

MATHEUS DE OLIVEIRA CAMPOS

**AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SOLO POR MEIO
DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM CULTIVO DE MILHO SEQUEIRO**

**Uberlândia - MG
2023**

MATHEUS DE OLIVEIRA CAMPOS

**AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SOLO POR MEIO
DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM CULTIVO DE MILHO SEQUEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Sandro M. Carmelino Hurtado

Uberlândia - MG
2023

MATHEUS DE OLIVEIRA CAMPOS

**AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DO SOLO POR MEIO
DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM CULTIVO DE MILHO SEQUEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, 28 de junho de 2023

Prof. Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado (ICIAG-UFU)

Prof. Dr. Cláudio Ricardo da Silva (ICIAG-UFU)

Eng. Agr. Hugo Miranda Faria (Agrobelts)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a toda a minha família, especialmente aos meus pais, Célia e Antônio, que desde a minha infância me ensinaram que a educação transforma e fizeram tudo ao seu alcance para me proporcionar acesso à educação. Eles me moldaram e me tornaram a pessoa que sou hoje; sem eles, eu não seria nada. Agradeço também aos meus irmãos, Antônio e Michelle, por estarem sempre ao meu lado. Aos meus amigos, que compartilham a vida comigo nos momentos bons e ruins, inclusive no desenvolvimento de projetos, como a criação de um podcast. Sem vocês, a vida certamente seria mais monótona.

Agradeço a minha namorada, Isadora, por todos os momentos que passamos juntos durante a graduação, por cada conselho, feedback e ajuda em meus trabalhos, e, principalmente, por sempre me apoiar e acreditar no meu potencial para realizar todos os projetos em que me envolvo.

Sou grato à UFU por proporcionar um ambiente de aprendizado enriquecedor e à Conteagro por me mostrar como é o mercado de trabalho e me proporcionar várias experiências no mesmo. Agradeço especialmente ao meu orientador, Professor Dr. Sandro Manuel Carmelino Hurtado, pela dedicação como orientador, pelo constante apoio e pela busca em auxiliar da melhor forma possível aqueles que estão em busca de conhecimento. Sua paciência ao me guiar durante toda a trajetória da realização deste trabalho foi fundamental.

Expresso minha gratidão aos membros do Grupo de Estudos em Agricultura de Precisão (GeAP) pelo esforço e dedicação em todos os trabalhos realizados. Agradeço também a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao Anderson Galvão, que me proporcionou a oportunidade de realizar meu estágio na Céleres, marcando assim o início da minha jornada no mundo profissional. Agradeço também ao Enilson e à Micheli por serem meus guias no dia a dia, bem como a todos os outros membros da empresa que compartilharam seus conhecimentos, me auxiliaram e contribuíram para o meu crescimento não apenas profissionalmente, mas também pessoalmente.

A todos, minha eterna gratidão...

RESUMO

A integração de informações obtidas pelo sensoriamento remoto com dados físico-hídricos do solo pode otimizar a produção agrícola, ao mesmo tempo em que auxilia na gestão dos recursos finitos do solo. Com base nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estimar a Evapotranspiração da Cultura (ET_c) a partir de índices de vegetação, e verificar a correlação entre o Índice de Água da Diferença Normalizada (NDWI) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) com os atributos físico-hídricos do solo. A área de estudo está localizada na fazenda Capim Branco, pertencente à Universidade Federal de Uberlândia. A cultura analisada foi o milho safrinha, na segunda safra de 2019. Foi utilizado o satélite Sentinel-2 para coletar informações de NDWI e NDVI em quatro datas, pré-semeadura, aos 29 dias após o plantio (semeadura), aos 91 dias após o plantio e aos 128 dias após o plantio. Utilizou-se o método de Allen (1996) para calcular a ET_c sendo coletadas amostras de solo na profundidade de 0-0,2 m, para análise dos atributos físico-hídricos do solo: areia, argila, condutividade elétrica, macro, micro e porosidade total, densidade do solo, capacidade de campo, capacidade de água disponível e ponto de murcha permanente. O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para analisar a relação entre NDWI, NDVI e os atributos físico-hídricos do solo. Os resultados mostraram que os índices de vegetação apresentaram correlação positiva com os recursos físico-hídricos do solo, sendo a data 91 dias após o plantio a mais indicada para coleta e uso de dados de índices de vegetação. A ET_c mostrou ser mais eficaz para estimar a produtividade, enquanto o NDWI, obteve forte correlação com a microporosidade do solo. Dessa forma é possível concluir que a análise dos índices de vegetação fornece informações para a gestão hídrica do solo em sistemas agrícolas, auxiliando na tomada de decisão do produtor e contribuindo para o aumento da produtividade.

Palavras-chave: NDWI, ET_c, Sensoriamento remoto, Gestão da água.

ABSTRACT

The integration of remote sensing information with physical-hydraulic data can optimize agricultural production while assisting in the management of finite soil resources. Based on this context, this article aims to estimate Crop Evapotranspiration (ET_c) using vegetation indices and examine the correlation between Normalized Difference Water Index (NDWI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with soil physical-hydraulic attributes to assist in irrigation management on the property. The analyzed crop was rainfed maize in the second crop of 2019, and the Sentinel-2 satellite was used to collect NDWI and NDVI information on four different dates: pre-sowing, 29 days after planting (sowing), 91 days after planting, and 128 days after planting, at Capim Branco farm on the Federal University of Uberlândia. The Allen method (1996) was used to calculate ET_c, and soil samples were collected at a depth of 0-0,2 m for analysis of soil physical-hydraulic attributes: sand, clay, electrical conductivity, macro and micro porosity, total porosity, bulk density, field capacity, available water capacity, and permanent wilting point. Pearson correlation coefficient was used to analyze the relationship between NDWI, NDVI, and soil physical-hydraulic attributes. The results showed that vegetation indices had a positive correlation with soil physical-hydraulic resources, with the 91-day after planting date being the most suitable for data collection and use of vegetation indices. ET_c proved to be more effective in observing productivity, while NDWI showed a strong correlation with soil microporosity. Therefore, the analysis of vegetation indices can provide useful information for soil water management, assisting producers in decision-making and contributing to increased productivity.

Keywords: NDWI, ET_c, Remote sensing, Water management.

LISTA DE ABREVIATURAS

CAD	Capacidade de Água Disponível
CC	Capacidade de Campo
CE	Condutividade Elétrica
DAP	Dias Após o Plantio
Ds	Densidade do Solo
ETc	Evapotranspiração da Cultura
ETo	Evapotranspiração de Referência
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada
PMP	Ponto de Murcha Permanente
PT total	Porosidade Total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REFERENCIAL TEORICO	2
2.1	Agricultura de Precisão	2
2.2	Sensoriamento Remoto	2
2.3	Índices de Vegetação	2
2.4	Evapotranspiração	3
2.5	Atributos físico-hídricos do solo	4
3	MATERIAL E MÉTODOS	5
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	9
5	CONCLUSÃO.....	15
	REFERÊNCIAS.....	16

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a população mundial cresce exponencialmente junto à demanda por alimentos (ONU, 2022). A agricultura brasileira desempenha um papel essencial nesse quesito, sendo responsável por fornecer alimento à aproximadamente 800 milhões de pessoas no mundo (CONTINI, 2021). O Brasil responde também a essa demanda com o aumento na produção agrícola, a que de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, terá aumento em 27% na produção de grãos e 17% na área plantada, até 2031 (Brasil, 2021). Entretanto, é importante considerar que os recursos naturais, como o hídrico, são limitados (TUCCI, 2001). A gestão inadequada da água impacta não apenas a produtividade das culturas, mas a sustentabilidade dos recursos hídricos (LIU, 2015). O problema pode ser atribuído a falta de planejamento, uso ineficiente da água e degradação dos ecossistemas aquáticos.

Uma ferramenta que visa contribuir nessa problemática é a agricultura de precisão (AP), ao buscar otimizar o rendimento das culturas e o consumo racional de insumos (MOLIN et al., 2015). A AP envolve o uso de tecnologias levando em consideração a variabilidade presente nas áreas de produção (GREGO, 2014) e apresenta como vantagem a caracterização detalhada dos talhões produtivos (INAMASU, 2014). O sensoriamento remoto (SR) é uma das ferramentas utilizadas pela AP, auxiliando na coleta de dados ambientais.

Os produtos do SR podem ser obtidos a partir de sensores instalados em plataformas como satélites, aeronaves remotamente pilotadas (ARP) e máquinas autopropelidas (SHIRATSUCHI et al. 2014). Isso permite monitorar a vegetação, avaliar a umidade do solo e detectar estresses hídricos, contribuindo para a gestão eficiente da água (BRITO, 2007; SAUSEN, 2015). Entre os produtos do SR, a partir da coleta de imagens, temos a definição de índices de vegetação, como o NDVI e o NDWI, auxiliando na identificação de áreas com deficiência de drenagem, presença de solos compactados ou outras condições que levam à restrição hídrica, permitindo direcionar eficientemente o recurso água (GU et al., 2008).

O presente trabalho tem por objetivo estimar a evapotranspiração da cultura a partir de índices de vegetação e verificar a correlação entre a evapotranspiração estimada, os índices e os atributos físico-hídricos do solo.

2 Referencial Teórico

2.1 Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão (AP) visa maximizar a eficiência da produção agrícola por meio da aplicação de tecnologias avançadas e práticas de manejo diferenciadas (OLIVEIRA et al., 2015). Essa abordagem, com base na compreensão da variabilidade espacial e temporal presente em áreas produtivas, permite tomar decisões precisas e direcionadas (ORTIZ, 2003).

Em propriedades agrícolas de menor escala, os agricultores percebem, de maneira empírica, diferenças dentro dos talhões. Em grandes propriedades onde essa percepção é demorada, a AP possibilita identificar e gerenciar as variações espaciais por meio de sensores, controladores e sistemas globais de posicionamento por satélite - GNSS (MOLIN, 2008). Essas variações resultam em limitações as plantas que, em sua maioria, apresentam distribuição heterogênea no campo, levando a respostas diferenciadas em termos de qualidade e quantidade da produção agrícola. Essas respostas estão fortemente associadas a variáveis nutricionais, disponibilidade hídrica no solo, compactação do solo, entre outros (BOTTEGA et al., 2013).

2.2 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto permite obter informações da superfície terrestre por meio da radiação eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos (MENESES; ALMEIDA, 2012). A técnica é amplamente utilizada na agricultura para coleta detalhados de dados da vegetação, do solo e de recursos relevantes para o gerenciamento agrícola (LILLESAND et al., 2015). Possibilita monitorar a saúde das plantas de forma não invasiva e em larga escala, permitindo avaliar a distribuição espacial da resposta espectral das culturas (THENKABAIL et al., 2015). A análise de imagens, obtidas a partir dos sensores, possibilita também estimar a umidade do solo, monitorar áreas com deficiência em drenagem, identificar problemas de compactação do solo e auxiliar na gestão eficiente da irrigação (WENG, 2012; KOOISTRA et al., 2017).

2.3 Índices de vegetação

A análise de índices de vegetação (IV) baseia-se na relação entre o comprimento de onda e a reflectância das plantas, o que possibilita inferir sobre a biomassa, sanidade e outros conteúdos relevantes às plantas (CAMPBELL, 2012).

O comprimento de onda é uma propriedade da radiação eletromagnética que influencia a interação com a vegetação. A reflectância, por sua vez, é a fração da radiação incidente que é refletida pelas plantas. Na vegetação esta última varia em diferentes comprimentos de onda, devido a processos bioquímicos e estruturais nas plantas. No espectro do infravermelho próximo (NIR) é influenciada pelo conteúdo de clorofila nas folhas, e no espectro do vermelho (RED), é relacionada à quantidade de luz absorvida pela clorofila (FILELLA et al., 2004). A diferença entre as reflectâncias NIR e RED é utilizada na definição de índices de vegetação que visam estimar a biomassa vegetal (TUCKER, 1979).

Alterações na reflectância, em comprimentos de onda específicos, podem indicar estresses bióticos ou abióticos, como doenças, infestações de pragas, deficiência nutricional ou estresse hídrico (PEÑUELAS et al., 1995). A diminuição da reflectância no infravermelho próximo pode indicar estresse hídrico (GAO, 1996). Já, a variação da reflectância no infravermelho próximo em relação à reflectância no vermelho pode ser usada para estimar o conteúdo de água nas plantas, ao estar relacionada à redução da atividade fotossintética e fechamento dos estômatos nas folhas, fornecendo informações valiosas para monitorar o estresse hídrico e otimizar a irrigação.

As principais limitações dos índices de vegetação englobam sua susceptibilidade a interferências de fatores além da vegetação, como características do solo e níveis de umidade, bem como a dificuldade em discernir estágios específicos de maturidade das plantas. Além disso, sua eficácia está condicionada a condições ótimas de iluminação e requer calibração para diferentes tipos de vegetação. É importante destacar que esses índices podem não fornecer informações detalhadas sobre a estrutura e a diversidade da vegetação, tornando-se necessária a complementação com outros conjuntos de dados e observações de campo para análises mais precisas (ABREU; COUTINHO, 2014).

2.4 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um processo fundamental no ciclo hidrológico e desempenha um papel crucial para a disponibilidade de água às plantas e no balanço hídrico. Por sua vez, a evapotranspiração real (ETr) representa a perda de água do solo por evaporação e transpiração das plantas, considerando condições climáticas, atributos do solo e o estágio de desenvolvimento vegetal (JENSEN et al., 1990). A medição da evapotranspiração real é essencial para o manejo sustentável dos recursos hídricos visando a eficiência na irrigação.

Entre as técnicas utilizadas para estimar a ETr estão o uso de estações meteorológicas, de sensores de umidade do solo e de imagens de satélite (MU et al., 2007).

Para Allen et al. (1998), a evapotranspiração da cultura é um parâmetro fundamental para o manejo da água na agricultura. Esta refere-se à quantidade de água perdida pela superfície do solo por meio da evaporação e transpiração das plantas. Ela influencia na quantidade de água necessária na irrigação (LIMA et al., 2014) e garante a definição adequada do recurso hídrico para o crescimento das culturas (MARTIN, 2012).

A evapotranspiração de referência (ET_o) é um conceito amplamente utilizado na estimativa da demanda evaporativa de uma área padrão de vegetação, geralmente composta por gramíneas bem irrigadas e bem desenvolvidas. É considerada uma medida de referência, independentemente das características específicas da cultura ou das condições locais do solo, sendo calculada de forma empírica (PEREIRA et al., 2015).

A relação entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência é expressa pelo coeficiente de cultura (K_c), que varia ao longo do ciclo de crescimento da cultura. O K_c é utilizado para ajustar a ET_o e para a obtenção da ETr, fornecendo estimativa mais precisa da demanda hídrica pela cultura em diferentes estágios fenológicos (DOORENBOS, 1981). O conhecimento do K_c é essencial para o manejo eficiente da irrigação, permitindo uma programação adequada da quantidade de água a ser aplicada na cultura.

A evapotranspiração de uma cultura em determinada fase de desenvolvimento, sem restrição hídrica e em condições ideais, é influenciada pelas condições meteorológicas, tipo de cultura e área foliar. A variação na área foliar da cultura real em comparação com a cultura de referência leva a variações no valor de K_c (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

2.5 Atributos físico-hídricos do solo

Os atributos físico-hídricos do solo desempenham um papel fundamental na dinâmica da água no ambiente pedológico. Dentre esses atributos, a textura do solo exerce influência direta na capacidade de retenção e drenagem da água. A fração areia afeta a taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento de água disponível, enquanto a argila contribui para a retenção e a capacidade de troca de cátions (CARTER; GREGORICH, 2007).

A condutividade elétrica do solo está relacionada à capacidade do solo em reter água e pode ser influenciada por fatores como salinidade e conteúdo da matéria orgânica (AYERS; WESTCOT, 1994). A densidade do solo descreve a massa de partículas do solo por unidade de

volume. O manejo do solo é refletido por esse atributo que é inversamente relacionado à porosidade total do solo, sendo que solos mais densos possuem menor capacidade de retenção de água e menor aeração (MESQUITA; MORÃES, 2004).

A macro e microporosidade do solo são atributos que descrevem a distribuição e o tamanho dos poros presentes. A macroporosidade refere-se aos poros maiores, responsáveis pela infiltração e drenagem da água, enquanto a microporosidade representa os poros menores, responsáveis pela retenção da água. A relação entre elas é crucial para a disponibilidade de água às plantas, pois uma microporosidade excessiva pode dificultar a drenagem e o crescimento das raízes (REYNOLDS et al., 2009).

A correta avaliação e interpretação dos atributos físico-hídricos auxilia na tomada de decisões relacionadas à irrigação, drenagem e manejo da fertilidade do solo. Além disso, permite a identificação de áreas com potencial de retenção ou percolação de água, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos (STEFANOSKI et al., 2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A área está localizada na fazenda experimental Capim Branco, na cidade de Uberlândia-MG, com altitude média de 863 m. O clima é do tipo AW, segundo classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.342 mm. Na área, destinada ao cultivo de culturas de grãos, sob sequeiro (pivô desativado), foram coletadas amostras de solo e planta em 50 pontos, configurados numa malha de 2 pontos/ha com auxílio do programa Qgis (QGIS Development Team, 2022) (Figura 1).

A instalação da cultura do milho foi realizada em 1 de março de 2019, com data de colheita em 14 de julho de 2019, ficando 137 dias no campo. Visando a análise da disponibilidade hídrica durante o ciclo fenológico da cultura foram coletadas imagens do satélite Sentinel 2 (ESA, 2016), em 24/02/2019, 31/03/2019, 30/05/2019 e 09/07/2019, correspondentes as fases de pré-plantio, 29 dias após plantio - DAP (pós-plantio), 91 DAP (pico de NDVI) e 128 DAP (pré-colheita) (Figura 2). Durante o período em que a cultura esteve no campo foi observada uma média de precipitação de 2,9 mm de chuva. Os meses de março e abril apresentaram os maiores índices de chuva, destacando-se o dia 16 de março de 2019, com registro total de 44,5 mm.

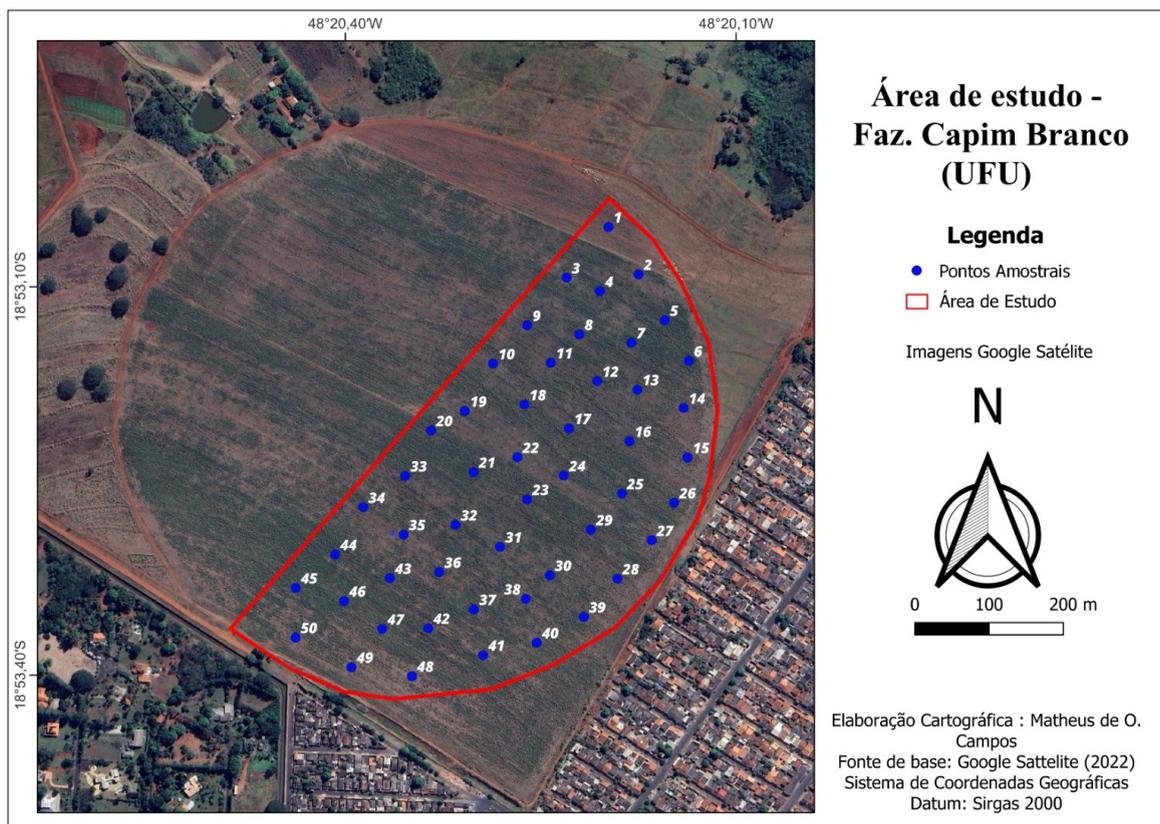


Figura 1. Área de estudo e pontos da malha amostral.

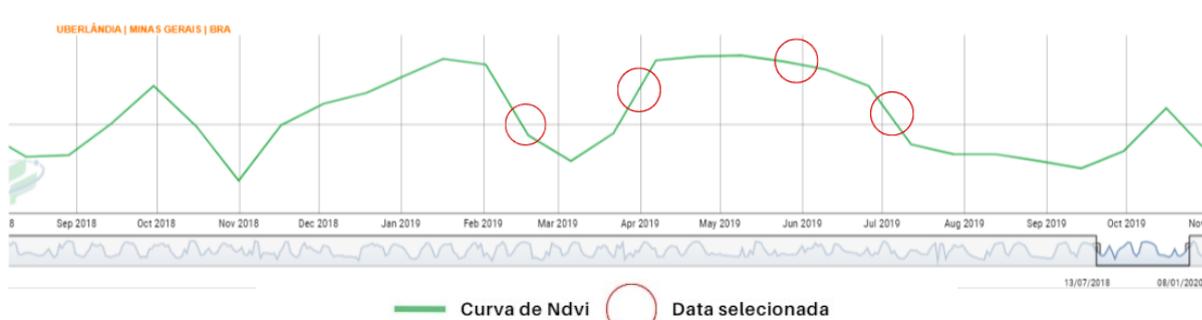


Figura 2. Monitoramento temporal do índice de vegetação NDVI para a área de estudo, a partir do uso do programa SatVeg (2023).

Os índices de vegetação NDVI e NDWI foram obtidos com uso do programa Qgis a partir de imagens do satélite Sentinel-2, com uso de imagens nos espectros de onda vermelho (B4), infravermelho próximo (B8) e infravermelho de onda média (B11), respectivamente.

O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), baseado na metodologia de Tucker (1979), é calculado como a razão entre a diferença das reflectâncias das bandas no infravermelho próximo e vermelho e a soma dessas reflectâncias (Equação 1).

Equação 1. Cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Vermelho}) / (\text{NIR} + \text{Vermelho})$$

Onde:

NIR = luz quase infravermelha

Vermelho = luz vermelha visível.

O NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada), baseado na metodologia de Gao (1996), é calculado como a razão da diferença das reflectâncias no infravermelho próximo e no infravermelho de onda curta, e a soma dessas mesmas reflectâncias (Equação 2). A escolha dessa metodologia para o cálculo do NDWI baseou-se na sua menor confusão espectral, conforme evidenciado por Pereira (2018).

Equação 2. Cálculo do Índice de Água por Diferença Normalizada

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

Onde:

NIR = luz quase infravermelha

SWIR = infravermelho de onda curta.

Para fazer o cálculo dos índices de vegetação com uso do QGIS foi utilizada a calculadora raster. A calculadora raster é uma ferramenta utilizada no processamento de dados de sensoriamento remoto. A partir do seu uso é possível combinar as bandas espectrais das imagens de forma direcionada, permitindo a criação de índices específicos para análise de vegetação e recursos hídricos.

Os dados de solo foram coletados em raio de 5 m arredor de cada um dos 50 pontos da malha amostral e corresponderam aos atributos areia, argila, condutividade elétrica, macro e microporosidade, porosidade total, densidade do solo, capacidade de água disponível, capacidade de campo, ponto de murcha permanente. A coleta foi a partir da retirada de amostras simples para compor amostras compostas, na profundidade de 0-0,2 m. Para a análise textural,

o solo foi seco ao ar e passado em peneiras de 2 mm (TEIXEIRA, 2017). A amostragem de solo para cálculo da densidade (Ds), porosidade total (PT), macro (Ma) e microporosidade (Mi), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) foi realizada a partir da coleta de amostras de solo indeformadas, em anéis de Kopecky (TEIXEIRA, 2017).

Prévio a análise CC e PMP em laboratório, as amostras foram preparadas (toillete) e saturadas com água destilada até a metade da altura do anel. Após 24 horas as amostras foram pesadas e o teor de umidade determinado. Em seguida, as amostras foram colocadas em câmaras de pressão de Richards e submetidas a tensões de 0,33 bar e 15 bar para avaliar a CC e PMP, respectivamente. Após cessar o dreno de umidade, correspondente a cada pressão, as amostras foram pesadas (JUNIOR, 2007).

Para a colheita dos grãos de milho foram definidas parcelas de 10 m². As amostras foram levadas ao laboratório de sementes da Universidade Federal de Uberlândia (LASEM), para pesagem dos grãos e determinação da umidade. A produtividade final foi calculada considerando um teor de umidade de 13% (Equação 3)

Equação 3: Cálculo da Produtividade Final

$$PF = PI * (100 - UI) / (100 - UF)$$

Onde:

PF = peso final corrigido para uma umidade de 13%;

PI = peso inicial dos grãos na umidade real;

UI = umidade inicial dos grãos (em porcentagem);

UF = umidade final desejada (neste caso, 13%).

Para cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc) foi usado o conceito de evapotranspiração, combinando a evapotranspiração de referência (ETo) e os coeficientes de cultura (Kc) (Equação 4).

Equação 4: Cálculo da Evapotranspiração da Cultura

$$ETc = ETo * Kc$$

Onde:

ETc = Evapotranspiração da Cultura;

ETo = Evapotranspiração de Referência;

K_c = Coeficiente de Cultivo.

Já o cálculo da evapotranspiração de referência (E_{To}) (HARGREAVES; SAMANI, 1985) foi com base em dados climáticos (Equação 5).

Equação 5: Cálculo da Evapotranspiração de Referência

$$E_{To} = 0,0023 * (T_{med} + 17,8) * (T_{max} - T_{min})^{0,5} * Q_a$$

Onde:

E_{To} = Evapotranspiração de referência (em mm/dia);

T_{med} = Temperatura média diária do ar (em graus Celsius);

T_{max} = Temperatura máxima diária do ar (em graus Celsius);

T_{min} = Temperatura mínima diária do ar (em graus Celsius);

Q_a : Radiação solar extraterrestre (em MJ/m²/dia)

Os dados climáticos de temperatura e radiação solar foram obtidos através da Estação Meteorológica da Fazenda Capim Branco (UFU). O cálculo do K_c foi através do método de Kamble et al. (2013) (Equação 6):

Equação 6: Cálculo do Coeficiente de Cultivo - K_c .

$$K_c = 1,457 * NDVI - 0,1725$$

No que diz respeito aos dados do coeficiente de cultivo, foi atribuído um coeficiente a cada dia analisado, uma vez que o cálculo foi baseado no NDVI diário. Os valores calculados da E_{Tc} , índices de vegetação e atributos físico-hídricos do solo foram submetidos a análise de correlação de Pearson. Para gerar os mapas de capacidade de água disponível, ponto de murcha e capacidade de campo foi utilizado o complemento do Qgis, Smart Map-SMP (PEREIRA et al., 2022), sendo a interpolação dos dados obtidos a partir da malha por meio de krigagem.

4. RESULTADO E DISCUSSÕES

Foram observadas correlações positivas entre a E_{Tc} e o NDWI para as datas avaliadas (Tabela 1). De acordo com Reyes-González (2018), os índices de vegetação apresentam forte

correlação com a evapotranspiração da cultura (ETc), sendo útil para estimar o consumo de água ou a evapotranspiração das culturas em escalas regional e de campo.

Tabela 1. Correlação entre os valores de evapotranspiração da cultura (ETc) e o índice NDWI para as datas avaliadas.

	NDWI			
	Pré Semeadura	29 DAP	91 DAP	128 DAP
ETc Pré Semeadura	0,69***	0,48***	- 0,08	- 0,15
ETc DAP 29	- 0,14	0,26*	0,09	- 0,12
ETc DAP 91	- 0,13	0,40**	0,97***	0,22
ETc DAP 128	0,19	0,26*	0,66***	0,93***

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$, unicaudal

A menor correlação significativa foi observada aos 29 DAP ($r=0,26$), enquanto que, a maior foi registrada aos 91 DAP ($r=0,97$), em data posterior ao pico de desenvolvimento. De acordo com Magalhães (2006) o ápice de desenvolvimento do milho ocorre aproximadamente entre 50 e 60 dias após o plantio, dependendo das condições climáticas e o material cultivado.

Quando avaliados os mapas dos índices de vegetação e da evapotranspiração (ETc) (Figura 3) pode ser evidenciado similar comportamento entre os dados. No estágio inicial da cultura, quando a demanda de água pelas plantas é baixa, os valores de ETc e NDWI são relativamente baixos. Conforme a cultura do milho se desenvolve e entra no estágio de crescimento máximo, os valores de ETc e NDWI aumentam, indicando maior demanda de água pelas plantas e maior conteúdo de água no solo (ALLEN et al. 1998). À medida que a cultura amadurece e se aproxima da fase de maturação, os valores de ETc começam a diminuir, acompanhados por uma redução nos valores de NDWI (Figura 3). Essa diminuição está associada à redução da atividade vegetativa e à menor demanda de água pelas plantas. Pode ser observado também que essa demanda variou espacialmente para a área em estudo, tendo como causa provável a correlação com os atributos físico-hídricos do solo (Tabela 2).

A correlação entre a ETc e NDWI com os dados físico-hídricos do solo permite evidenciar uma melhor resposta quando avaliada a data de 91 DAP (Tabela 2).

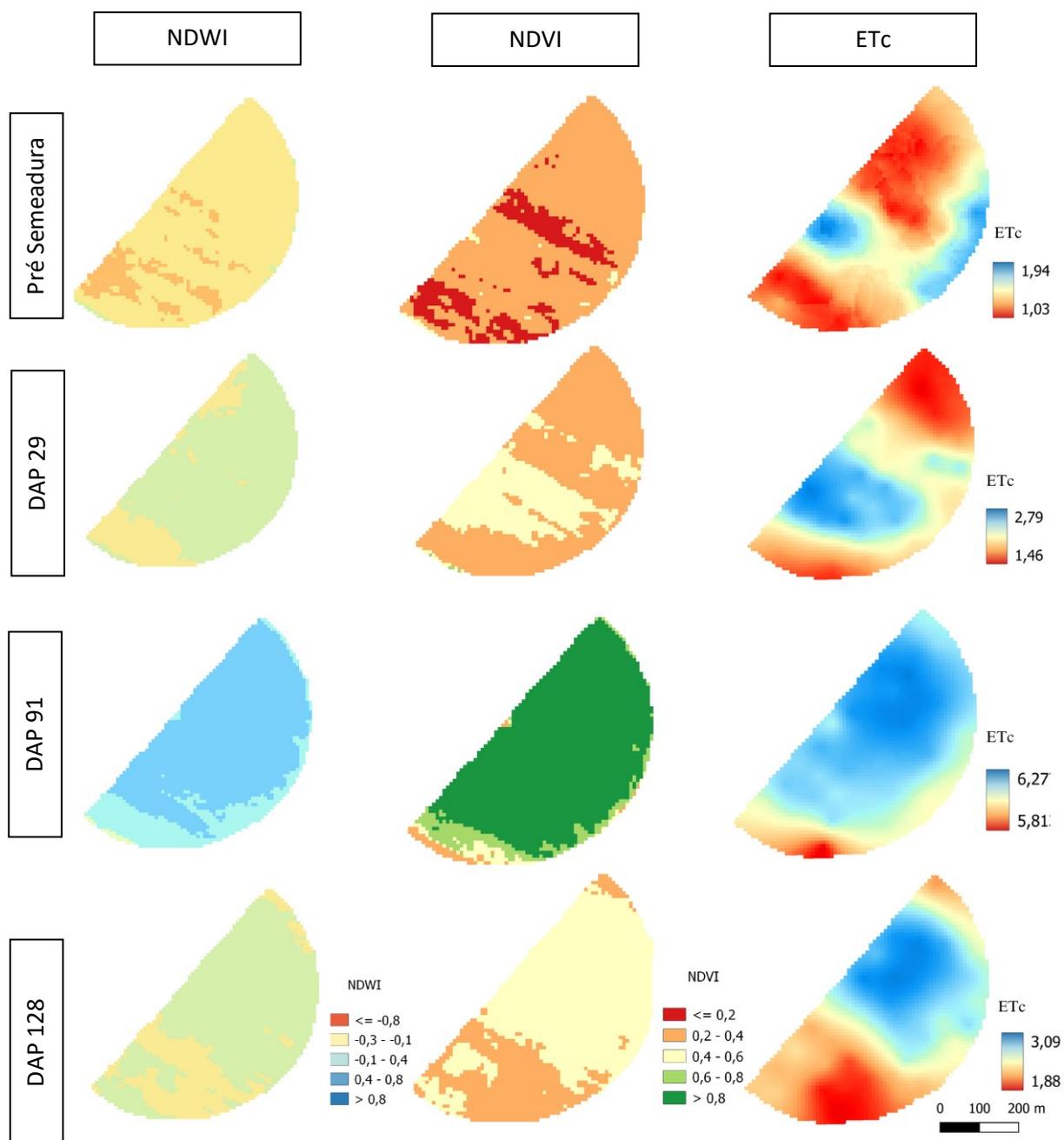


Figura 3. Mapas de evapotranspiração da cultura e índices de vegetação NDVI e NDWI para a área analisada.

Tabela 2. Comparativo dos dados de ETc e NDWI com os recursos físico-hídricos do solo

	Areia	Argila	CE	Macroporos	Microporos	PT	Ds	CAD	CC	PMP	Produtividade
NDWI Pré Semeadura	-0,16	-0,10	0,09	0,13	0,26*	0,26*	-0,24	0,11	0,25*	0,21	-0,10
NDWI DAP 29	-0,04	-0,31	0,37**	-0,04	0,26*	0,18	-0,16	0,10	0,23	0,19	0,15
NDWI DAP 91	-0,69	0,33*	0,39**	0,06	0,70***	0,57***	-0,47	-0,03	0,68***	0,67***	0,28*
NDWI DAP 128	-0,47	0,06	0,07	-0,10	0,50***	0,34**	-0,58	0,20	0,4**	0,28*	0,33**
ETc Pré Semeadura	0,08	-0,02	0,26*	-0,11	-0,05	-0,09	0,24*	0,07	0,06	0,08	0,24*
ETc DAP 29	0,26*	0,03	0,35**	-0,37	-0,27	-0,39	0,35**	0,05	-0,17	-0,17	0,56***
ETc DAP 91	-0,54	0,25*	0,40**	0,06	0,55***	0,46***	-0,32	-0,04	0,57***	0,57***	0,27*
ETc DAP 128	-0,66	0,16	0,19	-0,03	0,69***	0,52***	-0,70	0,16	0,57***	0,48***	0,33**

¹CE=Condutividade Elétrica; PT=Porosidade Total; Ds=Densidade; CAD=Capacidade de Água Disponível; CC=Capacidade de Campos; PMP=Ponto de Murcha Permanente. Nota. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001, unicaudal.

Podemos observar que a microporosidade e a porosidade total, apresentam uma correlação positiva em relação a ETc e o NDWI. Esses atributos físicos desempenham papel fundamental no desenvolvimento de cultivos e na qualidade do solo. A microporosidade influencia a capacidade do solo em reter água e nutrientes, fornecendo condições ideais para o crescimento das raízes das plantas (MOTA et al., 2008).

A porosidade total, que inclui tanto os macroporos como os microporos, é essencial para o fluxo de água e a aeração do solo. Uma porosidade total adequada garante uma boa infiltração de água, evitando a erosão e a lixiviação de nutrientes (SALLES et al., 2019). Além disso, a porosidade total influencia a capacidade do solo em armazenar água disponível para as plantas durante períodos de déficit hídrico (JOSÉ et al., 2018).

Por sua vez, a densidade do solo apresentou correlação com a ETc no momento da pré-semeadura ($r = 0,24$) e aos 29 DAP ($r = 0,36$). Por sua vez, uma alta densidade do solo resulta em uma menor porosidade e dificulta a penetração das raízes e a absorção de água e nutrientes (KLEIN, 2000).

A capacidade de campo (CC) é um indicador chave para avaliar a capacidade de retenção de água do solo, influenciando diretamente a disponibilidade hídrica para as plantas.

Por outro lado, o ponto de murcha permanente (PMP) está relacionado à capacidade do solo em reter água disponível para as plantas durante períodos de estresse hídrico (SANTOS, 1997). Ambos atributos permitiram evidenciar correlação significativa com o NDWI ($r = 0,68$) e com a ETc ($r = 0,58$), apresentando na parte inferior da área os menores valores (Figura 4).

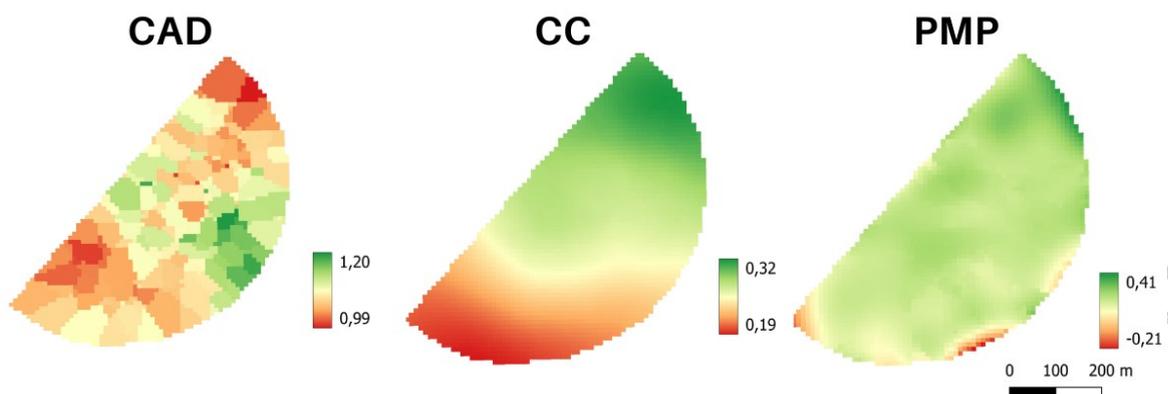


Figura 4. Mapas de distribuição espacial dos atributos capacidade de água disponível (CAD), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) para área avaliada.

A correlação entre a capacidade de campo, a capacidade de água disponível e o ponto de murcha permanente desempenha um papel fundamental no manejo da irrigação em uma determinada área, já que a necessidade hídrica condiciona o desenvolvimento da planta (BALDO et al. 2009). Valores baixos desses indicadores, podem indicar que o solo possui baixa capacidade de retenção de água e disponibilidade hídrica para as plantas (FERRARI, 2015). Dessa maneira, o solo não consegue reter uma quantidade suficiente de água após a drenagem do excesso, resultando em menor reserva de água para as plantas.

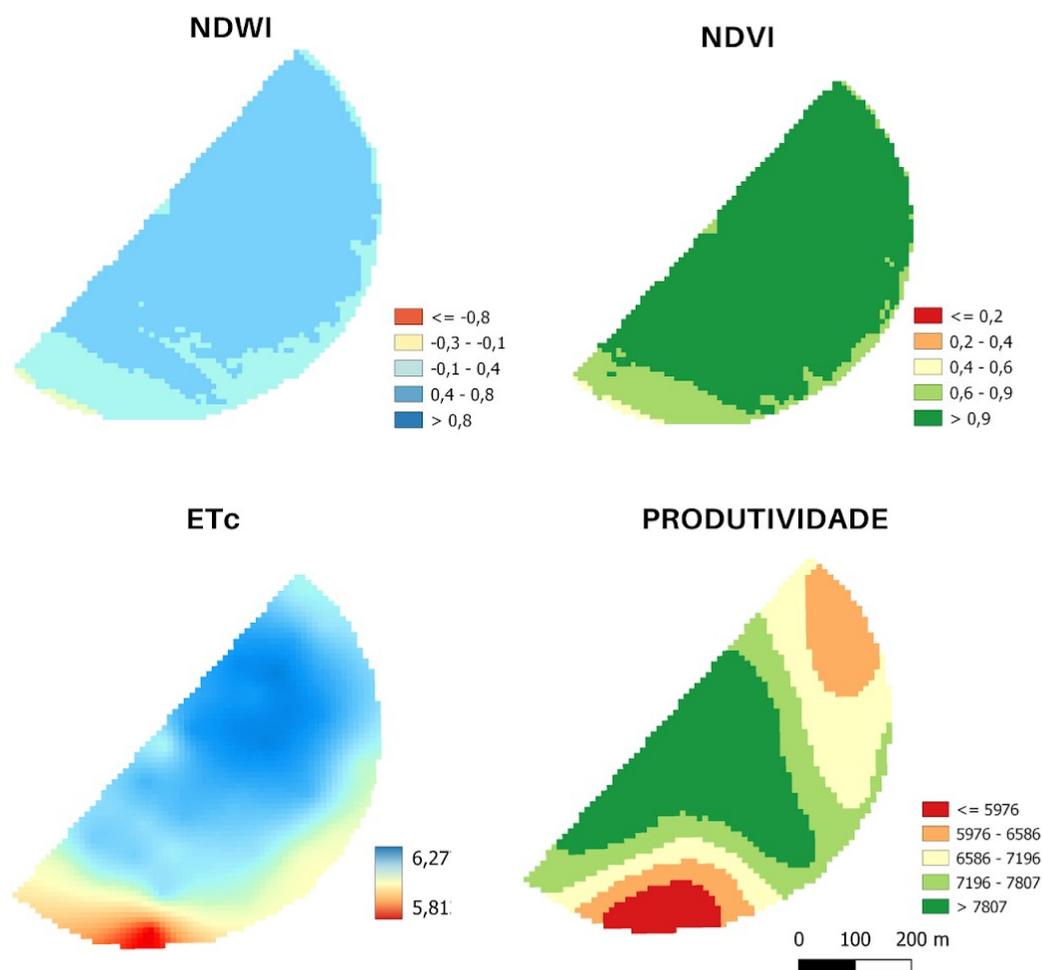
Com base nos dados apresentados foi observado que aos 91 DAP houve maior correlação entre a ETc e NDWI (Tabela 1). Para essa data é observado também o menor valor dos índices NDWI, NDVI e da produtividade na parte inferior do pivô (Figura 4).

Os baixos valores de NDVI estariam demonstrando uma baixa sanidade da vegetação, podendo ser interpretado como deficiências nutricionais, falta de água, doenças ou pragas que estariam prejudicando o desenvolvimento das plantas (DA SILVA, 2013).

A menor correlação entre ETc e NDWI indica uma vulnerabilidade quanto ao teor de água na área em questão (PEREIRA, 2018). Essa fragilidade pode ser constatada por meio de

estudos conduzidos por Reis (2019) e Lepasqueur (2022), os quais observaram maior compactação do solo na camada inferior do pivô.

Figura 4. Comportamento espacial dos índices espaciais NDWI, NDVI, da evapotranspiração da cultura (ETc) e da produtividade, aos 91 DAP para a área de estudo.



A presença de compactação em camadas subsuperficiais do solo, caracterizada por altos valores de densidade do solo (Ds) é geralmente associada à redução da porosidade total e macroporosidade, devido ao uso intensivo de maquinário e irrigação. Isso resulta na eluviação de partículas finas (URCHEI et al., 1995; SANTOS; RIBEIRO, 1997) e tem implicações diretas na capacidade de infiltração e retenção de água.

A presença de matéria orgânica é associada à melhor agregação do solo, maior capacidade de retenção de água e menor Ds, como corroborado por Pedrosa (2021) ao trabalhar

na mesma área do presente estudo. Além disso, a textura do solo, especialmente a areia, influencia a capacidade de água disponível, D_s e a resistência à penetração. Essas evidências apontam para a existência de problemas na gestão da água no solo nessa região do pivô, uma vez que são observados valores reduzidos, tanto nos índices de vegetação, como nos recursos físico-hídricos do solo.

O monitoramento regular de índices de vegetação, como o NDWI e NDVI, pode desempenhar um papel importante na gestão da irrigação da propriedade agrícola. Ao detectar alterações nas condições hídricas do solo, os produtores podem tomar decisões mais embasadas sobre o gerenciamento do insumo hídrico, otimizando seu uso e contribuindo para uma gestão mais eficiente da irrigação.

5. Conclusão

A correlação entre o índice NDWI e a evapotranspiração da cultura-ETc, principalmente em estágios mais avançados da cultura, permite direcionar o uso do NDWI como potencial indicador para a estimativa da ETc.

Há correlação entre a ETc (estimada com base em dados meteorológicos e NDVI) e o conteúdo hídrico do solo.

A data correspondente aos 91 dias após o plantio foi adequada para o estudo da relação entre os índices de vegetação e os atributos físico-hídricos do solo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao**, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ALBUQUERQUE, P. E. P. **Estratégias de manejo de irrigação: exemplos de cálculo**. 2010.
- ANDRADE, A. S. et al. **Determinação da curva de retenção de água no solo em laboratório**. 2007.
- AYERS, R. S. et al. **Water quality for agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985.
- BALDO, R. et al. Comportamento do algodoeiro cultivar Delta Opal sob estresse hídrico com e sem aplicação de bioestimulante. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1804-1812, 2009.
- BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, p. 1-9, 2013.
- BRASIL. **Projeções do agronegócio: Brasil 2020/21a 2030/31: projeções de longo prazo. 2021**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/>. Acesso em: 08 jan. 2023.
- BRITO, L. T. L.; SILVA, A. S.; PORTO, E. R. **Disponibilidade de água e a gestão dos recursos hídricos**. 2007.
- CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to remote sensing**. Guilford press, 2011.
- CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. CRC press, 2007.
- CLEVERS, J. G. P. W; KOOISTRA, L.; VAN den BRANDE, M. M. M. Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. **Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 405, 2017.
- COELHO, A. M. **Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e culturas**. 2005

CONTINI, E.; ARAGÃO, A. O Agro Brasileiro alimenta 800 milhões de pessoas. **Brasília: Embrapa**, 2021.

DE ABREU, K. M. P.; COUTINHO, L. M. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. **Revista Vértices**, v. 16, n. 1, p. 177-202, 2014.

DOORENBOS, J. et al. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 1981.

ESA. **GMES Sentinel-2 Mission Requirements Document**, European Space Agency, 2016. Disponível em: https://esamultimedia.esa.int/docs/GMES/Sentinel-2_MRD.pdf Acesso em: 25.out.2022.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Sentinel online**. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>. Acesso em: 18 jan. 2023.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Sentinel-2 MSI introduction**. 2020. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi> Acesso em: 10 dez. 2022.

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A. C. Déficit hídrico e altas temperaturas no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015.

FILELLA, I. et al. Reflectance assessment of seasonal and annual changes in biomass and CO₂ uptake of a Mediterranean shrubland submitted to experimental warming and drought. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 308-318, 2004.

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.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. **Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão**. BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M. p. 74-83, 2014.

GU, Y. et al. Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 22, 2008.

HABOUDANE, D. et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote sensing of environment**, v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004.

- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied engineering in agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.
- INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. **Agricultura de precisão**. BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H., p. 21-33, 2014.
- JENSEN, M. E., BURMAN, R. D., ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York, ASCE, 1990, 332 p. (Manual No. 70)
- JOSÉ, J. V. et al. Determinação da velocidade de infiltração básica de água em dois solos do noroeste do estado do Paraná. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 6, n. 1, 2013.
- KAMBLE, B.; KILIC, A.; HUBBARD, K. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. **Remote sensing**, v. 5, n. 4, p. 1588-1602, 2013.
- KANG, S. et al. Benefits of CO₂ enrichment on crop plants are modified by soil water status. **Plant and soil**, v. 238, p. 69-77, 2002.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, v. 30, p. 959-964, 2000.
- LI, X. et al. Deficit irrigation provokes more pronounced responses of maize photosynthesis and water productivity to elevated CO₂. **Agricultural Water Management**, v. 195, p. 71-83, 2018.
- LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. **Remote sensing and image interpretation**. John Wiley & Sons, 2015.
- LIMA, E. P. et al. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. **Revista Ceres**, v. 61, p. 17-27, 2014.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Oficina de Textos, 2015.
- MARTIN, J. D. et al. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. **Irriga**, v. 1, n. 01, p. 192-205, 2012.
- MAGALHAES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. 2006.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. **Universidade de Brasília, Brasília**, 2012.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, p. 963-969, 2004.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. **Agricultura de precisão**. Oficina de textos, 2015.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão no Brasil: estado atual, avanços e principais aplicações. **13º Curso Internacional de Agricultura de Precisión con agregado de valor de origen**, 2014.

MOTA, J. C. A. et al. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 49-58, 2008.

MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, 2007.

OLIVEIRA, R. P. Agricultura de precisão: a Tecnologia da Informação em suporte ao conhecimento agrônômico clássico. **Revista Tecnologia & Cultura**, v. 11, n. 15, p. 63-71, 2009.

OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Embrapa: Brasília, 2015.

ONU, United nations, department of economic and social affairs. **The United Nations, Population Division, Population Estimates and Projections Section, 2022**. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/06/1794212>. Acesso em: 15 dez. 2022.

ORTIZ, J. L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PEDROSA, G. M. et al. **Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e sua relação com a produtividade do sorgo**. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2021.

PENUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n. 2, p. 221-230, 1995.

PEREIRA, G. W. et al. Smart-map: An open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. **Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1350, 2022.

PEREIRA, L. S. et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4-20, 2015.

PEREIRA, L. E. et al. Análise comparativa entre métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em área úmida continental. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 2, p. 654-662, 2018.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. L. Meteorologia Agrícola. **Departamento de Ciências Exatas, ESALQ, USP**, 2007.

QGIS Development Team, 2022. QGIS Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project**. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 10 dez. 2022.

R CORE TEAM. R: **A Language and environment for statistical computing**. Versão 4.1. Software de computador. Disponível em: <https://cran.r-project.org>. Acesso em: 20 mar. 2023.

REIS, N. C. **Resistência do solo à penetração na análise espacializada da produtividade de soja**. 18f. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2019.

REYES-GONZÁLEZ, A. et al. Estimation of crop evapotranspiration using satellite remote sensing-based vegetation index. **Advances in Meteorology**, v. 2018, p. 1-12, 2018.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3-4, p. 252-263, 2009.

SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento remoto para desastres**. Oficina de Textos, 2015.

SALES, L. E. O. et al. Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 2091-2095, 1999.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, p. 287-294, 1998.

- SANTOS, E. E. F.; RIBEIRO, M. R. Influência da irrigação e do cultivo nas propriedades de um Latossolo e um Argissolo da região do submédio São Francisco: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 875-884, 2000. (SILVA 1997)
- SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, n. 1, p. 1-7, 1996.
- SILVA, F. C. et al. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009., 2009.
- SILVA, L. G.; GALVÍNCIO, J. D. Análise Comparativa da Variação nos Índices NDVI e SAVI no Sítio PELD-22, em Petrolina-PE, na Primeira Década do Século XXI (Comparative Analysis of Changes in NDVI and SAVI in PELD-22-Petrolina-PE, in the First Decade of the XXI Century). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 6, p. 1446-1456, 2013.
- SOUZA, L. M. **Compactação do solo e o impacto na variação espacial de atributos físico-hídricos e produtividade da soja**. 26f. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2020.
- SHIRATSUCHI, L. S. et al. **Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão**. BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J.M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H. p. 58-73, 2014.
- STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, p. 1301-1309, 2013
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação**. 1995.
- TEIXEIRA, P. C.; et.al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPS). Brasília/DF, 2017.
- TELUGUNTLA, P. et al. **Global Cropland Area Database (GCAD) derived from remote sensing in support of food security in the twenty-first century: current achievements and future possibilities**. 2015.
- TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. de M. **Gestão da água no Brasil**. 2001.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

URCHEI, M. A. et al. Efeitos do plantio direto e do preparo convencional sobre alguns atributos físicos de um latossolo vermelho-escuro argiloso, sob pivô central. **Irriga**, v. 1, n. 3, p. 8-15, 1996.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. **International journal of remote sensing**, v. 27, n. 14, p. 3025-3033, 2006.