



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

ALLEF DE SOUZA SILVA

**SENSORIAMENTO REMOTO SUBORBITAL DE ALTA RESOLUÇÃO NO
MONITORAMENTO DO DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO EM CANA-
SOCA IRRIGADA**

**AREIA
2023**

ALLEF DE SOUZA SILVA

**SENSORIAMENTO REMOTO SUBORBITAL DE ALTA RESOLUÇÃO NO
MONITORAMENTO DO DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO EM CANA-
SOCA IRRIGADA**

Trabalho de graduação apresentado à
Coordenação do Curso de Agronomia, do
Centro de Ciências Agrárias, da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Valéria Peixoto
Borges

**AREIA
2023**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586s Silva, Allef de Souza.

Sensoriamento remoto suborbital de alta resolução no monitoramento do desenvolvimento vegetativo em cana-soca irrigada / Allef de Souza Silva. - Areia:UFPB/CCA, 2023.

45 f. : il.

Orientação: Valéria Peixoto Borges.
TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. NDVI. 3. ARP. 4. Cana-de-açúcar. I. Borges, Valéria Peixoto. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635(02)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE AGRONOMIA**

DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aprovada em 14/06/2023

“Título: SENSORIAMENTO REMOTO SUBORBITAL DE ALTA RESOLUÇÃO NO MONITORAMENTO DO DESENVOLVIMENTO VEGETATIVO EM CANA-SOCA IRRIGADA”

Autor: **ALLEF DE SOUZA SILVA**

Banca Examinadora:

Valéria Peixoto Borges

Prof.^a. Dr.^a. Valéria Peixoto Borges
Orientadora – UFPB

Davi de Carvalho Diniz Melo

Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo
Examinador – UFPB

Fabio Mielezski

Prof. Dr. Fabio Mielezski
Examinador – UFPB

Aos meus pais, Gilson Justino da Silva e Elialda de Souza Silva, e ao meu filho Miguel de Souza Farias, por todo carinho e apoio durante esta caminhada acadêmica, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha vida, por estar sempre ao meu lado me protegendo de todas as formas, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo desses anos de estudo.

Aos meus pais Gilson Justino e Elialda Souza por todo amor para comigo, por sempre me apoiar e incentivar minha formação me ajudando de todas as formas possíveis, ao meu filho Miguel Farias e minha namorada Maria Eduarda por todo amor, carinho e compreensão, a minha irmã Raquel Souza e meus sobrinhos Isabela Souza e Mateus Souza por todo carinho e momentos felizes, aos meus avós José de Souza, Damiana de Oliveira e Maria da Penha (*in memoriam*) por todos os ensinamentos, e de modo geral, a todos familiares que de forma direta ou indireta me ajudaram nessa caminhada.

A todo corpo docente do curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da UFPB, em especial a minha orientadora Prof^{ca}. Dra. Valéria Peixoto Borges por todo conhecimento repassado a mim, por toda disponibilidade, e por toda ajuda para que este trabalho fosse realizado, ao Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo, assim como, ao Prof. Dr. Péricles de Farias Borges por todas as oportunidades e ensinamentos, vocês foram essenciais na minha formação tanto pessoal quanto profissional.

Aos amigos verdadeiros que encontrei durante esta minha caminhada acadêmica, a exemplo de: Alexandre Ferreira, João Victor, Mayra Alves, Murilo Paiva, Wagner Pontes. Em especial ao meu amigo que considero como irmão José Jurandez, colega de turma e companheiro de alojamento que sempre me ajudou em vários momentos. Obrigado a todos vocês pela amizade verdadeira e por todos os momentos juntos.

Às minhas amigas do Projeto Cana-Drone Ericka Aguiar e Germana Pontes, por toda troca de conhecimento e ajuda nos dias de campo.

A Universidade Federal da Paraíba e ao Centro de Ciências Agrárias pela oportunidade e incentivo.

A todos os funcionários da Centro de Ciências Agrárias, em especial a lenda viva do CCA, Seu Assis do R.U.

Dessa forma, minha eterna gratidão a todos vocês que fizeram parte desta caminhada. Que Deus abençoe grandemente a vida de cada um de vocês. Obrigado!

“Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos.”

Provérbios 16:3

RESUMO

A cana-de-açúcar desempenha um papel fundamental tanto para a sociedade quanto para a economia, sendo o Brasil o maior produtor mundial desta cultura. A irrigação tem sido uma ferramenta importante para garantir o crescimento e produção da cana-de-açúcar. As Aeronaves Remotamente Pilotadas – ARPs têm sido consideradas excelentes aliadas no sensoriamento remoto de alta resolução para fins de monitoramento do plantio, utilizando índices como o mapeamento do NDVI, que se configura como uma técnica de classificação da cobertura vegetal da cultura. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi analisar, através do sensoriamento remoto de alta resolução, a resposta espectral e o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, em três regimes de irrigação, na Zona da Mata Paraibana. A área de estudo foi uma plantação de cana-de-açúcar pertencente à usina Japungu Agroindustrial (6°53'5,32" S;35°2'5,52" O), constituída de três parcelas experimentais com regimes de irrigação diferentes: 40, 60 e 80 mm mensais. Uma estação meteorológica forneceu os dados para caracterização ambiental e voos quinzenais foram realizados com a ARP Phantom 4 RTK com câmera multiespectral para mapeamento do NDVI. Observou-se que o NDVI foi eficaz no monitoramento vegetativo do plantio da cana-de-açúcar. Os maiores valores de NDVI foram registrados na fase anterior ao florescimento e, neste estágio, o índice sofreu uma decaída. Não foi encontrada diferença expressiva do NDVI entre as parcelas de irrigação, apesar de que na lâmina de 40 mm os menores valores de NDVI foram registrados. Outros fatores, como a ocorrência de precipitações e insetos pode ter causado variabilidade no NDVI, sem correlação direta com o regime hídrico que a planta estava sofrendo. Assim, mais estudos são necessários para chegar a conclusões precisas sobre a resposta do índice de acordo com o suplemento de irrigação recebido, nas condições de estudo.

Palavras-Chave: ndvi; arp; cana-de-açúcar.

ABSTRACT

Sugarcane plays a fundamental role both for society and for the economy, and Brazil is the first producer in the world. Irrigation has been an important tool to guarantee the growth and production of sugarcane. Remotely Piloted Aircraft – RPAs have been considered excellent allies in high-resolution remote sensing for crop monitoring, using indices such as NDVI mapping, which is a method for classifying the vegetation cover of the crop. Thus, the objective of this research was to monitor, through high-resolution remote sensing, the spectral response and the development of the sugarcane crop, in three irrigation regimes, in the Zona da Mata Paraibana region. The study area was a sugarcane field belonging to the Japungu Agroindustry (6°53'5.32" S;35°2'5.52" W), consisting of three experimental plots with different irrigation schedules: 40, 60 and 80 mm monthly. A meteorological station provided the data for environmental characterization and fortnightly flights were performed with an ARP Phantom 4 RTK carrying a multispectral camera for mapping the NDVI. As a result, NDVI was effective in the vegetative monitoring of the sugarcane plantation. The highest values of NDVI were registered in the phase just before flowering and, in this stage, NDVI had a decline. No expressive difference was found in the NDVI between the irrigation plots, although in the 40mm schedule the lowest NDVI values were recorded. Other factors, such as the precipitation and insect's attacks, may have caused variability in the NDVI, despite the water regime that the crop was suffering. Thus, more studies are needed to reach precise conclusions about the response of the index according to the irrigation supplement received, under the study conditions.

Keywords: ndvi; arp; sugar cane.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática das fases fenológicas da cana-de-açúcar. Fonte: MARIN (2009).	14
Figura 2 - Exemplos ilustrativos do método manual (I), do método com veículo terrestre (II) e do método com ARP (III). Fonte: Barbosa Júnior (2021).	21
Figura 3 - Mapa da Paraíba, delimitação do município de Rio tinto e ponto no local da área de estudo (A); Área de desenvolvimento do experimento (B); Estação micrometeorológica instalada na área do experimento (C).	24
Figura 4 - Delimitação da Área com suas respectivas lâminas de irrigação.	25
Figura 5 - ARP Phantom 4 RTK multispectral (A); Câmera multispectral embarcada no P4M (B).	26
Figura 6 - Pontos de controle distribuídos na área de estudo, destacados em vermelho.	27
Figura 7 - Tela do software Pix4d apresentando a nuvem de pontos.	28
Figura 8 - Tela do pix4d apresentando a lista de índices.	28
Figura 9 - Estação micrometeorológica instalada na área de estudo. Fonte: NASCIMENTO (2022).	29
Figura 10 - Gráfico apresentando os dados de radiação solar e de precipitação.	30
Figura 11 - Gráfico apresentando os dados de umidade relativa e da temperatura do ar.	31
Figura 12 - Ortomosaicos de NDVI do período de análise.	35
Figura 13 - Imagem de câmera RGB da cana-de-açúcar no dia 12/05/2023, onde verifica-se o pendão de inflorescência, nas áreas mais claras (destacadas com retângulos).	36
Figura 14 - Tela do Pix4D apresentando a geoestatística do NDVI para cada uma das parcelas no dia 04/11/2022. A) parcela de 80mm; B) parcela de 60 mm; C) parcela de 40 mm.	38
Figura 15 - Tela do Pix4D apresentando a geoestatística do NDVI para cada uma das parcelas no dia 28/04/2023. A) parcela de 80mm; B) parcela de 60 mm; C) parcela de 40 mm.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise estatística dos pixels de NDVI nos dias 04/11/2022 e 25/11/2022.....	32
Tabela 2 - Análise estatística dos pixels de NDVI nos dias 01/02/2023 e 24/03/2023.....	33
Tabela 3 - Análise estatística dos pixels de NDVI nos dias 28/04/2023 e 12/05/2023.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARPs	Aeronaves Remotamente Pilotadas
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DSM	Modelo Digital de Superfície
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GCPs	Pontos de Controle de Solo
GCS	Estação de Controle Terrestre
GPS	Sistema de Posicionamento Global
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
OBIA	Imagem Baseada em Objetos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	A cana-de-açúcar	13
2.2	Variedade RB92579	15
2.3	Irrigação da cana-de-açúcar	16
2.4	Aeronaves remotamente pilotadas – ARPS na agricultura	18
2.5	Índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Área de estudo	24
3.2	Irrigação	25
3.3	Imageamento multiespectral	26
3.4	Obtenção dos pontos de controle	26
3.5	Processamento das imagens	27
3.6	Dados meteorológicos	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	Condições meteorológicas registradas	29
4.2	Análise do NDVI	31
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum*, spp.), apresenta grande importância, tanto do ponto de vista econômico quanto do social, tendo em vista que é uma ótima fonte de energia renovável. De acordo com uma estimativa da CONAB (2023), o Brasil teve uma área colhida de aproximadamente 8,2 milhões de hectares, e uma produção de 610,1 milhões de toneladas na safra 2022/23. Tal produção, destina-se principalmente para a fabricação de açúcar e etanol.

Essa cultura apresenta uma grande capacidade fotossintetizante, sendo isso uma característica marcante nas plantas com metabolismo C4. Tais plantas possuem uma alta concentração de CO₂ devido a diminuição da fotorrespiração, e atingem assim, uma maior taxa de fotossíntese quando se tem uma radiação solar mais elevada (ALVES et al., 2021).

A necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia de acordo com alguns fatores, por exemplo, seu local de cultivo, sua variedade, fase de desenvolvimento, entre outros. Os estádios de desenvolvimento em que a cultura mais necessita de água são na emergência e no estabelecimento, já a fase de desenvolvimento que menos requer água é a maturação (MARIN et al., 2009 apud DOOREMBOS & KASSAN, 1979). A quantidade de água disponível para a planta influencia diretamente no desenvolvimento da mesma e, conseqüentemente, na produção de sacarose pela cana-de-açúcar (ROBERTO et al., 2015).

A agricultura de precisão está consolidada e vem sendo impulsionada por novas tecnologias, como é o caso das aeronaves remotamente pilotadas (ARP). O desenvolvimento dessas aeronaves na última década facilitou a obtenção de imagens de sensoriamento remoto em alta resolução espaço-temporal, gerando informações mais detalhadas da vegetação, alcançando diversos ângulos de observação que não são possíveis em nível de campo (DOS SANTOS et al., 2021).

Existem várias técnicas que são utilizadas na classificação da cobertura vegetal na agricultura de precisão, ao exemplo do mapeamento do NDVI, sigla em inglês, cuja tradução é Índice de Vegetação por Diferença normalizada, é uma das mais utilizadas (DE SOUZA et al., 2022). O NDVI, utiliza as bandas espectrais do infravermelho próximo e do vermelho, permitindo uma avaliação da mudança do vigor vegetativo, além de ser capaz de relacionar parâmetros como biomassa e produtividade (DE SOUZA et al., 2022).

O NDIV é capaz de determinar a condição hídrica das culturas através de algumas características que as mesmas apresentam quando estão com déficit hídrico ou em boas condições de umidade. Por exemplo, no caso da escassez de água, ocorre a diminuição da clorofila e conseqüentemente o amarelecimento das folhas, causando assim, mudanças na

reflectância da planta (ZHANG et al., 2019).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar, através do sensoriamento remoto de alta resolução, a resposta espectral e o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, em três regimes de irrigação, na Zona da Mata Paraibana.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cana-de-açúcar

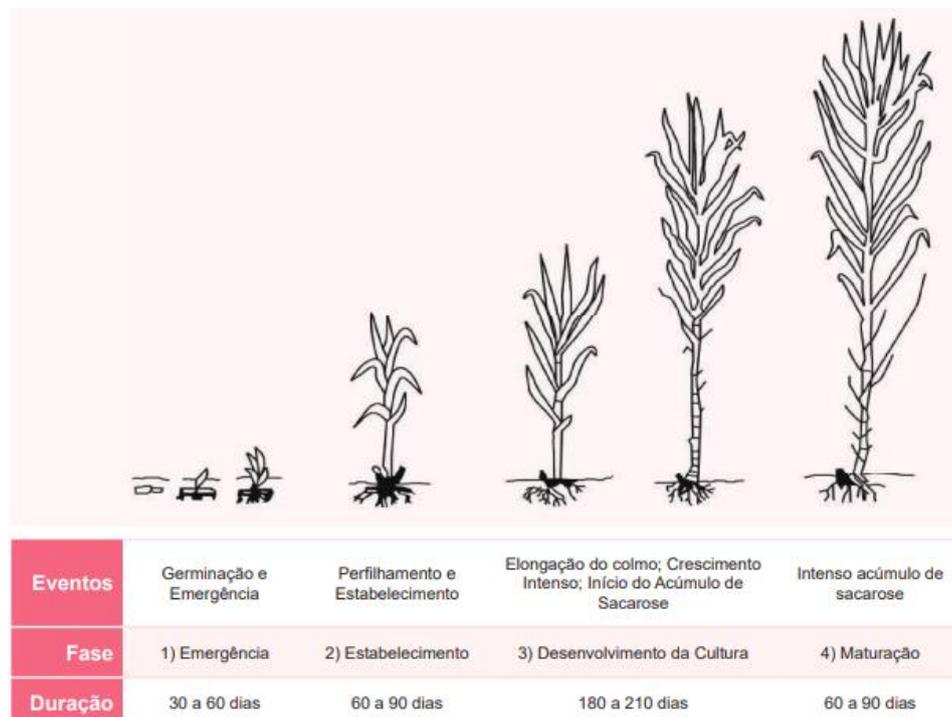
A cana-de-açúcar é uma planta semiperene com ciclo em torno de seis anos, e pertencente ao gênero *Saccharum*. Existem atualmente algumas cultivares que são híbridos interespecíficos, como é o caso das espécies *Saccharum officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (TOPPA et al., 2010). É uma planta monocotiledônea, alógama, da família das Poaceas e tem como principal característica a conversão em sacarose para os colmos (MELO, 2017). A chegada da cana-de-açúcar ao Brasil se deu logo após o descobrimento do país, com o intuito de diminuir o poderio francês no suprimento mundial de açúcar, o qual era oriundo das colônias caribenhas (CANABRAVA, 2005). Na segunda metade do século XVI a cultura ganhou importância econômica mais expressiva quando os engenhos do Nordeste brasileiro passaram a operar nos estados de Alagoas, Bahia, Paraíba, Pernambuco e Sergipe. Nos estados do Amazonas e Pará, os engenhos foram orientados a produzir cachaça, e a implantação da cultura nesses estados ocorreu no século XVII e, em seguida, nos estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte (MARIN et al., 2013). No século XIX ocorreu a redução da importância do Brasil no mercado mundial devido à expansão dos polos produtores de açúcar pelo mundo, e assim, houve o comprometimento da viabilidade econômica da atividade interna no país. Neste mesmo período, São Paulo e Rio de Janeiro se firmaram como polos fornecedores para as regiões Sul e Sudeste. No ano de 1933 foi criado o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), o qual tinha o propósito de regular a produção interna e desenvolver pesquisas sobre a cultura (MARIN et al., 2013).

O desenvolvimento da cana-de-açúcar ocorre em forma de touceiras, onde a parte aérea é composta por colmos, folhas, inflorescências e sementes, enquanto a parte subterrânea é formada por raízes e rizomas (MOZAMBANI et al., 2006). A cana-de-açúcar apresenta um sistema radicular ramificado, do tipo fasciculado, apresentando uma elevada quantidade de raízes nas camadas mais superficiais do solo. Estima-se que nos primeiros 50 cm de

profundidade encontra-se cerca de 85% da massa radicular total e, em torno de 60%, nos primeiros 30 cm de profundidade (MARIN et al., 2009).

A cana-de-açúcar apresenta quatro estádios de crescimento bem definidos (Figura 1): o primeiro estágio é a emergência e dura de 30 a 60 dias; o segundo é o estabelecimento, caracterizado pelo perfilhamento, e tem duração de 60 a 90 dias; o terceiro é o desenvolvimento da cultura, onde se tem o crescimento intenso da planta com alongamento dos colmos e início do acúmulo de sacarose sendo o estágio mais demorado com uma duração de 180 a 210 dias; e o quarto é a maturação, esse estágio tem de 60 a 90 dias de duração e caracteriza-se pelo intenso acúmulo de sacarose (MARIN et al., 2009).

Figura 1 - Representação esquemática das fases fenológicas da cana-de-açúcar. Fonte: MARIN (2009).



Existem vários fatores que podem influenciar no crescimento e desenvolvimento da cana, por exemplo, fatores ambientais como temperatura e umidade, genéticos e fisiológicos, a exemplo da variedade, idade, tamanho e sanidade das gemas e fitotécnicos, como práticas agrícolas realizadas no campo (SERAFIM et al., 2013).

Para que se tenha uma maior facilidade na implantação da cultura, a cana-de-açúcar é multiplicada de forma assexuada através de propagação vegetativa, mesmo se tratando de uma planta que tem sua reprodução do tipo sexuada (CAIEIRO et al., 2010). A propagação vegetativa da cana-de-açúcar ocorre a partir do “tolete”, que nada mais é do que um pedaço do

colmo da planta, o qual é composto por nós e entrenós. No nó estão presentes a gema (tecido meristemático), a zona radicular com primórdios radiculares, o anel de crescimento, a cicatriz da inserção da bainha da folha no colmo e a zona cerosa (THOMAS, 2016).

O Brasil é o maior produtor e exportador de cana-de-açúcar do mundo, com uma área plantada de 8,2 milhões de hectare e produção de cana-de-açúcar de 610,1 milhões de toneladas na safra 2022/23, aumento de 5,4% em relação à safra anterior. Para o etanol o volume produzido nesta safra ficou acima dos 27 bilhões de litros. A produção de açúcar na safra em questão foi de 37 milhões de toneladas, um acréscimo de 6% frente à safra anterior. No Nordeste, a safra 2022/23 contou com uma área plantada de 871,7 mil hectares, e sua produtividade foi de 64.313 kg/ha, enquanto que, sua produção foi de 56,06 milhões de toneladas. No estado da Paraíba, a produção para a referida safra foi de 7,3 milhões de toneladas, já a produtividade foi 62.080 kg/ha com uma área destinada a produção de 117,6 mil hectares (CONAB, 2023). Os dados citados a cima, demonstra quão importante é a cultura da cana-de-açúcar tanto para o Nordeste quanto para o estado da Paraíba.

2.2 Variedade RB92579

Em todo o Nordeste, a principal cultura cultivada é a cana-de-açúcar, a qual se estende pelo litoral, zona da mata e trechos do agreste, tendo uma correspondência de mais de 10% da produção de todo o país. Dentre os estados que mais produzem, estão Paraíba, Pernambuco e Alagoas, tendo como principais produtos açúcar, álcool e energia elétrica (RIDESA, 2010).

Apesar de serem citadas mais comumente apenas as tecnologias relacionadas à irrigação, há que se falar no melhoramento genético da cana-de-açúcar, que permite maiores níveis de produção e custos menores do que os habituais, tornando viável a produção canavieira. Assim, de acordo com Barbosa (2018), o uso de novas variedades mais produtivas e mais resistentes às pragas e doenças ocasiona maiores ganhos para a agroindústria canavieira.

No ano de 2003, por meio do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar – PMGCA, do Centro de Ciências Agrárias, após determinado período de testes, a Universidade Federal de Alagoas disponibilizou a variedade RB92579 para utilização do setor produtivo canavieira. A RB92579, reconhecida pela Ridesa como aquela que impactou a produtividade da cana-de-açúcar na Região Nordeste, é um resultado de cruzamento biparental, que tem como variedade progenitora a RB75126 fecundada com o pólen da RB72199 (RIDESA, 2010).

Barbosa et al. (2010) aponta as principais características que demonstram o quanto esta

variedade tem altos e satisfatórios níveis de produtividade para a Região Nordeste, sendo elas: bom perfilhamento e fechamento da entrelinha, eficiente brotação das socarias, porte semi-ereto otimizando a colheita, adequada recuperação no que diz respeito aos períodos de estiagem e boa resposta à irrigação, além de apresentar eficiência na utilização de água e dos principais nutrientes. Além desses fatores, bons níveis de sacarose, maturação média com PUI longo, baixo florescimento, apresenta tolerância aos ataques de broca comum, resistência à ferrugem marrom e à escaldadura das folhas e resistência moderada ao carvão.

No entanto, Rodrigues (2021, p. 32) aponta características que impactam na qualidade de produtos secundários:

Contudo, a RB92579 possui elevada cor do caldo, que impactam na qualidade do açúcar e nos custos de refino. Isso pode ser atribuído ao alto teor de fenóis presentes nessa cultivar. Assim, o uso de variedades de baixa cor do caldo é de máxima importância para facilitar os processos industriais e garantir bom nível de qualidade do açúcar.

Este acontecimento demonstra o quanto são difíceis e extensos os estudos e trabalhos que buscam uma variedade com características agroindustriais adequadas.

2.3 Irrigação da cana-de-açúcar

Há alguns anos, a agroindústria canavieira vem migrando do sistema sequeiro para o sistema irrigado, haja vista os inúmeros benefícios que esta mudança significa nos níveis de produtividade da cana-de-açúcar. Contudo, esta transferência de sistemas depende de alguns fatores, como as finanças das empresas produtoras da planta e a adesão às novas tecnologias no agronegócio.

Mesmo em locais consideravelmente úmidos, problemas relacionados à falta de água no solo são bastante comuns nos canaviais. Isto se dá porque a planta precisa de água em volume e períodos específicos, o que dificilmente ocorrerá de forma natural com as chuvas. Por este motivo, é fundamental manter um manejo que ofereça quantidades adequadas de água para que a planta consiga evoluir bem durante todo o seu ciclo de produção (SANTOS, 2021).

De acordo com o portal online da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2018), a cana-de-açúcar demonstra uma necessidade hídrica de 1500 a 2500 mm por ciclo vegetativo. A partir de informações relativas ao estresse hídrico do solo condizente

com cada etapa do ciclo produtivo, o manejo de água deve ocorrer, respeitando, assim, as necessidades de cada momento em que a planta está inserida e aumentando a produtividade do plantio e expandindo para todos os meses do ano.

A respeito das necessidades hídricas que a cana-de-açúcar apresenta, é interessante, primeiramente, apontar que a planta possui quatro estádios fenológicos definidos: brotação e emergência; perfilhamento – caracterizado pelo início do perfilhamento e formação da touceira e pelo auge do perfilhamento –; crescimento dos colmos – caracterizado pelo crescimento radicular vigoroso e pela definição da população final de colmos –; e, maturação dos colmos – caracterizado pela maturação inicial, pela maturação do terço médio, pela maturação final e pelo momento da colheita (MONTEIRO, 2009).

Segundo Ferreira Filho (2019), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar acompanha os diferentes ciclos de crescimento da planta. Além disso, para cada tonelada, a cultura necessita de 10 mm de água. Considerando que cana de açúcar transpira durante o pico de desenvolvimento do dossel, a necessidade vai para 5-6 mm de água/dia. Assim, deve ser oferecido, em média, 1500 a 2500 mm de água, levando em conta o período chuvoso em que a planta foi cultivada.

Considerando que fatores como radiação solar, temperatura e água são essenciais para o desenvolvimento satisfatório da planta, Thomé, Vaz e Groff (2018) apontam que a umidade em excesso ou a falta de água comprometem diretamente o crescimento da cana, devendo a umidade estar entre 80% e 85%, no momento do alongamento rápido da planta, e entre 45% e 65% no momento do acúmulo de açúcar nela. É importante salientar, ainda, que o pico de exigência hídrica é durante a fase de emergência, estabelecimento e quando se tem o máximo crescimento da cultura.

Santos (2021) aponta que “a irrigação promove a sustentabilidade ambiental, econômica e social além de possibilitar incremento na produtividade das culturas”. Assim, por meio desta tecnologia, é possível uniformizar e aumentar a produção da planta, uma vez que por meio da eficiência e frequência do processo irrigatório será possível alcançar níveis satisfatórios de produtividade para a indústria canavieira.

Dentre os mais diversos tipos de equipamentos utilizados em sistemas de irrigação, é possível citar três como principais: o carretel enrolador, o pivô central, rebocável e linear, e o gotejamento superficial e subsuperficial. O primeiro é o sistema mais utilizado e indicado para aplicação de vinhaça, água residuária e salvamento, mas seu custo não é baixo, quando comparado ao do pivô ou gotejamento. O segundo é bastante utilizado para produção irrigada em áreas extensas, podendo ser em três versões: pivô central fixo, pivô central rebocável e pivô

linear. O terceiro é bastante comum, sendo o mais adequado à produção de cana-de-açúcar o gotejamento subsuperficial, pois a sua localização abaixo ou ao lado do plantio faz com que a água penetre diretamente na região radicular (BUFON; MAIA; PEREIRA, 2021).

Segundo o que aponta Santos (2021, p. 21) sobre irrigação:

O manejo apropriado de irrigação tem que sempre manter a umidade do solo próxima a sua capacidade de campo e principalmente próximo a profundidade efetiva das raízes. Outro fator de grande importância como forma de monitoramento da irrigação é a eficiência de aplicação da água sendo que, esta eficiência é conceituada pela relação entre a quantidade de água armazenada na profundidade efetiva do sistema radicular, a quantidade disponível para a cultura e o volume de água aplicada em toda área. Para definir o intervalo e o tempo que existe entre as irrigações e, o volume de água necessário para cada irrigação depende de alguns fatores, como: profundidade efetiva do sistema radicular da cultura e capacidade de retenção de água no solo.

Assim, nos lugares onde os recursos são limitados, tanto os financeiros quanto os de acesso à água, o manejo da irrigação ocorre de maneira a concentrar a quantidade de água que mais demonstre eficiência nos períodos em que houver maior necessidade. A irrigação localizada por gotejamento, por sua vez, demonstra-se uma excelente opção no que diz respeito à utilização de água, com a diminuição do desperdício da mesma, além de economia na mão-de-obra e na energia (BUFON; MAIA; PEREIRA, 2021).

No sistema de irrigação por gotejamento, a água é transportada pela rede de distribuição até chegar nas plantas, despejando o líquido na região radicular, trazendo a umidade necessária apenas na parte superficial do solo, mantendo-se este frequentemente molhado em níveis ideais. Assim, Santos (2021) apresenta entre as vantagens de utilizar este tipo de irrigação: economia de energia e mão-de-obra, não interferência com tratamentos fitossanitários, a irrigação ocorre durante todo o dia, o desperdício de água é menor, uniformização na aplicação de água em todo o plantio e alta eficiência na utilização dela.

2.4 Aeronaves remotamente pilotadas – ARPS na agricultura

As novas tecnologias estão ganhando cada dia mais notoriedade em todos os setores da sociedade. Na agroindústria, essa expansão tecnológica tem surgido em diversos formatos, como é o caso da biotecnologia e dos aparatos tecnológicos da agricultura de precisão, como fora citado anteriormente.

Partindo da ideia de que a agricultura é uma das atividades mais antigas do mundo, cumpre apontar que ela é caracterizada pela cultura de variedades de vegetais em solo. Inicialmente, a produção agrícola era para consumo próprio; contudo, com o passar dos tempos, ainda no período a.C., tal atividade passou a ser uma atividade lucrativa, gerando renda para sustento dos agricultores (CASTANHO; TEIXEIRA, 2017). Assim, é possível observar que a agricultura surgiu e se modificou de acordo com a evolução humana e mudança de costumes dos indivíduos.

Passados milhares de anos e, conseqüentemente, uma quantidade considerável de mudanças, a agricultura era praticada no Brasil pelos índios, que cultivavam diversas culturas para a sua sobrevivência, o que também passou por mudanças após a colonização do país. Ainda no século passado, a agricultura brasileira era retrógrada, sem grande expressividade no mercado nacional e muito menos no internacional. Tinha características ultrapassadas, como trabalho escravo e braçal, pouca utilização de maquinário, muito desperdício e baixo rendimento da atividade (ALVES, 2021).

O cenário começou a mudar a partir da década de 60, quando a industrialização e urbanização passaram a ocorrer no território nacional, impactando diretamente no cenário econômico. Somente neste momento foi possível observar o surgimento e emprego de novas tecnologias e novas tendências que começavam a adentrar a agroindústria (BUFON; MAIA; PEREIRA, 2021).

A utilização de aeronaves no meio agrícola surgiu em 1911, quando Alfred Zimmerman assinou a invenção. A sua criação e utilização cumpriu atividades que apresentaram resultados satisfatórios, como o controle de doenças e pragas, facilidade no semear, e benefícios na fertilização (FURTADO; HOFF, 2017). No Brasil, a primeira utilização de aeronaves para fins agrícolas se deu em 1947.

O fato é que, a partir da primeira utilização, a demanda só aumentou ao longo dos anos. Contudo, adquirir e manter um avião agrícola parecia (e era) algo bastante inalcançável para grande parte dos produtores brasileiros, e o mercado se manteve desigual durante grande período, até o surgimento das Aeronaves Remotamente Pilotadas – ARP.

A legalização de ARPs aconteceu por intermédio da Portaria do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA nº 298, de 22 de setembro de 2021, publicada no Diário Oficial da União. Observa-se o quanto é recente esta regulamentação que tem como principal objetivo regulamentar a operação das ARPs na aplicação de agrotóxicos, fertilizantes, inoculantes e demais produtos da mesma natureza (BRASIL, 2021).

As ARPs, popularmente chamadas de drones, são equipamentos tecnológicos que se

assemelham aos aeromodelos que recebem comandos por meio de controle remoto. Pelas características física/estruturais e de controle, já é possível observar que, quando comparado a um avião agrícola, tais instrumentos demonstram vantagens. Neste sentido, Alves (2021, p. 12-13) aponta:

[...] a operação se revela bastante vantajosa quando se trata da utilização das ARPs, e apresenta inúmeras vantagens como a possibilidade de aplicação em áreas de acesso dificultado, como também em áreas extremamente íngremes e alcança áreas que possuem obstáculos que os demais pulverizadores não conseguem operar, essa talvez seja a maior vantagem da utilização de um drone pulverizador. Então, o acesso com drones, em alguns casos é a melhor e única alternativa. Além disso, a ARP também possibilita fazer aplicações localizadas, ou somente na área de interesse e em taxa variável, consequentemente observa-se uma economia de produto.

Assim, a chegada desta tecnologia na agricultura tem muito a contribuir com os custos e a produtividade. A utilização de ARPs, quando comparadas aos aviões e aos tratores agrícolas demonstra muitos benefícios nas mais diversas culturas, como é o caso da cana-de-açúcar.

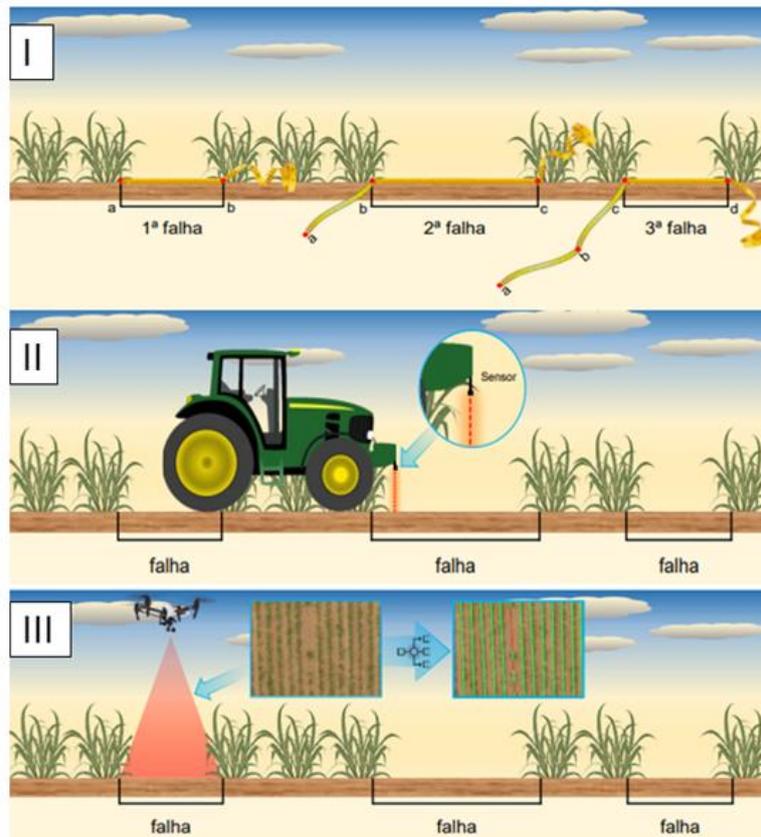
Sanchez et al. (2018) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar o potencial das imagens de ARPs para avaliar o grau de fechamento do dossel de diferentes abordagens de plantio e tratamentos de espaçamento aplicados à cultura da cana-de-açúcar. Neste sentido, os autores reforçaram a ideia do baixo custo que esta ferramenta contém, assegurando dados de alta precisão, que podem influenciar direta e positivamente na tomada de decisões nas mais diversas culturas, especialmente na da cana-de-açúcar.

Em concordância, Souza et al. (2017) descrevem “um procedimento de análise de imagem baseada em objetos (OBIA) para imagens de ARP, projetado para mapear e extrair informações sobre pulos em linhas de plantio de cana-de-açúcar”. Ao final do estudo, concluíram os benefícios que uma ARP pode oferecer, incluindo as informações precisas necessárias para que seja feito um monitoramento agrícola devido, reduzindo custos e erros que podem ocorrer ao longo do plantio.

Barbosa Júnior (2021) analisou o mapeamento de falhas na cana por imagens de ARPs, focando na importância de saber escolher o tamanho do pixel e a altura das plantas, que deve ser um parâmetro diretamente apropriado. Assim, considerando um dado importante a respeito dos pixels utilizados, considera-se que a obtenção dos pixels com no máximo 3,5 cm e a menor altura da planta de 0,5 m são parâmetros essenciais para uma estimativa com precisão dessas falhas.

Na Figura 2 é possível observar como, na prática, há benefícios da utilização de ARPs, quando comparado aos demais métodos de identificação de falhas no plantio da cana-de-açúcar. Contudo, além de falhas, muitas outras características podem ser observadas por imagens de ARPs, como é o caso da identificação de fechamento de dossel, que foi estudada por Duft et al. (2017). O estudo comprovou a eficiência da ARP nesta identificação, permitindo ao produtor canavieiro a obtenção de dados precisos a respeito do seu plantio.

Figura 2 - Exemplos ilustrativos do método manual (I), do método com veículo terrestre (II) e do método com ARP (III). Fonte: Barbosa Júnior (2021).



No Brasil, especialmente, o crescimento da procura por aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) têm aumentado consideravelmente na busca pela agricultura de precisão. Isto porque as ARPs unem uma estação de controle em solo chamada Ground Control Station – GCS e um Sistema de Posicionamento Global – GPS, que permitem precisão de posição e boa visão ao produtor que está utilizando esta tecnologia (JORGE; INAMASU, 2014).

2.5 Índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI

Nos países de grande extensão territorial, alguns aparatos precisam ser utilizados a fim de observar e garantir dados por sensores remotos. Esta visualização à distância ocorre por satélite e garante a obtenção de dados da superfície de todo o planeta Terra (FRANCISCO et al., 2020).

Estas imagens geradas remotamente têm contribuído direta e positivamente na agricultura. Nos últimos anos, os índices de vegetação vêm se destacando enquanto uma das principais fontes de indicadores para análise da vegetação em localidades e períodos determinados (BARROS; FARIAS; MARINHO, 2020).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI vem sendo bastante utilizado desde a sua primeira apresentação por Rouse et al. (1973), pois, por meio dele, é possível realizar a observação e avaliação da atividade fotossintética das plantas através de um cálculo aritmético que utiliza as bandas do infravermelho próximo (NIR), o qual possui um comprimento de onda de $840 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$, e do vermelho (RED), que possui um comprimento de onda de $650 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$, de modo que, esse cálculo é realizado em cada pixel e resulta em valores que variam de -1 a 1.

De acordo com Gomes (2019), os pigmentos fotossintetizantes possuem a capacidade de absorver a radiação solar causando a baixa reflectância das folhas na região do visível, enquanto as estruturas celulares provocam alta reflectância na região do infravermelho próximo. Glenn et al. (2011), cita que a reflexão da luz nas folhas verdes entre os comprimentos de onda vermelha e infravermelho próximo é expresso pelo NDVI, sendo a luz vermelha fortemente absorvida pela clorofila “a” e “b” das folhas, ocorrendo uma interação nas camadas superiores do dossel e a luz NIR transmitida através do mesófilo das folhas. E dessa forma, esses comprimentos de onda são fortemente correlacionados com processos fisiológicos, como a evapotranspiração e a produtividade das culturas.

Os valores de NDVI que se encontrem entre 0,0 e 0,2 sugerem solo exposto ou área urbanas e, quanto mais próximo for o valor do NDVI a 1,0, maior a atividade fotossintética e a densidade vegetal. Já os valores negativos são próprios de superfícies hídricas ou nuvens. O cálculo do NDVI é realizado através da seguinte fórmula:

$$\text{NDVI} = \frac{(\lambda\text{NIR} - \lambda\text{RED})}{(\lambda\text{NIR} + \lambda\text{RED})}$$

Em que λ_{NIR} é a refletância na banda do infravermelho próximo e λ_{RED} é a refletância na banda do vermelho.

O estudo de Crusiol et al. (2018) identifica o NDVI e a imagem termal obtidos por meio de ARP sendo aplicados ao monitoramento da condição hídrica da cultura da soja. De acordo com os autores, o experimento demonstra que por meio de dados conseguidos através de aparatos tecnológicos é possível observar a necessidade hídrica da cultura, onde, as parcelas que contavam com a irrigação e a precipitação pluviométrica apresentaram os maiores valores de NDVI, enquanto, as que não possuíam uma suplementação hídrica por parte da irrigação apresentaram valores menores de NDVI, demonstrando assim, a efetividade desse índice na detecção de tal problema. Dessa forma, fica claro que as ferramentas tecnológicas, como é o caso das ARPs, e o NDVI possibilitam a observação por imagem da extensão do plantio em um curto período, facilitando a rapidez na tomada de decisões para resolver problemas com a disponibilidade hídrica nos cultivos.

Em consonância, Suzin (2022) realizou um estudo a fim de avaliar a ocorrência de praga por meio de imagens de ARPs, aplicando o índice vegetativo NDVI e, mais uma vez, as imagens de ARPs aliadas ao índice de vegetação por diferença normalizada demonstraram o quanto são capazes de auxiliar o produtor rural na sua cultura, pois traz resultados satisfatórios na observância de problemas dos plantios, permitindo a tomada rápida de decisões que resolvam tais questões.

As imagens geradas na pesquisa de Silveira et al. (2020) foram feitas com ARPs a fim de monitorar o estado hídrico em um plantio de cana-de-açúcar, também utilizando o índice NDVI. O sensoriamento remoto foi capaz de notar estresse hídrico em determinados locais da plantação de modo rápido, não destrutivo e eficiente, o que reforça o que Suzin (2022) concluiu em seu estudo a respeito da possibilidade de tomada de decisões rápidas e eficazes.

Ao analisar variáveis como cobertura vegetal e produtividade na cultura do amendoim, Zerbato et al. (2016) encontrou fortes correlações dessas variáveis com o NDVI obtido pelo sensor terrestre, e dessa forma, seus resultados indicaram que o Índice de Vegetação Diferença Normalizada - NDVI pode ser usado para estimar a produtividade, cobertura vegetal e população de plantas na cultura do amendoim.

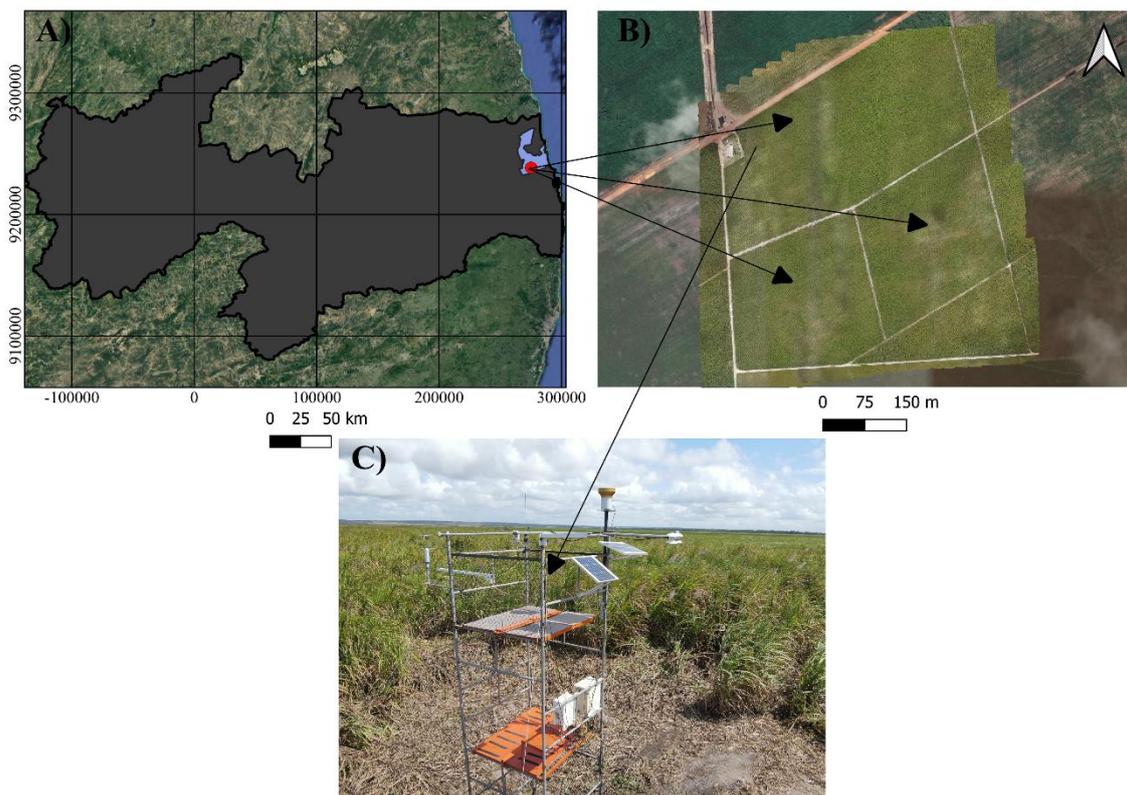
Dessa forma, fica claro que as ferramentas tecnológicas, como é o caso das ARPs, e o NDVI possibilitam a observação por imagem da extensão do plantio em um curto período, facilitando a rapidez na tomada de decisões para resolver vários problemas, como por exemplo a disponibilidade hídrica nos cultivos e a observação de um desenvolvimento inferior da cultura em áreas específicas.

3 MATERIAIS E METÓDOS

3.1 Área de estudo

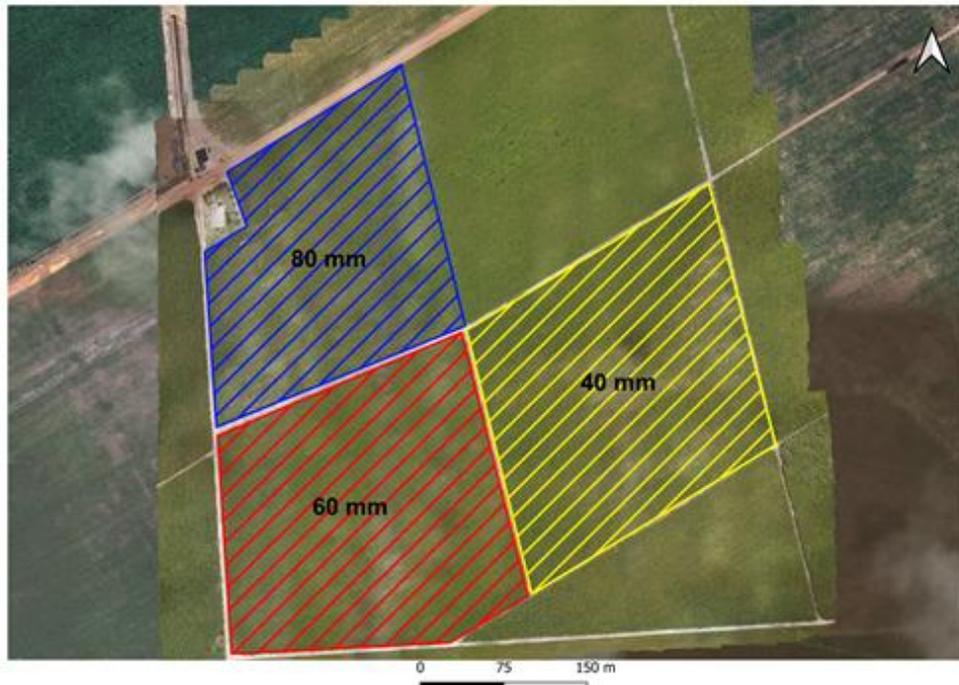
O local escolhido para o desenvolvimento do presente trabalho foi uma área de plantação de cana-de-açúcar pertencente a usina Japungu Agroindustrial ($6^{\circ}53'5.32''S$, $35^{\circ}2'5.52''O$), localizada na bacia do rio Miriri, município de Rio Tinto – PB, região da Zona da Mata Paraibana (Figura 3). Sua produção de cana-de-açúcar serve de matéria-prima para a fabricação de açúcar e etanol.

Figura 3 - Mapa da Paraíba, delimitação do município de Rio tinto e ponto no local da área de estudo (A); Área de desenvolvimento do experimento (B); Estação micrometeorológica instalada na área do experimento (C).



O local de estudo apresenta uma área total de cerca de 17 ha, dividida em três parcelas produtivas e cada uma recebe irrigação específica através de sistema por gotejamento, sendo aplicadas no local lâminas mensais de 80, 60 e 40 mm (Figura 4). A cana-de-açúcar plantada na área em questão é da variedade RB92579 e, na safra atual (2022/23), estava na sua 3^o soca. A área onde foi desenvolvida a presente pesquisa teve sua colheita realizada no dia 02/09/2022, iniciando após essa data o seu processo de rebrota.

Figura 4 - Delimitação da Área com suas respectivas lâminas de irrigação.



O solo que predomina na área apresenta elevado teor de areia e diferentes classificações texturais a depender do local, variando de areia, areia franca, franco arenosa e franco argilo arenosa (CARNEIRO et al., 2022). A pluviosidade anual varia de 1200 a 1700 mm, apresentando o período úmido entre os meses de março a agosto, e com ocorrência de chuvas isoladas nos outros meses do ano (FRANCISCO et al., 2017).

3.2 Irrigação

O sistema de irrigação do local conta com um gotejamento subsuperficial, o qual possui mangueiras instaladas a uma profundidade de 0,20 m, localizadas na linha de plantio, com emissores autocompensantes do tipo labirinto e vazão de $0,6 \text{ L h}^{-1}$ (NASCIMENTO, 2022). A irrigação é realizada todos os dias, exceto nos dias de chuva, de modo que, ao fim do mês cada parcela recebe o quantitativo hídrico referente a sua lâmina de irrigação. Os horários de irrigação variam de acordo com a parcela, onde, a área de 40 mm recebe a irrigação durante 2 horas (08:00 às 10:00 h), a de 60 mm durante 3 horas (16:00 às 19:00 h) e a de 80 mm durante 4 horas (16:00 às 20:00 h).

3.3 Imageamento multiespectral

Os voos para obtenção das imagens foram realizados com a ARP modelo Phantom 4 RTK multiespectral (Figura 5A). Até a finalização deste trabalho, foram efetuados voos nas seguintes datas: 04/11/2022, 25/11/2022, 01/02/2023, 24/03/2023, 28/04/2023 e 12/05/2023, os quais cobriram os estádios fenológicos 1, 2 e 3. O P4M conta com um conjunto de seis câmeras com sensores CMOS de 1/2,9 polegadas, onde inclui-se uma câmera RGB, e as outras cinco câmeras para imagens multiespectrais que cobrem as seguintes bandas: Azul: $450 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$; Verde: $560 \pm 16 \text{ nm}$; Vermelho: $650 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$; Borda vermelha: $730 \text{ nm} \pm 16 \text{ nm}$; Infravermelho próximo: $840 \text{ nm} \pm 26 \text{ nm}$ (Figura 5B). A aeronave conta com um sensor de luz solar localizado no topo da mesma, o qual detecta a irradiância solar em tempo real e faz a compensação da imagem, maximizando assim, a precisão dos dados multiespectrais que são coletados.

O plano de voo foi realizado no aplicativo DJI Ground Station Pro (DJI GS Pro). Para o voo foi adotado uma altura de 120 m com recobrimentos frontais e laterais de 75% em ambos.

Figura 5 - ARP Phantom 4 RTK multiespectral (A); Câmera multiespectral embarcada no P4M (B).

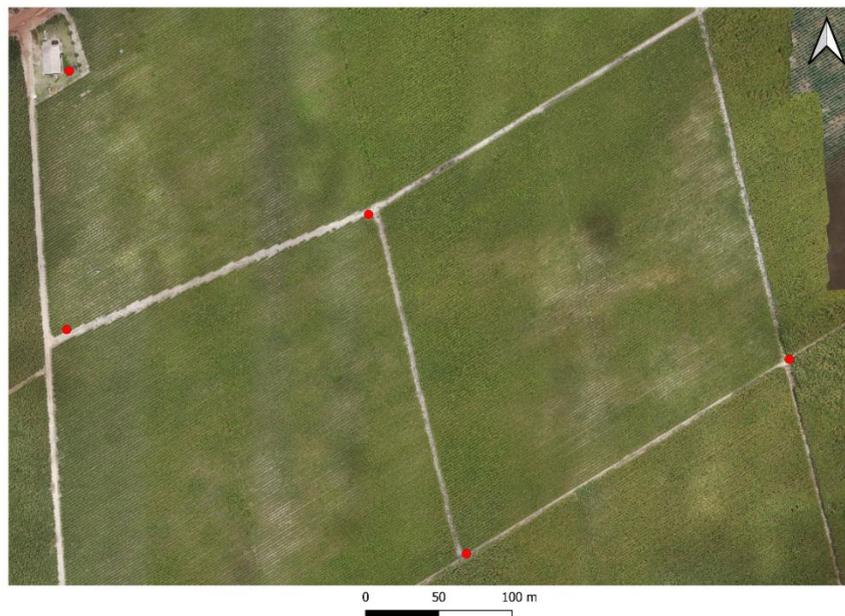


3.4 Obtenção dos pontos de controle

Os pontos de controle (GCPs – Ground Control Points) que foram implantados na área para utilização na correção geométrica das imagens da ARP foram obtidos através de um GPS/GNSS L1/L2 RTK, da marca Trimble e modelo R4 HPB450, o qual possui erro inferior a

10 cm. No início do levantamento em campo para obtenção dos pontos foi feita a montagem da base e do rover, em seguida ambos os equipamentos foram inicializados através da coletora, e após essa etapa, foi necessário esperar alguns minutos para que os equipamentos fizessem a busca pelos satélites e assim estabilizassem. Através da coletora é realizada toda configuração do equipamento, a exemplo da escolha do tipo de sistema de coordenadas, a zona UTM e o datum. Após toda configuração, se iniciou a coleta dos pontos na área, percorrendo todos os locais escolhidos para marcação desses pontos, os quais estavam demarcados com piquetes. Para facilitar a visualização dos pontos de controle, foram instaladas estacas em cada local. Com esse levantamento foram obtidos 5 pontos de controle (Figura 6): PC02B ($6,8859^{\circ}$ S, $35,0328^{\circ}$ O), PC01A ($6,8866^{\circ}$ S, $35,0347^{\circ}$ O), PC03A ($6,8880^{\circ}$ S, $35,0322^{\circ}$ O), PC04A ($6,8868^{\circ}$ S, $35,0302^{\circ}$ O) e ptcj5 ($6,8850^{\circ}$ S, $35,0347^{\circ}$ O).

Figura 6 - Pontos de controle distribuídos na área de estudo, destacados em vermelho.



3.5 Processamento das imagens

Os processamentos das imagens multiespectrais foram realizados no programa Pix4D, um software de fotogrametria criado em 2011 com o objetivo de melhorar o processamento de imagens obtidas a partir de aviões, ARPs, celulares, ou qualquer outra câmera (Figura 7). As imagens multiespectrais foram carregadas no software e em seguida, foram incluídas as configurações da câmera e do voo para a primeira etapa do processamento. Após esta etapa, foram importados os GCPs (Ground Control Points), para a ortorretificação das cenas. Após a correção, o processamento continuou com a segunda etapa, na qual foi gerada a nuvem de

pontos e malha. Por fim, na terceira e última etapa obteve-se o modelo digital de superfície (DSM), o ortomosaico e os índices, que no caso do presente estudo, foi gerado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). A escolha do índice pode ser realizada no começo do processamento através da terceira etapa que foi citada anteriormente, ou no final através da opção “calculadora de índice”. Ao final do processamento, para que seja feita a escolha do índice, se deve clicar em “calculadora de índice”, após isso, aparecerá uma nova tela a direita, onde terá a opção “3. Mapa de índice” e logo abaixo a opção “índices”. Clicando nela, aparecerá uma tela com todos os índices disponíveis, e além destes, é possível fazer o acréscimo de novos (Figura 8).

Figura 7 - Tela do software Pix4d apresentando a nuvem de pontos.

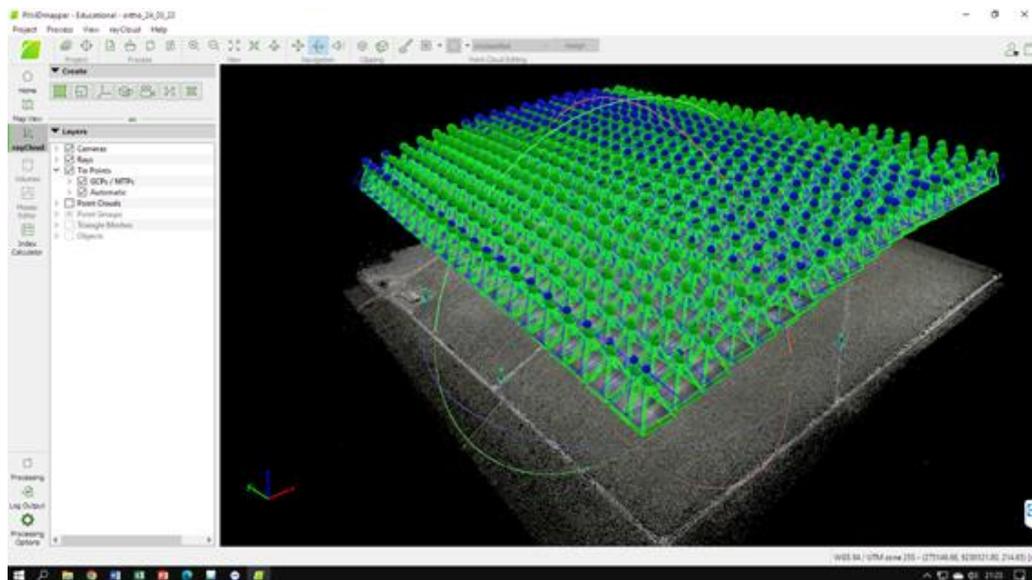
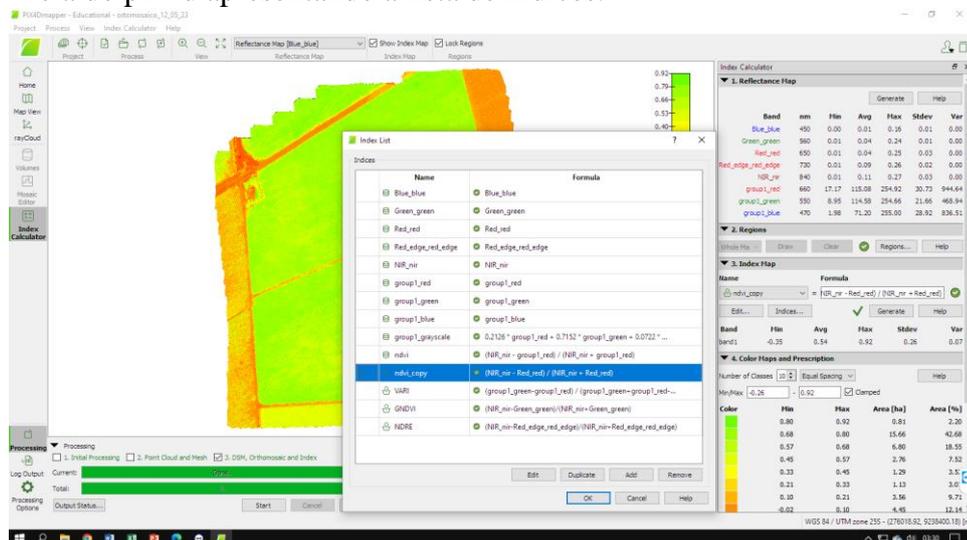


Figura 8 - Tela do pix4d apresentando a lista de índices.

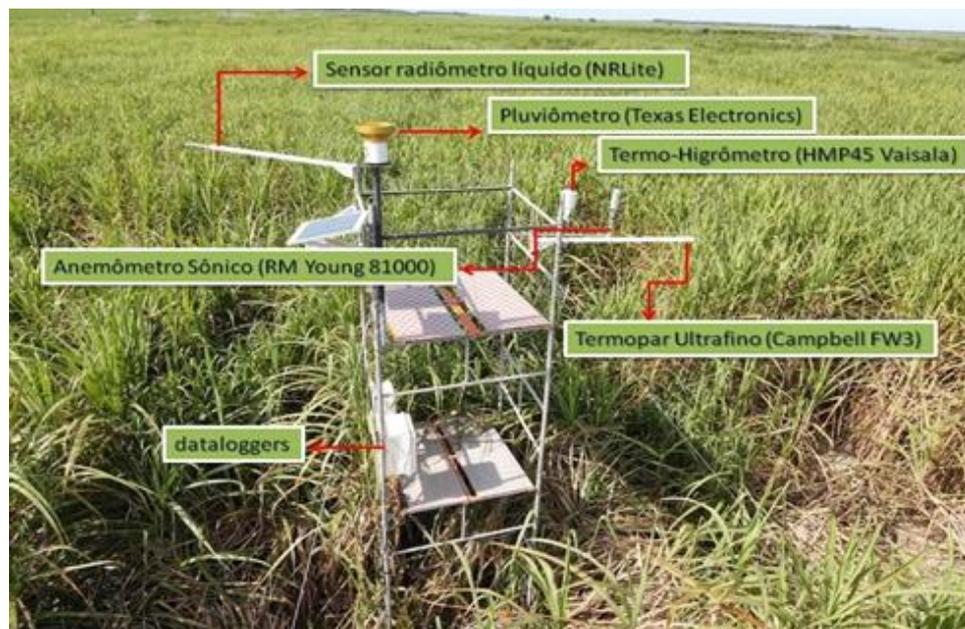


3.6 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos a partir de uma estação micrometeorológica que foi instalada na área de estudo (Figura 9). Os sensores instalados na estação são os seguintes: Saldo Radiômetro (Hukseflux NR01) - sensor que mede a radiação solar; Termohigrômetro (Vaisala HMP45) - sonda que registra temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR); e Pluviógrafo (Texas Electronics TR-525) - quantifica a precipitação (P).

Os equipamentos da estação micrometeorológica estão programados para realizarem leituras contínuas, com o armazenamento das médias dos dados feito a cada 30 minutos de forma automática em dois dataloggers da Campbell Scientific® modelo CR1000 e CR1000x.

Figura 9 - Estação micrometeorológica instalada na área de estudo. Fonte: NASCIMENTO (2022).



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

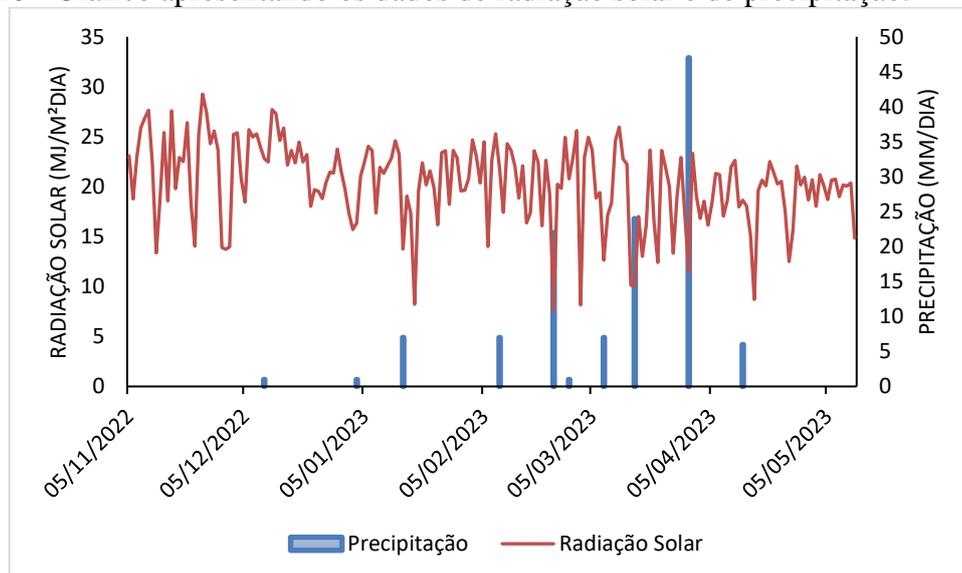
4.1 Condições meteorológicas registradas

A Figura 10 contém um gráfico com valores de precipitação diária e radiação solar no período entre os dias 04/11/2022 e 12/05/2023. O maior volume de precipitação se deu entre os dias 15/01/2023 e 13/04/2023, com um total acumulado de 121 mm para o referido período. No período compreendido entre 05/11/2022 e 14/01/2023 ocorreu a época de maior déficit hídrico

com um total precipitado de apenas 2 mm. Diante do que foi analisado na Figura 10, vemos que é imprescindível a utilização de meios que suplementem a necessidade hídrica da cultura em determinadas épocas do ano no local onde foi desenvolvido o presente estudo, tendo em vista que, levando em consideração a demanda hídrica de 1500 a 2500 mm citada pela EMBRAPA (2018), se considerarmos uma necessidade hídrica de 1700 mm por ano, o período de estudo (entre 04/11/2022 a 12/05/2023) deveria contar com cerca de 880 mm. Considerando a precipitação durante o período de estudo e a água aplicada por meio da irrigação, essa lâmina necessária não foi alcançada em nenhuma das parcelas produtoras, já que o acumulado hídrico, na parcela de 80 mm foi 553 mm, na de 60 mm - 446 mm e na lâmina de 40 mm se teve 338 mm disponíveis para a cultura. O recomendado para o referido local de estudo seria um planejamento de irrigação mais eficaz, aplicando maiores quantidades hídricas nos estádios fenológicos em que a cultura mais demanda água, que são no período de emergência e no perfilhamento.

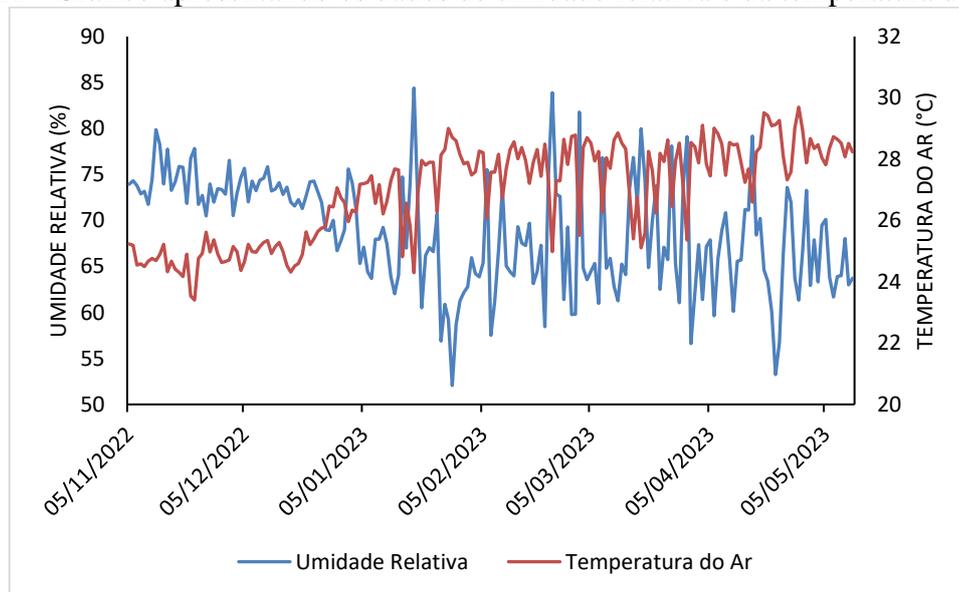
É possível analisar também na Figura 10 os dados de radiação solar durante todo o período de análise. O dia que apresentou o menor valor de radiação solar foi 23/02/2023 com um valor de 7,6 MJ/m² dia, já o dia que teve o maior valor foi 24/11/2022 que apresentou um valor de 29,26 MJ/m² dia. O valor médio de radiação durante o intervalo de análise foi de 20,40 MJ/m² dia. De acordo com Manhães et al. (2015), por ser uma planta C4, a cana-de-açúcar necessita de altas intensidades luminosas, e dessa forma, a radiação solar se torna muito importante para seu desenvolvimento, estando relacionada a fotossíntese e consequentemente, influenciando diretamente no perfilhamento, crescimento e no acúmulo de sacarose da planta.

Figura 10 - Gráfico apresentando os dados de radiação solar e de precipitação.



No gráfico da Figura 11 encontram-se valores de umidade relativa e temperatura do ar. Observa-se que os valores de umidade relativa apresentam uma tendência de diminuição durante o período de análise, já os valores de temperatura do ar apresentam um aumento no decorrer do tempo, e isso nos mostra que as duas variáveis apresentam um comportamento inversamente proporcional. Com o aumento da temperatura o ar pode reter mais vapor d'água e, caso não ocorra também o aumento da pressão de vapor, a umidade relativa cai. O maior valor de umidade se deu no dia 18/01/2023 e foi de 84,4%, já o menor ocorreu no dia 28/01/2023 e apresentou um valor de 52,1%. O valor médio da umidade relativa durante o tempo de análise foi de 68,7%. No caso da temperatura do ar, tivemos o maior valor no dia 28/04/2023 e foi 29,7 °C, e o menor valor se deu no dia 22/11/2022 com um valor de 23,4 °C. A média dos valores durante o período de estudo foi de 26,9 °C. Segundo Marin et al. (2009) a temperatura é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, e de modo geral, pode-se admitir uma queda expressiva na taxa de crescimento da cana sempre que a temperatura do ar ficar abaixo de 20 °C e acima de 38 °C, e dessa forma, entende-se que a temperatura observada durante o período de estudo está dentro dos parâmetros que favorecem o desenvolvimento da cultura.

Figura 11 - Gráfico apresentando os dados de umidade relativa e da temperatura do ar.



4.2 Análise do NDVI

As Tabelas 1, 2 e 3, apresentam os valores de mínimo, médio e máximo, o desvio padrão

e o coeficiente de variação (CV) dos pixels de NDVI de cada parcela para todos os dias de análise. Fazendo uma análise geral das tabelas, vemos que os dias 04/11/2022 (63 dias após o corte) e 25/11/2022 (84 dias após o corte), onde a cultura estava em seu estágio de estabelecimento, foram os que apresentaram os menores valores de média das parcelas durante a análise, e, foram os que possuíam os maiores valores do CV, caracterizando assim, uma alta variabilidade das parcelas. Neste mesmo período, percebe-se que as médias não variaram muito, e a parcela que teve os maiores valores foi a de 40 mm. Prosseguindo nas análises, é possível observar que a partir do dia 01/02/2023 houve um decréscimo nos valores do CV, o que representa uma menor variabilidade nas parcelas, e isso ocorreu, muito provavelmente, em decorrência do desenvolvimento da cana, que a partir do dia 01/02 (152 dias após o corte) já se encontrava no começo do seu 3º estágio de desenvolvimento, o qual caracteriza-se pelo alongamento do caule e crescimento intenso. No que diz respeito a variação das médias entre as parcelas, os valores seguiram tendo pouca variação. O dia 28/04/2023 (238 dias após o corte) foi o que apresentou, para todas as parcelas, as maiores médias, e os menores valores do CV. Nessa data, a cultura se encontrava bem avançada em seu 3º estágio de desenvolvimento. Além disso, com base na Figura 10, verifica-se que antes desta data ocorreram lâminas consideráveis de precipitação, o que também pode ter interferido nos valores de NDVI. Os valores das médias continuaram bem próximos, porém, a parcela de 80 mm e 60 mm foram as que apresentaram as maiores médias respectivamente. No dia 12/05/2023 (252 dias após o corte), observou-se que ocorreu uma diminuição nos valores das médias para todas as parcelas, e isso, pode ter ocorrido em decorrência da presença de inflorescências, o que veremos de forma mais específica no decorrer do presente trabalho. Os valores de médias desta data não apresentaram nenhum tipo de variação.

Tabela 1 - Análise estatística dos pixels de NDVI nos dias 04/11/2022 e 25/11/2022.

	04/11/2022			25/11/2022		
	80 mm	60 mm	40 mm	80 mm	60 mm	40 mm
Min	-0,36	-0,25	-0,44	-0,20	-0,11	-0,14
Média	0,32	0,33	0,36	0,40	0,41	0,49
Max	0,78	0,80	0,84	0,83	0,86	0,88
DP	0,17	0,17	0,17	0,20	0,21	0,20
CV	53	51	47	50	51	40

Min e Max: respectivamente valores mínimos e máximos, DP: desvio padrão da média, CV: coeficiente de variação da média

Tabela 2 - Análise estatística dos pixels de NDVI nos dias 01/02/2023 e 24/03/2023.

	01/02/2023			24/03/2023		
	80 mm	60 mm	40 mm	80 mm	60 mm	40 mm
Min	-0,15	-0,04	-0,03	-0,09	0,03	0,09
Média	0,55	0,56	0,60	0,65	0,66	0,68
Max	0,88	0,87	0,90	0,91	0,90	0,93
DP	0,17	0,17	0,17	0,11	0,11	0,11
CV	30	30	28	16	16	16

Min e Max: respectivamente valores mínimos e máximos, DP: desvio padrão da média, CV: coeficiente de variação da média

Tabela 3 - Análise estatística dos pixels de NDVI nos dias 28/04/2023 e 12/05/2023.

	28/04/2023			12/05/2023		
	80 mm	60 mm	40 mm	80 mm	60 mm	40 mm
Min	-0,09	-0,12	0,20	-0,19	-0,07	0,05
Média	0,80	0,79	0,77	0,69	0,69	0,69
Max	0,94	0,93	0,96	0,92	0,91	0,91
DP	0,04	0,05	0,06	0,08	0,08	0,09
CV	0,05	0,06	0,08	0,11	0,11	0,13

Min e Max: respectivamente valores mínimos e máximos, DP: desvio padrão da média, CV: coeficiente de variação da média

Na Figura 12, observa-se os ortomosaicos do NDVI da cultura da cana-de-açúcar entre os meses de novembro/2022 a maio/2023. No dia 04/11/2022 (63 dias após o corte), tivemos valores de NDVI que variaram de -0,17 a 0,84, mas boa parte das áreas imageadas apresentaram $NDVI < 0,3$, que representa baixa densidade vegetal ou áreas de solo exposto. Nesta data, a cana estava no seu segundo estágio de desenvolvimento, o qual caracteriza-se pelo perfilhamento da planta, e assim, a área apresentou os menores valores de NDVI pelo fato de que a cultura ainda não tinha chegado ao fechamento do dossel, e dessa forma, a quantidade de área vegetal fotossinteticamente ativa era pouca. Continuando a análise da Figura, vemos que no dia 01/02/2023 (152 dias após o corte) a escala do índice apresentou um aumento, onde, sua variação foi de 0,07 a 0,90, mostrando que, conforme a cultura vai se desenvolvendo a tendência é que seu NDVI aumente. Observa-se na mesma data, que a área ainda apresentou locais com índice reduzido, o que não aparenta mais ser apenas o solo exposto, e sim, algum problema que estava afetando o desenvolvimento da cana naqueles locais específicos.

No dia 24/03/2023 (203 dias após o corte), tivemos valores de NDVI maiores em comparação com as datas anteriores, onde, a escala dos mesmos foi de 0,34 a 0,93, entretanto, o padrão de índices menores ($<0,44$) em áreas específicas permaneceu, demonstrando assim, que realmente existia algo interferindo no desenvolvimento da cultura nestes locais. A data que apresentou os maiores valores de NDVI foi o dia 28/04/2023 (238 dias após o corte), em que os valores do índice de vegetação foram de 0,62 a 0,95, o que nos mostra que grande parte da cultura se encontrava em um bom desenvolvimento com alta atividade fotossintética. Levando em consideração o que já foi descrito no tópico anterior, os valores de NDVI desta data podem ter tido influência da precipitação, haja vista que, entre os meses de março e abril tivemos 84 mm de chuva na área. O contraste de valores se manteve nas áreas onde verificou-se menor NDVI em datas anteriores.

No dia 12/05/2023 (252 dias após o corte), através de uma análise de campo, foi feita a observação de que algumas plantas já tinham emitido suas inflorescências (Figura 13), e isso pode ter ocorrido por diversos fatores, como por exemplo o fotoperíodo e a quantidade de radiação solar que as plantas receberam durante seu desenvolvimento, já que pela idade da lavoura, ainda estariam no estágio fenológico 3. Levando em consideração a presença dessas inflorescências, infere-se que o NDVI do referido dia seria menor por conta da refletância dessas inflorescências diferir da refletância das folhas, o que foi confirmado quando o ortomosaico desta data foi produzido. O NDVI desse dia, quando comparado com a data anterior de análise, teve uma diminuição na sua escala apresentando uma variação de 0,44 a 0,92.

Um comportamento parecido com o que foi encontrado no presente trabalho foi notado no estudo de Lucas e Schuler (2007), em que os autores realizaram uma análise espaço-temporal do NDVI a partir das imagens dos satélites AVHRR/ NOAA na cultura da cana-de-açúcar no litoral norte Pernambucano. Eles verificaram que a partir do sétimo mês do ciclo da cultura o NDVI começou a cair, onde, relacionaram esse decréscimo nos valores do índice de vegetação ao estágio fenológico em que a cultura se encontrava (estádio de maturação), e a diminuição na precipitação, evidenciando a influência da chuva nos valores de NDVI. Além disso, eles observaram que no mês de julho, que representava o sexto mês do ciclo da cultura, o NDVI alcançou os valores máximos de 0,61 para um determinado ponto, e que, no mês anterior o local de estudo recebeu altos volumes de precipitação, mostrando mais uma vez, que a chuva exerceu influência na resposta do NDVI. Silveira et al. (2020) compararam mapas gerados por câmera multiespectral e mapas gerados por câmera termográfica, em distintos voos, acopladas em ARP numa área experimental de cana-de-açúcar. O estudo mostrou que tanto o uso de imagens

termais quanto a utilização do NDVI, foram capazes de detectar diferenças entre as parcelas irrigadas e as que não possuíam suplementação hídrica, indicando que o déficit hídrico e uma condição favorável de umidade são capazes de influenciar nos valores de NDVI.

Diante disso, entende-se que o índice de vegetação por diferença normalizada possui uma relação direta com o estágio de desenvolvimento em que a cultura se encontra, onde, presume-se que o florescimento da cultura causa variações no NDVI, assim como, a precipitação.

Figura 12 - Ortomosaicos de NDVI do período de análise.

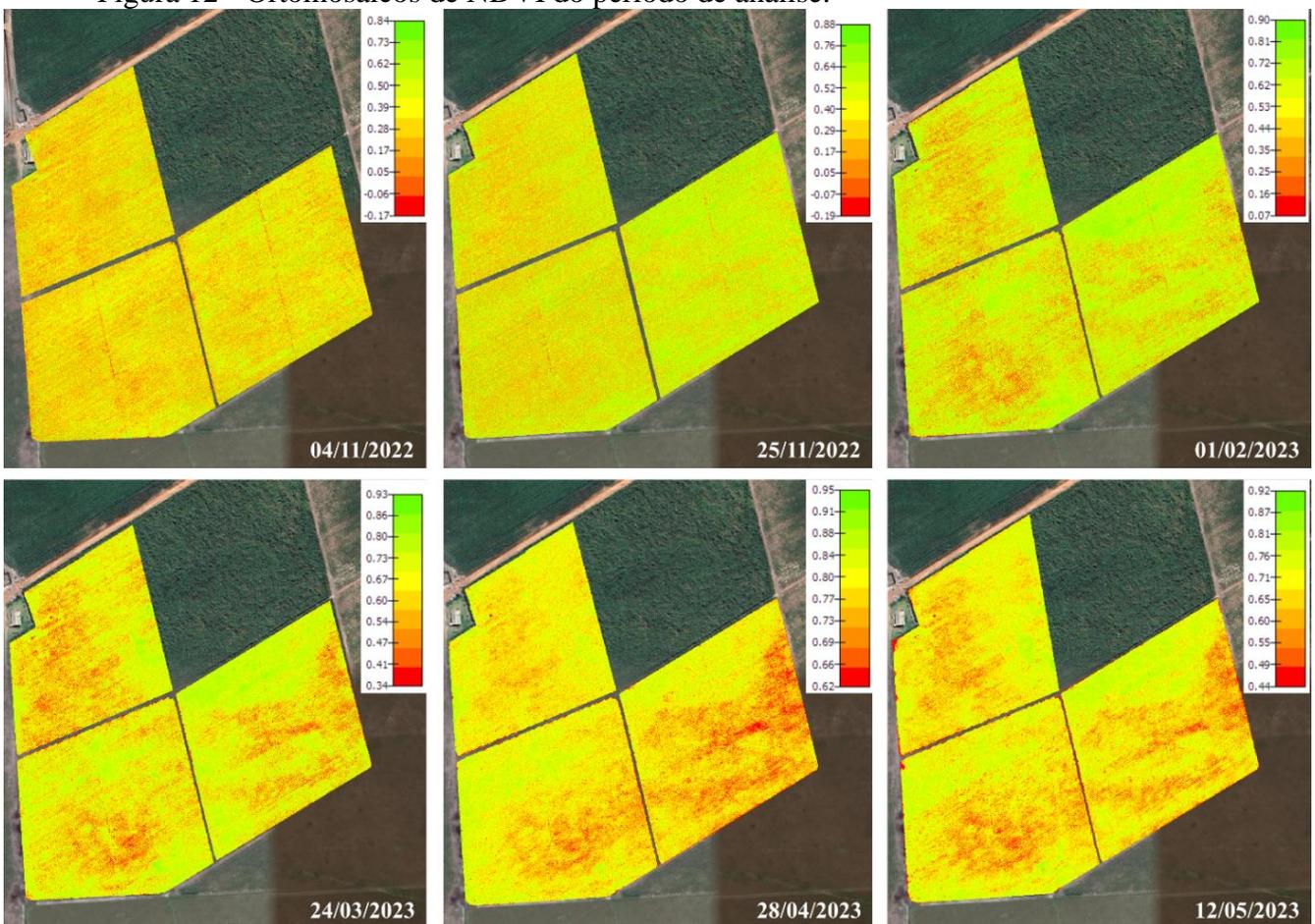


Figura 13 - Imagem de câmera RGB da cana-de-açúcar no dia 12/05/2023, onde verifica-se o pendão de inflorescência, nas áreas mais claras (destacadas com retângulos).



As figuras 14 e 15 referem-se às telas do software Pix4D, na função em que é possível obter os resultados da análise geostatística das classes de NDVI. Respectivamente, as Figuras 14 e 15 apresentam os resultados para cada uma das parcelas nos dias 04/11/2022 e 28/04/2023, onde, esses foram os dias que apresentaram os menores e maiores valores do índice de vegetação. Na Figura 14, onde os valores de NDVI foram os menores, verifica-se na parcela que conta com uma lâmina de irrigação por gotejamento de 80 mm, que apenas 21,24% da área apresentou NDVI acima de 0,49. No caso da parcela de 60 mm o valor foi menor, onde só 17,31% da área tinha o índice acima de 0,5. Para a parcela de 40 mm, registrou-se 18,89% da área com valores de NDVI acima de 0,54, um pouco a mais que a área de 60 mm. Nesse primeiro dia de análise, levando em consideração as três parcelas, verifica-se que não houve diferença no desenvolvimento da cultura entre elas.

Para o dia 28/04/2023, observamos na Figura 15 que a parcela de 80 mm apresentou cerca de 95,41% da sua área com índices superiores a 0,72. Na parcela de 60 mm aproximadamente 90,92% da área teve valores de NDVI superiores a 0,72. Por fim, a parcela de 40 mm apresentou valores do índice de vegetação acima de 0,73 em 77,62% de sua área total. Observa-se neste dia que os valores das parcelas de 80 mm e 60 mm apresentaram uma pequena variação, enquanto a de 40 mm teve uma maior diferença quando comparada as demais. A pouca variação entre as parcelas de 80 mm e 60 mm pode estar relacionada a precipitação que ocorreu algum tempo antes do referido dia, causando um efeito de anulação da irrigação, enquanto se atribui que as diferenças nos valores da parcela de 40 mm estão relacionadas não somente a condição hídrica do local, tendo em vista que, apenas locais específicos da área possuem menores valores do índice.

Como a parcela de 40 mm apresentou os menores valores de NDVI, foi realizado uma observação em campo para que fosse possível descobrir o que estava comprometendo o desenvolvimento de algumas plantas daquela área. Diante da observação, como foi citado anteriormente, imaginava-se que o problema não seria apenas a questão do déficit hídrico, tendo em vista que, se esse fosse o único motivo do crescimento reduzido na área, pelo fato do local contar com um sistema de irrigação por gotejamento distribuído de forma uniforme por todo local, toda área deveria apresentar um desenvolvimento inferior, e isso não aconteceu. No dia 26/05/2023 foi realizado um levantamento populacional de pragas na referida área, que apesar dos dados desse levantamento não serem apresentados no presente trabalho, o mesmo expôs uma situação surpreendente. Ao realizar uma amostragem nos locais que apresentaram os menores e os maiores valores de NDVI, o local que apresentou os menores valores do índice

de vegetação apresentava uma alta taxa de infestação da *Diatraea* (broca da cana-de-açúcar), que é uma das principais pragas de interesse econômico da cultura da cana, enquanto, os locais que apresentavam os maiores valores do NDVI, ao ser realizado o levantamento, encontrou-se uma quantidade muito inferior da praga. Dessa forma, podemos subentender que os menores valores de NDVI possuem relação com a alta infestação da praga.

Figura 14 - Tela do Pix4D apresentando a geoestatística do NDVI para cada uma das parcelas no dia 04/11/2022. A) parcela de 80mm; B) parcela de 60 mm; C) parcela de 40 mm.

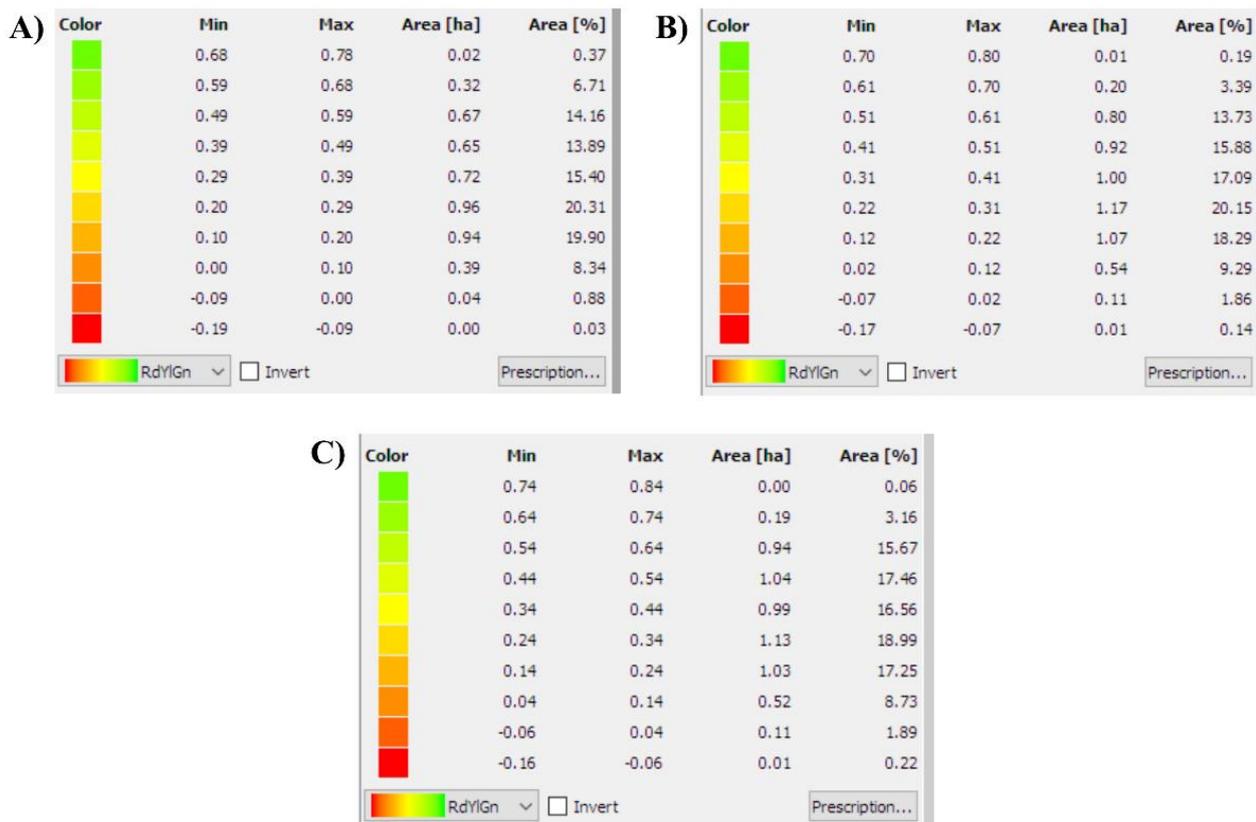
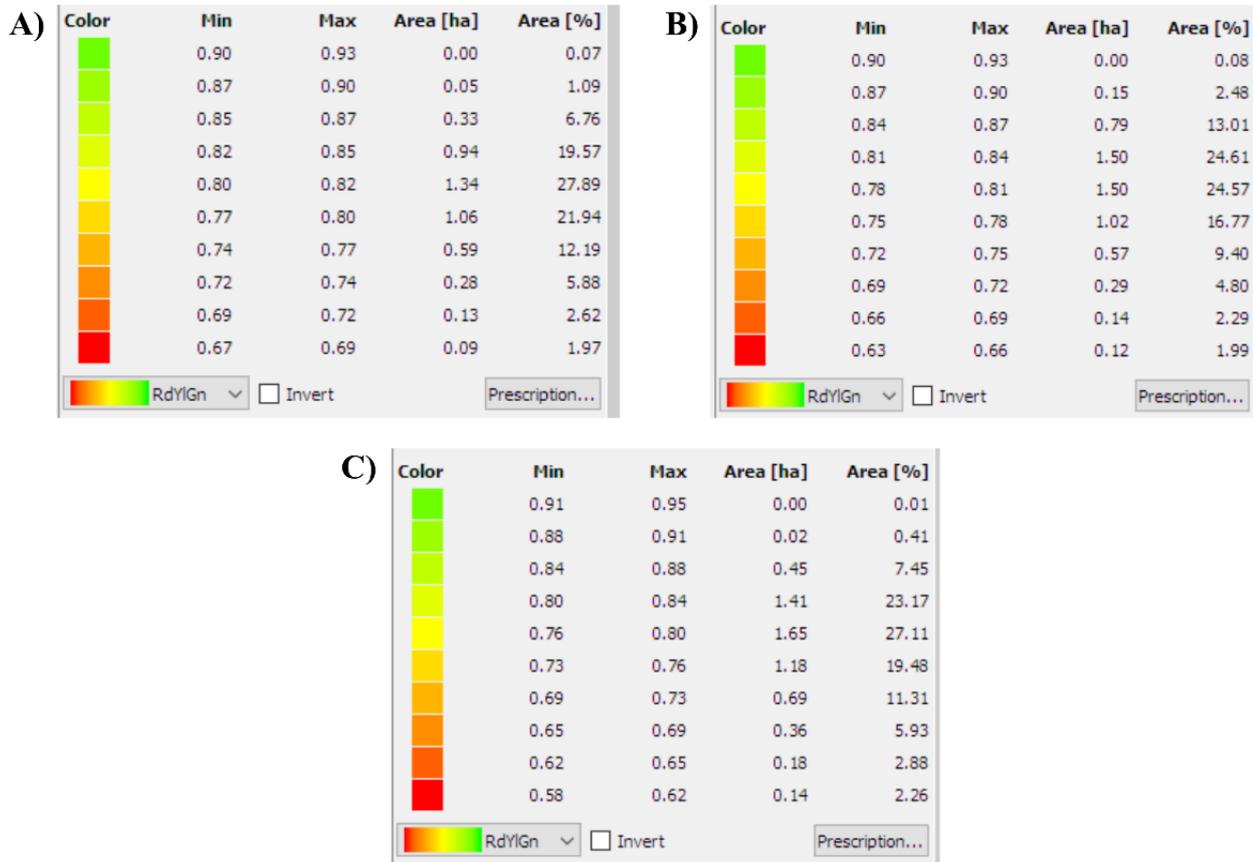


Figura 15 - Tela do Pix4D apresentando a geoestatística do NDVI para cada uma das parcelas no dia 28/04/2023. A) parcela de 80mm; B) parcela de 60 mm; C) parcela de 40 mm.



5 CONCLUSÃO

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) gerado com ARP se mostrou eficaz no monitoramento do desenvolvimento vegetativo da cultura da cana-de-açúcar. Observou-se grande variabilidade do NDVI dentro de cada parcela estudada; apenas para o dia 28/04/23 o CV foi inferior a 10%. Nos dias analisados, não foram verificadas diferenças entre as médias do NDVI nas parcelas com lâminas de irrigação diferentes, de forma que a irrigação não foi um fator decisivo ao desenvolvimento da cultura. Outros fatores, tais como incidência de insetos-praga podem ter interferido no desenvolvimento das plantas e, portanto, no NDVI. Assim, sugere-se mais estudos no local de modo a descobrir a causa do menor desenvolvimento da cana-de-açúcar em glebas específicas.

REFERÊNCIAS

ALVES, Lazaro Quintino et al. Desempenho da produção da cultura de cana-de-açúcar nos principais estados produtores. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 2, p. 303-317, 2021.

ALVES, Murilo Santos. **Aeronaves remotamente pilotadas na agricultura: estudo comparativo e métodos de manejo**. Trabalho de conclusão de curso - Ciências Aeronáuticas. Pontifícia Universidade Católica de Goiás - PUC Goiás. 2021, 28f.

BARBOSA JÚNIOR, Marcelo Rodrigues. **Mapeamento de falhas em cana-de-açúcar por imagens de veículo aéreo não tripulado**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2021, 51 f.: tabs., fotos.

BARBOSA, Geraldo Veríssimo et al. **50 anos de Variedades "RB" de Cana-de-açúcar: 30 anos de RIDESA**. Curitiba: UFPR. RIDESA, 2010. 199 p.

BARBOSA, Geraldo Veríssimo. **Inovações tecnológicas desenvolvidas em Alagoas para o setor canavieiro**. Maceió: FAPEAL/Imprensa Oficial Graciliano Ramos, 2018. 136 p.

BARROS, Antônio; FARIAS, Lucas; MARINHO, Jefferson. Aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na Caracterização da Cobertura Vegetativa de Juazeiro Do Norte – CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v.13, n.06, p. 2885-2895, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **PORTARIA N° 298**. Estabelece regras para operação de aeronaves remotamente pilotadas destinadas à aplicação de agrotóxicos e afins, adjuvantes, fertilizantes, inoculantes, corretivos e sementes. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 24 setembro 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mapa-n-298-de-22-de-setembro-de-2021-347039095> . Acesso em: 11 mai. 23.

BUFON, Vinícius Bof; MAIA, Felipe Cardoso; PEREIRA, Rodrigo Moura. Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: história, mitos e desafios. In: PAOLINELLI, A.; DOURADO NETO, D.; MANTOVANI, E. C. (org.). **Diferentes abordagens sobre agricultura irrigada no Brasil: técnica e cultura**. Piracicaba: ESALQ, 2021. Cap. 25.

BUFON, Vinícius; MAIA, Felipe; PEREIRA, Rodrigo. **Sistema irrigado de produção de cana-de-açúcar no Brasil: métodos, recomendações e resposta produtiva**. 2021. Capítulo em livro técnico (CPAC). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1137282#:~:text=Recomenda%20Dse%20o%20manejo%20da,adicionais%20de%20informa%C3%A7%C3%A3o%20e%20afer>

i% C3% A7% C3% A3o. Acesso em 13 mai. 2023.

CAIEIRO, Juliana Terezinha et al. Physical purity and germination of sugarcane seeds (caryopses)(*Saccharum spp.*). **Revista brasileira de sementes**, v. 32, p. 140-145, 2010.

CANABRAVA, Alice Piffer. **História econômica: estudos e pesquisas**. Unesp, 2005.

CANDEIAS, Ana Lúcia; SOUZA, José Eduardo; BARROS, José Érico. **EXTRAÇÃO DE FALHAS EM PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR USANDO O ATRIBUTO COR EM IMAGEM DE VANT**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO- UFPE - CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS- CTG CARTOGRÁFICA, RECIFE - PE, 2018.

CARNEIRO, Ericka Aguiar et al. Parâmetros Físicos-Hídricos do Solo Visando a Detecção do Déficit Hídrico em Área de Cana-De-Açúcar. **XVI simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste e 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa**. 2022. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14289>. Acesso em 28 de abril de 2023.

CASTANHO, Roberto; TEIXEIRA, Matheus. A evolução da agricultura no mundo: da gênese até os dias atuais. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiutaba, v. 8, n. 1, p. 136-146, jan./jun. 2017.

CENTENO, Luana Nunes et al. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. v. 10, Safra 2022/23, n. 4 - Quarto Levantamento, Brasília-DF, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 29/05/2023.

CRUSIOL, Luís Guilherme Teixeira et al. **NDVI E IMAGEM TERMAL OBTIDOS POR VANT APLICADOS AO MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO HÍDRICA DA CULTURA DA SOJA**. VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA. Goiânia, GO, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/179614/1/NDVI-e-imagem-p.p.296-298.pdf> Acesso em: 14 mai. 2023.

CURSI, Danilo Eduardo et al. History and Current Status of Sugarcane Breeding, Germplasm Development and Molecular Genetics in Brazil. **SugarTech**, p.1-22, 2021.

DE SOUZA, Ernando Donato et al. Índice NDVI em lavoura de batata-doce obtido por mapeamento com drone. **Conjecturas**, v. 22, n. 2, p. 1377-1385, 2022.

DOS SANTOS, Sthéfany Airane et al. Supervised classification and NDVI calculation from remote piloted aircraft images for coffee plantations applications. **Coffee Science-ISSN 1984-3909**, v. 16, p. e161978-e161978, 2021.

DUFT, Daniel; SANCHES, Guilherme; LUCIANO, Ana Cláudia; MONTIBELLER, Bruno; SILVEIRA, Hilton; SANCHES, Ieda; KÖLLN, Oriel. **Identificação de fechamento de dossel de cana-de-açúcar através de imagens de VANT**. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR. INPE Santos - SP, Brasil, 2017.

EMPRABA - portal online. **Pegada Hídrica da Cana-de-açúcar, Etanol e Açúcar em Áreas Irrigadas do Brasil**. 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-projetos/-/projeto/206772/pegada-hidrica-da-cana-de-acucar-etanol-e-acucar-em-areas-irrigadas-do-brasil> Acesso em 12 mai. 2023.

FERREIRA FILHO, Dimas. **Calagem em primeira soca de dez genótipos de cana-de-açúcar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Universidade Federal da Paraíba. Areia. 2019.

FRANCISCO, Cristiane Nunes et al. Análise do impacto da correção atmosférica no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada a partir de Imagem Landsat 8/OLI. **Revista Brasileira de Geografia Física**. N. 13. v. 13.1, p. 076- 086, 2020.
FRANCISCO, Paulo Roberto Megna et al. Climatologia do Estado da Paraíba. EDUFCG, Campina Grande – PB, 2017.

FURTADO, Ricardo; HOFF, Rodrigo. PÁTIO DE DESCONTAMINAÇÃO DE AERONAVES AGRÍCOLAS EVOLUÇÃO TÉCNICA E LEGAL. **REVISTA DE POLÍTICA AGRÍCOLA**, V. 26, N. 2, 2017.

GLENN, Edward P. et al. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 26, p. 4050-4062, 2011.

GOMES, Maryjane Diniz de Araújo et al. Coeficiente de cultivo para a videira com base no índice de vegetação por diferença normalizada obtido com uso de VANT. 2019.

JORGE, Lucio Andre; INAMASU, Ricardo. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 109-134.

LUCAS, Abdoral de A.; SCHULER, Carlos AB. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 607-614, 2007.

MARIN, Fábio. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, José. **Agrometeorologia dos Cultivos O**

fator meteorológico na produção agrícola. Brasília-DF: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, 2009. cap. 7, p. 109-130.

MARIN, Fabio; NASSIF, Daniel SP. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 232-239, 2013.

MELO, Paul Lineker Amaral de. **Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar (Saccharum spp.) sob diferentes quantidades de palha mantidas na superfície do solo.** 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MONTEIRO, José Eduardo. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola.** Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p.: il.
MOZAMBANI, Amália Estela et al. História e morfologia da cana-de-açúcar. **Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba**, v. 1, n. 11-18, 2006.

NASCIMENTO, Alexandre Ferreira do. **Sensoriamento remoto orbital e suborbital para análise de déficit hídrico em cana-de-açúcar.** 2022.

RIDESA. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar / Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro.** – Curitiba, 2010. 136 p. il.

ROBERTO, Guilherme Garcia et al. Variation of photosynthesis and carbohydrate levels induced by ethephon and water deficit on the ripening stage of sugarcane. **Bragantia**, v. 74, p. 379-386, 2015.

RODRIGUES, Amanda Maria Carlos. **RB92579: uma variedade de cana-de-açúcar de altos rendimentos agroindustriais e elevado potencial como genitora.** Monografia de Graduação em Agronomia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias. Rio Largo, 2021, 66f. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/123456789/9895/1/RB92579%20uma%20variedade%20de%20cana-de-a%C3%A7%C3%ACar%20de%20altos%20rendimentos%20agroindustriais%20e%20elevad%20potencial%20como%20genitora.pdf> Acesso em 14 mai. 2023.

ROUSE, Jeremy et al. Monitoramento de Sistemas de Vegetação nas Grandes Planícies com ERTS. 3º Simpósio ERTS, NASA SP-351, Washington DC, p. 309-317, 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614> Acesso em: 11 mai. 2023.

SANCHES, G.M., DUFT, D.G., KÖLLN, O.T., LUCIANO, A.C. dos S., CASTRO, S.G.Q.D., OKUNO, F.M., FRANCO, H.C.J. The potential for RGB images obtained using unmanned aerial vehicle to assess and predict yield in sugarcane fields. **International**

Journal of Remote Sensing v. 39, p. 5402–5414, 2018. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1448484>.

SANTOS, Jose Wibison Ferreira dos. **Eficiência e uniformidade de um sistema de irrigação por gotejamento na cultura da cana-de-açúcar**. 2022. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2021.

SERAFIM, L. G. F. et al. Influência do plantio mecanizado no índice de brotação da cana de açúcar. **Stab**, v. 31, p. 22-25, 2013.

SILVEIRA, J. M. de C.; CANDIDO, B. M.; SILVA, A. L. B. de O.; PAVÃO, G. C. .; XAVIER, M. A. .; PIRES, R. C. de M. USO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS E TERMOGRÁFICAS PARA MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES HÍDRICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR. **IRRIGA**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 689–696, 2020.

SOUZA, C.H.W. de, LAMPARELLI, R.A.C., ROCHA, J.V., MAGALHÃES, P.S.G. Mapping skips in sugarcane fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, p. 49–56, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.006>.

SUZIN, Vilmar. **Avaliação e estimativa de correlação espectral de variáveis biofísicas e bioquímicas causada por fitonematoides na cultura do milho**. 2022. 106. Trabalho de Conclusão de Curso Dissertação de Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2022.

THOMAS, André Luís. Desenvolvimento da Planta de Cana-de-açúcar. **Desenvolvimento das plantas de batata, mandioca, fumo e cana-de-açúcar [recurso eletrônico]**. Porto Alegre: UFRGS, 2016. p. 55-75, 2016.

THOMÉ, Pedro; VAZ, Taciana Altemari; GROFF, Andréa Machado. **Fatores e Técnicas do cultivo Cana-De-Açúcar e sua correlação com a Qualidade e a Produtividade**. XI EEPA – Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. 2018. Anais ISSN 2176-3097.

TOPPA, Eder Victor Braganti et al. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 3, n. 2, p. 169-186, 2010.

ZERBATO, Cristiano et al. Agronomic characteristics associated with the normalized difference vegetation index (NDVI) in the peanut crop. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 5, p. 758-764, 2016.

ZHANG, Liyuan et al. Mapping maize water stress based on UAV multispectral remote sensing. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 605, 2019.