDVI (ultrapassando 0,20) marca o estabelecimento inicial de uma cultura, permitindo identificar o início do ciclo fenológico de forma objetiva e retroativa. É importante destacar que, segundo Tucker et al. (1979), a curva do NDVI tem uma natureza assintótica, onde ele 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.

Além do NDVI, existem também outros índices de vegetação, que ajudam a aumentar o nível de compreensão da influência de fatores ambientais sobre o desenvolvimento das plantas. Um deles é o MSI (*Moisture Stress Index*) (Hunt Jr.; Rock, 1989), que verifica o status hídrico das plantas, pelas relações entre reflectâncias do infravermelho médio (MIR; acima de 3000 nm) e do infravermelho próximo (NIR). Ele 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. Quando se usam as 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). Quanto menor o valor obtido de MSI, maior é o conteúdo de água nas plantas.

Outro índice importante para compreender as relações hídricas entre planta e ambiente é o NDWI (*Normalized Difference Water Index*). Em algumas plataformas de internet como a LandViewer (LandViewer, 2026) o NDWI indica corpos hídricos como rios, lagos, inundações, entre outros. Por sua vez, para estudar os teores de água nas plantas é muito útil a utilização do NDWI, conforme proposto por Gao (1996). Ele possibilita uma medida de moléculas de água líquida na vegetação, sendo sensível às quantidades totais de água nas folhas e às mudanças no conteúdo de água no dossel. Este índice foi utilizado por Gonçalves et al. (2024) em estudos das características espectrais e impactos da deficiência hídrica sobre áreas agrícolas no estado do Paraná, safra 2021/2022, utilizando as bandas 8, 11 e 12 do satélite Sentinel 2. Estas bandas (11 e 12), da região do SWIR (infravermelho de ondas curtas), 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).

Existe ainda, um índice muito utilizado em agricultura que é o NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*), obtido entre as bandas no NIR e do SWIR (bandas 8 e 11 do Sentinel 2), que dá uma previsão da umidade do solo, utilizado em agricultura de precisão e irrigação, sendo importante para estimar a umidade do solo em escala de campo (Koochikadeh et al., 2025). É também utilizado em monitoramento e estudos de seca.

Apesar dos aspectos acima relatados, os tradicionais métodos agrometeorológicos de estudos das relações entre o solo, as plantas e a atmosfera, continuam importantes nos dias atuais, sendo fundamentais para análises conjuntas com dados de sensoriamento remoto, principalmente para a compreensão de estresses ambientais, como, por exemplo, secas. Um indicador muito útil para isto é o DPV (déficit de pressão de vapor), dado pela equação de Tetens (1930) e pode ser utilizado para correlacionar a importância da demanda hídrica da atmosfera sobre a produtividade de culturas. Ele pode ser entendido como sendo uma combinação entre a temperatura média e a umidade relativa do ar, indicando o poder que a atmosfera possui de retirar água da superfície terrestre, facilitando o entendimento da origem de secas e veranicos (Gonçalves et al., 2025).

O objetivo deste trabalho foi a comparação da evolução do NDVI numa safra onde ocorreu

deficiência hídrica para as plantas e baixa produtividade regional (2023/2024), com uma safra em boas condições hídricas (2025/2026), evidenciando a influência do DPV e dos índices vegetativos (NDWI, NDMI e MSI) sobre a produtividade da soja.

Material e Métodos

Nas safras 2023/2024 e 2025/2026, foram acompanhadas, no campo, três áreas de agricultores (C, B e D), cultivadas com a cultura da soja, no município de Londrina, PR. Na safra 2023/2024, a semeadura da soja, nas 3 áreas, ocorreu no início do mês de outubro de 2023, mês de grande intensidade de semeadura de soja na região. Desde os períodos anteriores à semeadura até os estádios de desenvolvimento das plantas, as lavouras foram acompanhadas com registros fotográficos e avaliações de emergência, estádios iniciais e desenvolvimento do dossel, ao mesmo tempo em que, na medida do possível, foram obtidas as imagens de satélite dos mesmos locais para os mesmos períodos. O cálculo dos índices vegetativos das áreas, utilizados neste trabalho, foi a média do que foi verificado em todas as áreas para cada data analisada. As imagens utilizadas foram as dos satélites Landsat e preferencialmente do Sentinel 2, obtidas nas plataformas LandViewer (LandViewer, 2026) e Google Earth Engine (GEE) (Google Earth Engine, 2026). Na GEE, foram obtidas as reflectâncias de cada área (em número de seis repetições), nas datas estudadas, das bandas 4 (vermelho) e da banda 8 (NIR), utilizadas nos cálculos do NDVI. Foram obtidos também, dados de reflectâncias das

bandas do SWIR (11 e 12), para os cálculos dos índices de vegetação NDWI, NDMI e MSI. Foram obtidos ainda, no laboratório de agrometeorologia da Embrapa Soja, dados de precipitação, umidade relativa do ar e temperatura das safras estudadas para análises climáticas e cálculos de déficit de pressão de vapor (DPV). Na safra 2025/2026, foram acompanhadas as mesmas áreas, com os mesmos procedimentos, sendo que a semeadura ocorreu mais tarde, entre 11 e 13 de outubro de 2025.

Em função de chuvas e nebulosidade, o número de imagens de satélite disponíveis para a obtenção das reflectâncias e cálculos dos índices vegetativos, não foi o mesmo para as duas safras estudadas. Foi necessário a realização de estimativas médias do índices vegetativos para algumas datas. No caso do NDVI, que mostra saturação após um certo momento e a detecção de massa verde passa a ter variações significativas, estabeleceu-se, que os estudos de imagens e reflectâncias dos três primeiros meses após a semeadura, trariam as diferenças ocorridas entre as duas safras.

Resultados e Discussão

A Tabela 1 sintetiza a evolução do NDVI médio das três áreas estudadas, nas duas safras, em dias após a semeadura (DAS).

Os dados da Tabela 1 em formato de gráfico (Figura 1) evidenciam que o NDVI se desenvolveu mais lentamente na safra 2025/2026 que na 2023/2024.

A Tabela 2 permite a análise climática e ambiental das condições das lavouras estudadas (C, B e D), na safra 2023/2024.

Tabela 1. Comparação da evolução do NDVI médio, em dias após a semeadura (DAS), entre uma safra com deficiência hídrica (2023/2024) e uma safra normal (2025/2026), em três áreas agrícolas do município de Londrina, PR.

DAS 2023/2024	Datas	NDVI 2023/2024	DAS 2025/2026	Datas	NDVI 2025/2026
0	01 e 02/10/2023*	0,13	0	11 a 13/10/2025*	0,12
10	09/10/2023	0,15	10	15/10/2025	0,12
20		0,20	17		0,15
25		0,22	25	23/10/2025	0,17
30		0,25	30	12/11/2025	0,19
40	08/11/2023	0,35	40		0,23
45		0,40	45		0,29
50		0,51	51	27/11/2025	0,38
55		0,61	53		0,51
60		0,72	56		0,54
65	03/12/2023	0,85	60		0,60
70		0,80	65		0,63
75	13/12/2023	0,93	70		0,70
85			85	06/01/2026	0,94

* data de semeadura

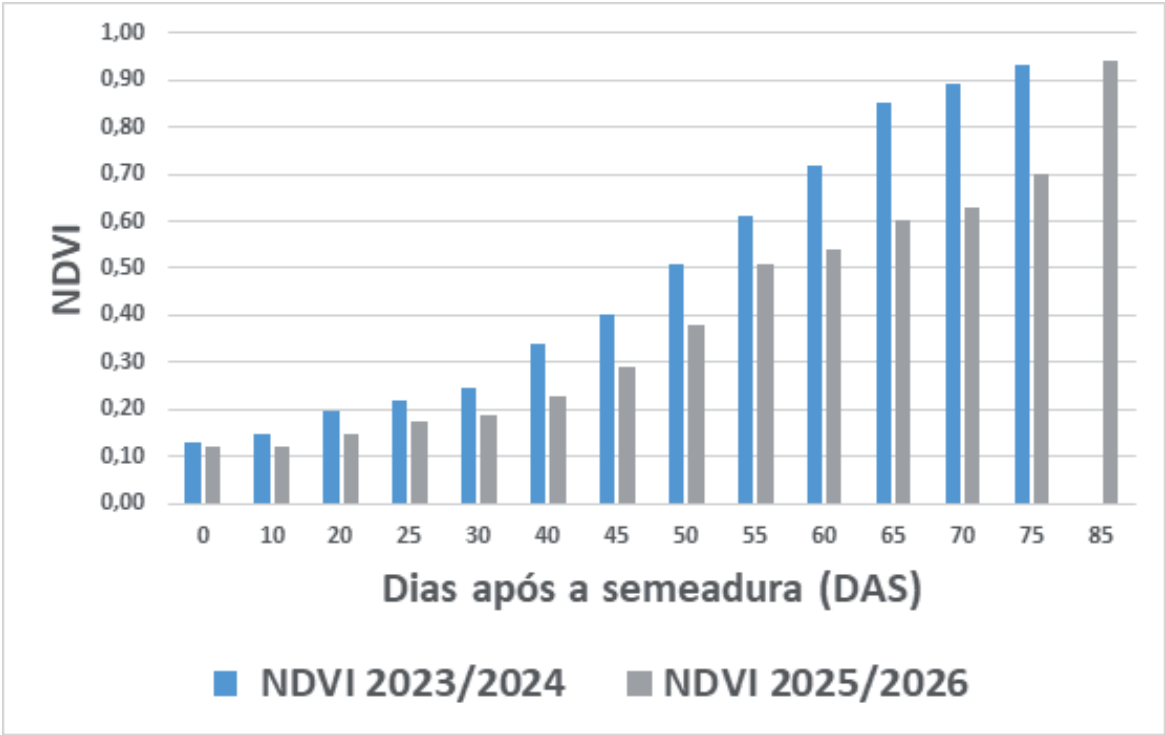


Figura 1. Comparação da evolução do NDVI médio em dias após a semeadura, entre uma safra seca (2023/2024) e outra normal (2025/2026), em três áreas cultivadas com soja, em Londrina, PR.

Tabela 2. Evolução da precipitação e dos resultados calculados de DPV, NDVI e os índices vegetativos NDWI, NDMI e MSI, nas áreas estudadas, durante a safra 2023/2024, em Londrina, PR.

Safra 2023/2024	Precipitação (mm)	NDVI	DPV	NDWI	NDMI	MSI
23/09/2023		0,12		-0,10	-0,24	1,65
Out/2023	205,4					
09/10/2023		0,15	0,62	-0,04	-0,17	1,42
			0,59			
			0,39			
Nov/2023	103,4					
08/11/2023		0,35	0,79	0,01	-0,12	1,28
			1,10			
			0,24			
Dez/2023	56,5					
03/12/2023		0,85	0,45	0,56	0,25	0,60
13/12/2023		0,93	0,91	0,67	0,38	0,45
Jan/2024	96					
Total	461,3					

Analisando-se a Tabela 2 é possível discorrer sobre o ocorrido na safra 2023/2024. A semeadura ocorreu cedo, aproximadamente, entre 30 de setembro a 2 de outubro de 2023, lembrando que o mês de outubro teve boa quantidade de chuvas (205 mm). O NDVI inicial obtido de 0,13 é típico do momento de semeadura/emergência e desenvolvimento inicial. O NDWI e NDMI negativos indicam baixa biomassa e ainda pouca água na vegetação. O MSI alto, de 1,41

é típico de solo exposto e plântulas pequenas, enquanto o DPV baixo (0,62 a 0,39 kPa) indica atmosfera pouco demandante em água. Essas condições garantiram um bom ambiente para a emergência e o estabelecimento das plantas.

A Figura 2 mostra o desenvolvimento inicial da área D em 16 de outubro de 2023 e as faixas de NDVI em 20 de outubro de 2023, obtidas do satélite Landsat. Em novembro de 2023, em momento

de crescimento vegetativo, as plantas apresentavam os reflexos do bom estabelecimento inicial, com um NDVI normal de 0,35 e as plantas em expansão, mesmo com o NDWI e o NDMI ainda negativos. O MSI mostrou uma leve melhora (1,28). No entanto, em novembro, as chuvas foram de apenas 103 mm. O DPV aumentou, tendo um pico de 1,10 kPa no segundo decêndio, elevando a demanda atmosférica.

Essas condições indicavam a possibilidade de um provável início de deficiência hídrica. Em meados de novembro e no mês de dezembro ocorreu a transição para o período reprodutivo. A chuva acumulada em dezembro e 2023 foi extremamente baixa, de apenas 56,5 mm. O NDVI foi de 0,85 em 3 de dezembro de 2023 e de 0,93 em 13 de dezembro (Figura 3).

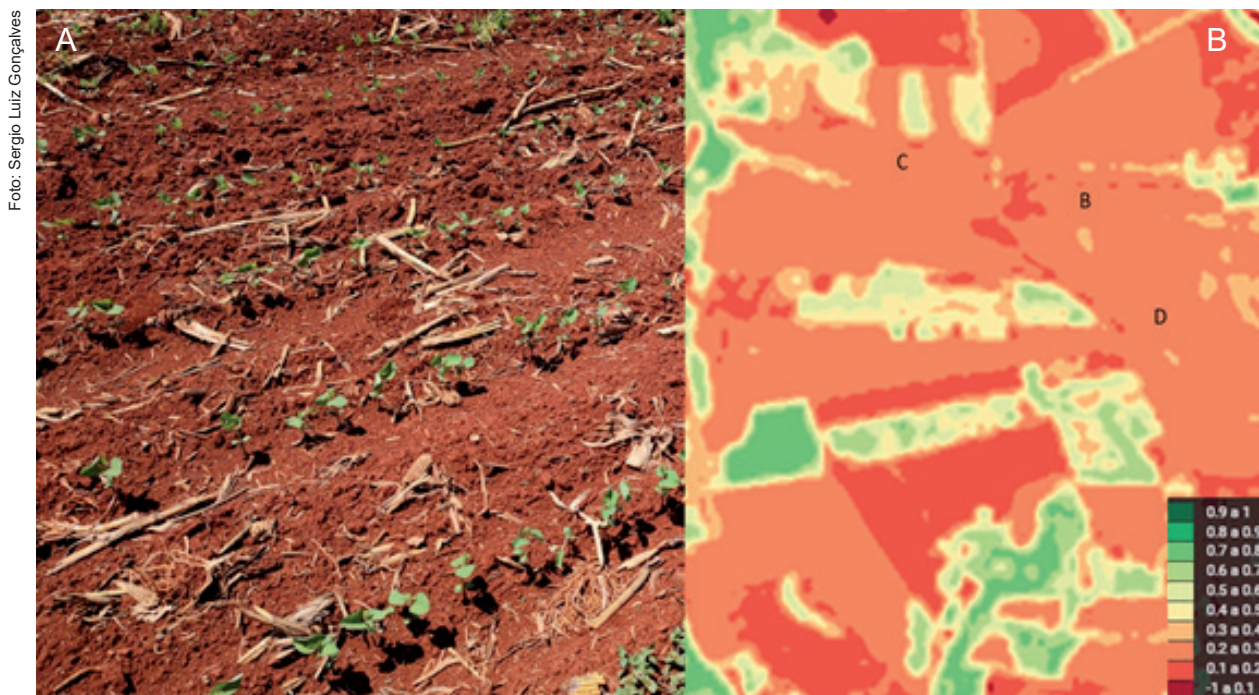


Figura 2. Foto digital da área D, cultivada com soja em fase de estabelecimento, capturada em 16 de outubro de 2023 (A) e a respectiva imagem de NDVI, do satélite Landsat, de 20 de outubro de 2023 (B), obtida na plataforma LandViewer. Londrina, PR, safra 2023/2024.

Fonte (B): LandViewer (2026).



Figura 3. Recorte de uma imagem Sentinel-2 em cor verdadeira, RGB 4,3,2, de três áreas cultivadas com soja (C, B e D), na região de Londrina, PR, em 13 de dezembro de 2023. Londrina, PR, safra 2023/2024.

Fonte (B): LandViewer (2026).

Nesse momento, o NDWI e o NDMI, fortemente positivos e o MSI baixo indicavam uma vegetação saudável e com bom conteúdo de água nas folhas. Além disso, o DPV estava na faixa de baixo a moderado. As lavouras terminaram o seu ciclo, com enchimento de grãos e maturação em dezembro de 2023 e janeiro de 2024. As colheitas ocorreram entre o final de janeiro até 5 de fevereiro de 2024. Segundo Paraná (2026), a produtividade média do município de Londrina, na safra 2023/2024, foi de 2614 kg ha⁻¹. Alguns pontos devem ser considerados para explicar a baixa produtividade, mesmo com alto NDVI e índices hídricos satisfatórios até meados de dezembro. É importante lembrar que o NDVI mede principalmente clorofila e cobertura foliar e biomassa, sendo pouco sensível a estresses fisiológicos iniciais, que demoram algum tempo para mostrar senescência ou amarelecimento visível. As poucas chuvas de dezembro causaram um estresse hídrico que prejudicou os processos reprodutivos, com impactos negativos na fotossíntese, na translocação de assimilados para os grãos, provocando aborto de vagens e redução no peso dos grãos. Porém, não houve redução na área foliar verde no momento da captura das imagens pelo satélite, conforme é possível verificar na Figura 3, com a imagem do visível de 13 de dezembro de 2023. Além disso, o pico do DPV, de 1,1 kPa no segundo decêndio de novembro amplificou o efeito da chuva moderada de 103 mm. Em dezembro, o DPV de 0,91 no segundo decêndio

do mês, somado à chuva de apenas 56 mm, ampliou o estresse pelo baixo suprimento de água e alta demanda hídrica pela atmosfera, encurtou o período reprodutivo e prejudicou ainda mais a formação dos grãos. É importante enfatizar ainda, que o início do estresse hídrico no início do estágio reprodutivo limita a produção de folhas novas e antecipa o fechamento do dossel. Com isso o NDVI aumenta mais rápido, pelo encurtamento do ciclo. É possível observar que o NDVI de 0,93 ocorreu já em 13 de dezembro, aos 75 dias após a semeadura (DAS), conforme Figura 3. Porém, um NDVI alto e os índices vegetativos adequados representam presença de água na biomassa, mas não necessariamente um solo com boa reposição da umidade. As plantas provavelmente já estavam extraindo água das camadas mais profundas, ocorrendo aumento de transpiração já em novembro. O solo com um estoque reduzido de água em dezembro, coincidiu com o momento crítico de enchimento de grãos, mostrando um estresse fisiológico mesmo sem sinais espectrais. A produtividade foi bastante prejudicada, explicando a queda de produção da safra 2023/2024.

A Tabela 3 permite a análise climática e ambiental das condições das lavouras cultivadas na safra 2025/2026.

Sobre a safra 2025/2026, analisando a Tabela 3, é possível destacar alguns aspectos. Nessa safra, a semeadura ocorreu um pouco mais tarde, de 11 a 13 de outubro de 2025 (Figura 4).

Tabela 3. Evolução da precipitação e dos resultados calculados de DPV, NDVI e os índices vegetativos NDWI, NDMI e MSI, nas áreas estudadas, durante a safra 2025/2026, em Londrina, PR.

Safra 2025/2026	Precipitação (mm)	NDVI	DPV	NDWI	NDMI	MSI
Out/2025	171,4					
15/10/2025		0,12	0,81	-0,12	-0,25	1,67
23/10/2025		0,17	0,53	-0,08	-0,19	1,47
			0,61			
Nov/2025	252,8					
12/11/2025		0,19	0,35	-0,06	-0,19	1,47
27/11/2025		0,38	0,46	0,07	-0,08	1,17
			1,18			
Dez/2025	259,5					
			0,62			
			0,28			
			0,67			
Jan/2026	84,3					
06/01/2026		0,94	0,30	0,70	0,43	0,40
Total	768					

Foto: Sergio Luiz Gonçalves



Figura 4. Área B, semeada com soja em pré-emergência, em foto digital capturada em 13 de outubro de 2025, em Londrina, PR, safra 2025/2026.

As chuvas do mês de outubro de 2025, de 171 mm, foram um pouco inferiores à safra anterior estudada. O NDVI no momento da semeadura/emergência evoluiu de 0,12 a 0,15. Do início a meados de outubro de 2025, o NDWI e o NDMI estavam bem negativos. O MSI alto (1,66 a 1,47) e o DPV inicial

(0,81) relativamente alto. Com relação à safra anterior, aqui já aparece um sinal leve de restrição inicial, com algum estresse evaporativo. Mas as chuvas de 171 mm em outubro de 2025 foram suficientes para o estabelecimento e manutenção das plantas sem danos graves (Figura 5).

Foto: Sergio Luiz Gonçalves



Figura 5. Área B, cultivada com soja, em foto digital capturada em 28 de outubro de 2025, em Londrina, PR, safra 2025/2026.

Em novembro, com as plantas em crescimento vegetativo, o NDVI ainda era baixo, o NDWI e o NDMI continuavam negativos ou próximo de zero e o MSI ainda elevado, configurando-se numa deficiência hídrica leve e persistente. É importante notar que nesse momento, pelos dados de NDVI, o desenvolvimento das plantas era mais lento que na safra anterior. No entanto, a excelente chuva de novembro (253 mm) reverteu totalmente o pequeno quadro de deficiência hídrica. Com água disponível as plantas mantiveram o crescimento vegetativo por mais tempo, expandindo folhas de forma progressiva, sem a necessidade de acelerar o ciclo. O dossel se formando mais lentamente melhorou as condições para a fotossíntese e o enchimento de grãos. Com isso, o NDVI demorou mais para atingir o pico (Figura 6), que

ocorreu apenas em janeiro (0,94 aos 85 DAS). Além disso, os índices hídricos estavam todos favoráveis nesse momento. Em síntese, a água abundante de novembro/dezembro possibilitou um grande crescimento no final do vegetativo e no reprodutivo, com as lavouras entrando no reprodutivo com o dossel fechado e excelentes condições hídricas no ambiente, incluindo um DPV relativamente baixo em dezembro. O resultado disso foi uma excelente cobertura foliar e biomassa no momento crítico de enchimento de grãos e um ciclo um pouco mais longo, mesmo com a semeadura mais tardia. As lavouras foram colhidas no início de março de 2026. Segundo Paraná (2026), a produtividade média do município de Londrina, na safra 2025/2026, foi de 3600 kg ha⁻¹.

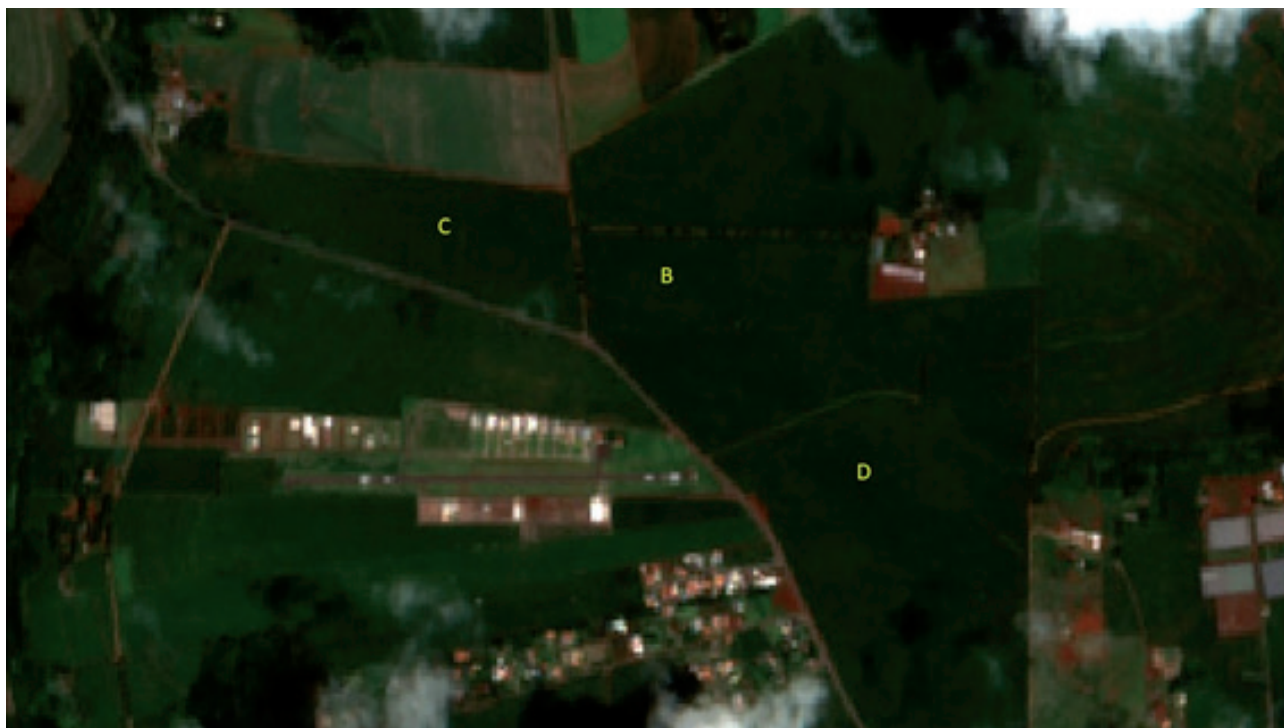


Figura 6. Recorte de uma imagem do satélite Sentinel-2, em cor verdadeira, RGB 4,3,2, de três áreas cultivadas com soja (C, B e D), na região de Londrina, PR, em 6 de janeiro de 2026. Londrina, PR, safra 2025/2026. Fonte: LandViewer (2026).

O fator chuvas e nebulosidade é importante neste tipo de trabalho, uma vez que, no período de verão, pode reduzir significativamente a disponibilidade de imagens de satélite limpas. Na safra 2023/2024, a precipitação foi inferior à registrada na safra 2025/2026. Essa maior ocorrência de chuvas e nuvens na safra mais recente interferiu no número de imagens disponíveis, impossibilitando a obtenção de imagens e reflectâncias em algumas datas dos meses de novembro e dezembro, justamente nos horários de passagem do satélite.

Essa limitação gerou um descompasso temporal entre observações de campo e as imagens de satélite, pois, em algumas datas programadas, o céu nublado impediu a captação de imagens, restando

apenas os dados de campo. No entanto, isso ocorreu apenas em poucas datas e não comprometeu a realização do trabalho, uma vez que outras datas do período foram suficientes para obter os dados necessários.

Os dados de campo, como idade das plantas e estágio de desenvolvimento, foram coletados regularmente ao longo de todo o período. Em algumas datas com cobertura de nuvens não foi possível calcular o NDVI para todas as áreas estudadas (C, B e D). Por esse motivo, os valores de NDVI e dos demais índices utilizados, correspondem às médias obtidas nas três áreas acompanhadas em cada data estudada.

Apesar das limitações mencionadas anteriormente, este trabalho contribui para o aprimoramento da interpretação de imagens de satélite, no contexto da determinação da época de semeadura de culturas agrícolas. O NDVI de 0,12 a 0,15, característico de vegetação escassa e predominância de reflectância do solo, pode indicar a presença de lavouras de soja em estádios iniciais, com plântulas de aproximadamente duas semanas de idade. Quando o NDVI se aproxima de 0,20, as plantas já se encontram estabelecidas, com idade entre 18 e 25 dias, embora ainda sem o fechamento do dossel.

De modo geral, a deficiência hídrica observada na safra 2023/2024 acelerou o ciclo da lavoura, antecipando o fechamento do dossel em comparação com a safra 2025/2026, na qual não ocorreu estresse hídrico significativo. Em ambas as safras, o NDVI atingiu valores muito elevados (acima de 0,90), refletindo alto volume de biomassa até o florescimento. No entanto, o NDVI é um bom indicador da quantidade de vegetação verde (vigor vegetativo e biomassa verde), mas possui limitações para detectar estresses fisiológicos em estágios iniciais. Por isto, ele não permitiu detectar plenamente os efeitos da deficiência hídrica na safra 2023/2024.

Os índices NDWI, NDMI e o MSI, além do DPV, contribuíram para a compreensão dos efeitos da deficiência hídrica e contribuíram para a comparação das duas safras estudadas.

Conclusão

A produtividade da soja foi determinada pela interação entre as condições atmosféricas, hídricas e estruturais da cultura e não apenas pelo vigor vegetativo representado pelo NDVI. Na safra 2023/2024, embora o NDVI tenha atingido valores elevados nos períodos reprodutivos, a precipitação de apenas 56 mm em dezembro foi acompanhada por elevados picos de déficit de pressão de vapor (DPV), caracterizando uma elevada demanda atmosférica num momento muito crítico da cultura (formação de flores e grãos). Apesar de os índices NDWI, NDMI e MSI ainda indicarem um estado hídrico relativamente favorável da vegetação nesse período, esses resultados sugerem que a resposta fisiológica da planta ao aumento do DPV ocorreu antes que as alterações estruturais significativas fossem detectadas pelo NDVI, comprometendo os processos reprodutivos e resultando na produtividade de apenas 2614 kg ha⁻¹. Em contraste, na safra 2025/2026, a ocorrência de 259 mm de chuvas em dezembro, associada a valores inferiores de DPV e a índices hídricos ligeiramente superiores, proporcionou condições mais

favoráveis ao funcionamento fisiológico da cultura, mesmo apresentando um NDVI semelhante à safra anterior. Esses resultados demonstram que o NDVI descreve adequadamente a condição estrutural do dossel, mas possui limitações para explicar diferenças de produtividade entre safras quando analisado isoladamente. A interpretação conjunta do NDVI com DPV, a precipitação e os índices espectrais relacionados ao estado hídrico da vegetação (NDWI, NDMI e MSI), fornece uma explicação mais consistente dos mecanismos que condicionam o desempenho produtivo da soja, evidenciando a importância da integração entre atmosfera, planta e disponibilidade hídrica na compreensão da variabilidade da produtividade.

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.
- 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. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 284 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-O.
- GONÇALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B.; CRUSIOL, L. G. T.; SIBALDELLI, R. N. R.; VERONEZZI, G. **Modelo matemático indicando a influência do déficit de pressão de vapor (DPV) na estimativa da produtividade da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2025. 12 p. (Embrapa Soja. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 42).
- GONÇALVES, S. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; CRUSIOL, L. G. T.; SIBALDELLI, R. N. R. **Características espectrais e impactos da deficiência hídrica sobre áreas agrícolas no estado do Paraná, safra 2021/2022**. Londrina: Embrapa Soja, 2024. 67 p. (Embrapa Soja. Documentos, 468).

GOOGLE EARTH ENGINE. **Google Earth Engine code editor**. [2026]. Disponível em: code.earthengine.google.com. Acesso em: 20 mar. 2026.

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.

KOOHIKERADEH, E.; GUMIERE, S.; BONAKDARI, H. NDMI-Derived Field-Scale Soil Moisture Prediction Using ERA5 and LSTM for Precision Agriculture. **Sustainability**, v. 17, n. 6, 2399, 2025. DOI: 10.3390/su17062399.

LANDVIEWER. **Earth Observing System** [2026]. Disponível em: <https://eos.com/landviewer/>. Acesso em: 01 abr. 2026.

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.

PARANÁ. Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Departamento de Economia Rural (DERAL). **Estimativas de safra: área, produção e evolução de safra: quadros 2026**. Curitiba, 2026. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/safras>. Acesso em: 24 mar. 2026.

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.

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

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