

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA
SOUZA
ETEC - PROFESSOR FRANCISCO DOS SANTOS
ENSINO MÉDIO INTEGRADO AO TÉCNICO EM AGROPECUÁRIA**

**AGRICULTURA DE PRECISÃO: Combate Fitossanitário e Prevenção no Manejo
Nutricional do Solo na Canavicultura.**

Brenda Luzia Pereira*

Maria Laura Marques dos Santos**

Pietro Gabriel Garcia***

Vitória Imaculada Peixoto Barbosa****

Resumo: Esta pesquisa de iniciação científica tem como objetivo central explorar a aplicação da agricultura de precisão (AP) na canavicultura, com foco em seu papel no combate fitossanitário e no manejo nutricional do solo. A AP, tem como princípio fundamental uma abordagem tecnológica que visa otimizar a produção e minimizar o impacto ambiental, por meio da utilização de ferramentas como GPS, sensores, drones e softwares de geoprocessamento. Como consequência, é possível gerar mapas detalhados da lavoura, monitorar o desenvolvimento da cultura em tempo real e identificar variações de fertilidade e umidade do solo. Dessa forma, a propriedade rural deixa de ser vista como uma unidade homogênea e passa a ser tratada como um conjunto de áreas com características específicas, permitindo um gerenciamento individualizado de cada parte da lavoura. No contexto da canavicultura, a AP é fundamental para melhorar o combate fitossanitário, possibilitando a identificação e o tratamento localizado de doenças, o que reduz o uso de defensivos e seus impactos. Paralelamente, o manejo nutricional do solo é aprimorado pela análise de dados geoespaciais e pela aplicação variável de fertilizantes, garantindo a nutrição adequada e a saúde do solo.

Palavras chaves: agricultura de precisão; cana-de-açúcar; doenças; solo.

* Aluna do curso Técnico em Agropecuária, na Etec Professor Francisco dos Santos -
brendaluzia2007pereira@gmail.com

** Aluna do curso Técnico em Agropecuária, na Etec Professor Francisco dos Santos - 07marialaura@gmail.com

*** Aluno do curso Técnico em Agropecuária, na Etec Professor Francisco dos Santos -
pietrogarcia19@gmail.com

**** Aluna do curso Técnico em Agropecuária, na Etec Professor Francisco dos Santos -
vitoriabpeixoto@gmail.com

1.INTRODUÇÃO

No Brasil, a Agricultura de Precisão (AP) surgiu entre os anos de 1996 e 2001, por meio de pesquisas voltadas para a cana-de-açúcar. Foi a primeira cultura a trabalhar com as diferenças na fertilidade do solo ao longo da lavoura, no estado de São Paulo. A prática consiste em um sistema de produção adotado por agricultores em países com alta tecnologia, onde é denominada *Precision Agriculture*. Sua origem teve seu marco inicial em 1929, nos Estados Unidos (EUA), com pesquisas pioneiras na Universidade de Illinois. Atualmente, a prática convencional utilizada consiste em tratar grandes áreas como se fossem iguais, adotando uma abordagem padrão para a distribuição de recursos essenciais (como fertilizantes, defensivos e irrigação). Essa atitude implica que a mesma quantidade do adubo seja aplicada uniformemente em toda a área de cultivo, atendendo apenas às exigências gerais do terreno. Como consequência, as particularidades e variações específicas de cada parte do campo deixam de ser consideradas. O mesmo ocorre com os demais elementos necessários à produção, resultando em uma variação na colheita sem padrão definido. A agricultura de precisão é um sistema de gestão agrícola baseado na coleta e análise de informações detalhadas. Ela busca transformar o quadro atual da produção rural por meio da aplicação direcionada e eficiente. A AP proporciona maior conhecimento sobre a produção, o que facilita a tomada de decisões. Entre seus principais benefícios estão a redução de custos da lavoura, o aumento da competitividade, o manejo diferenciado por cada parte da lavoura, considerando as particularidades de cada pedaço da terra, e o uso mais eficiente dos produtos, o que contribui para um ambiente mais saudável e ainda permite que o agricultor ganhe mais tempo. Nesse contexto, a AP tem como objetivo o melhor aproveitamento e desempenho das lavouras, por meio de aplicações mais exatas de recursos como adubos e defensivos, preparo do solo adequado e uso de tecnologias modernas para corrigir questões pontuais. Com isso, a produção tende a aumentar, gerando vantagem competitiva para o produtor. Apesar dos custos iniciais elevados, a eficiência do sistema compensa o investimento, tanto economicamente quanto em relação à parte ambiental. Além disso, a tecnologia permite aplicar os recursos exatamente onde são necessários. As inovações aplicadas mostram resultados duradouros, com aumento de lucros e evitam prejuízos. Essa atitude é fundamental para a transformação e modernização do setor agrícola,

que se encontra sob a pressão de atender a uma demanda alimentar cada vez maior, ao mesmo tempo em que necessita incorporar princípios da sustentabilidade em suas operações.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A presente secção estabelece o embasamento conceitual para a análise da deficiência nutricional do solo juntamente ao combate fitossanitário em canaviais, com foco na contribuição das tecnologias da Agricultura de Precisão (AP). A busca por máxima eficiência produtiva na agricultura moderna exige o manejo simultâneo de múltiplos fatores limitantes, que vão desde a sanidade vegetal até a saúde estrutural e química do solo.

As lavouras de todo o Brasil estão suscetíveis a embates fitossanitários, que, quando não notados e tratados de maneira correta ou no tempo de prevenção adequado, podem resultar em perda gradativa de produção (PRETTY e BHARUCHA, 2015). Um exemplo notável é a ferrugem alaranjada, uma doença que se dissemina rapidamente e impacta diretamente na área foliar da planta, diminuindo sua capacidade fotossintética. Por esse motivo, o uso de tecnologias que detectam alterações visuais precoces na planta é de grande importância. A AP, por meio de seus instrumentos, possibilita essa detecção. Sensores remotos instalados em satélites, drones ou tratores possibilitam a captação de imagens com alta resolução espectral. Essas imagens, processadas por índices como o de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), são capazes de identificar alterações na vegetação que indicam desgaste físico, mesmo antes da manifestação visível dos sintomas (Vieira, 2000; Bernardi et al., 2014).

Paralelamente ao manejo fitossanitário, a saúde e a estrutura do solo representam um fator crítico na produtividade. Dentro do contexto agroindustrial de culturas como a cana-de-açúcar, a monocultura é um sistema amplamente adotado, que "permite a concentração no manejo de determinada cultura, o que pode simplificar a mecanização e o uso de tecnologias específicas" (OLIVEIRA, 2024). O intenso tráfego de máquinas pesadas é um dos grandes fatores inerentes a esse sistema intensivo que contribui significativamente para o problema da compactação do solo. A

compactação é um problema estrutural que limita o desenvolvimento radicular e o fluxo de água e gases. As consequências diretas deste problema incluem maior risco de inundações superficiais e intensificação da erosão. A relevância desse problema é tão intensa que, segundo MACHADO (2003), a compactação pode reduzir a produtividade agrícola em até 60%, atuando como um "teto degradante" na produção mesmo quando outros fatores, como pragas ou acidez, são controlados.

A Agricultura de Precisão emerge como a solução para endereçar esses desafios de forma integrada e localizada. A AP provê a capacidade de atuar não apenas no combate fitossanitário e estrutural, mas também na otimização da absorção de nutrientes. Segundo Rodrigues et al. (2018), apud SILVA (2024), o uso de ferramentas como sensores, GPS, softwares de gestão e drones têm permitido um monitoramento detalhado do solo, da umidade e do crescimento das culturas. Essa Aplicação em Taxa Variável (ATV), fundamentada nos dados coletados, contribui diretamente para a otimização da absorção de nutrientes pelas plantas, pois permite aplicar insumos apenas onde e na quantidade necessária. O resultado é a minimização do desequilíbrio químico do solo, a redução da sobrecarga de insumos, um fator-chave na degradação ambiental, e a maximização da produtividade, reduzindo desperdícios.

A adoção e a eficiência dessas tecnologias são amplamente reconhecidas no setor. Dados provenientes de estudos científicos, que entrevistaram 1,2 mil produtores, indicam que 65,6% relataram o uso e a eficiência da AP nas operações de fertilidade, plantio e aplicação (LEANDRO ABREU, 2021). Isso reforça a transição da agricultura tradicional para um modelo baseado em dados, mais sustentável e produtivo.

3.METODOLOGIA

O presente estudo se desenvolve sob uma abordagem predominantemente qualitativa, visando a interpretação aprofundada e a análise crítica das informações, e é classificado como aplicado, dada sua finalidade de gerar conhecimentos com potencial para otimizar práticas no agronegócio canavieiro. Os procedimentos técnicos utilizados consistiram integralmente em pesquisa bibliográfica e documental,

consideradas as fontes ideais para a fundamentação teórica e a coleta de dados neste contexto. A pesquisa bibliográfica envolveu o levantamento e a análise crítica de material científico já publicado, incluindo artigos, monografias, dissertações, teses e livros específicos sobre AP na cana-de-açúcar. O foco desta revisão foi identificar e sistematizar os resultados positivos da AP, com ênfase nas estratégias de monitoramento, prevenção e controle de pragas e na otimização da aplicação de insumos para o manejo nutricional. Complementarmente, a pesquisa documental utilizou relatórios técnicos, documentos institucionais e dados especializados de fontes confiáveis, a fim de obter informações atualizadas e fidedignas que atestem a eficácia e a necessidade dessas inovações tecnológicas no aumento da produtividade e sustentabilidade da cultura. Finalmente, o material coletado foi submetido à análise de conteúdo, visando a identificação das principais tendências e evidências que comprovem a relevância da Agricultura de Precisão para os pilares do controle fitossanitário e da gestão da fertilidade do solo.

4.DESENVOLVIMENTO

1. Agricultura de Precisão no Combate Fitossanitário: Estratégias e Tecnologias.

1.1. Combate fitossanitário: Detecção e Controle da Ferrugem da Cana-de-Açúcar.

A ferrugem alaranjada é uma doença fúngica que afeta a cana-de-açúcar, causada pelo fungo *Puccinia kuehnii*. Trata-se de uma das mais importantes doenças da cultura, devido ao seu potencial de causar perdas significativas na produção de açúcar e etanol, principalmente em canas mais vulneráveis à doença (EMBRAPA, 2008). Além disso, seu impacto vai além da produtividade, afetando diretamente a qualidade da cana e elevando os custos de produção devido à necessidade de monitoramento constante e aplicação de defensivos agrícolas.

A doença foi identificada pela primeira vez no Brasil em 2009, no estado de São Paulo, e desde então se espalhou rapidamente pelas regiões produtoras. Acredita-se que o fungo tenha chegado ao país por correntes de ar, de outras regiões tropicais onde já havia causado prejuízos, como a Austrália e os Estados Unidos (EMBRAPA, 2008). Sua rápida disseminação no território brasileiro se deve ao espalhamento aéreo dos esporos do fungo e à ampla presença de variedades cultivadas suscetíveis à doença e sem resistência genética adequada.

1.2. Identificação e Sintomas da Ferrugem Laranja.

Os sintomas se desenvolvem inicialmente como manchas amarelas, visíveis em ambas as faces das folhas. Com o tempo, essas manchas evoluem para lesões maiores com uma área desbotada ao redor da mancha de ferrugem, e posteriormente, para bolinhas alaranjadas na parte de baixo da folha (FERRARI et al., 2013). O aspecto empoeirado dessas bolinhas é resultado da liberação de esporos do fungo, que podem ser facilmente espalhados pelo vento, facilitando a disseminação da doença em áreas extensas. A junção das lesões, comum em infestações severas, reduz significativamente a área foliar responsável pela fotossíntese da cana-de-açúcar, impactando diretamente no acúmulo de sacarose e no desenvolvimento da cultura (FERRARI et al., 2013). É importante destacar que a ferrugem alaranjada pode ser confundida com a ferrugem marrom (*Puccinia melanocephala*), que apresenta bolinhas menores, de coloração marrom-avermelhada, e localização mais fácil de se identificar nas folhas. O diagnóstico diferencial entre essas duas doenças é essencial para a escolha do controle adequado.

1.3. Epidemiologia da Ferrugem da Cana-de-Açúcar: Análise de Condições Favoráveis à Disseminação.

O fungo *P. kuehnii* apresenta ciclo de vida curto e pode completar vários ciclos em uma única safra, principalmente em condições climáticas favoráveis, como alta umidade e temperaturas entre 17 °C e 25 °C. A germinação dos esporos pode ocorrer em uma faixa mais ampla de temperatura (5 °C a 34 °C), provocando que a doença

tenha grande capacidade de adaptação em diferentes climas (EMBRAPA, 2008). Outro fator crítico é o vento, responsável pela movimentação dos esporos a longas distâncias. Isso torna o controle ainda mais difícil, pois áreas tratadas ou com baixos índices de infecção podem ser rapidamente infectadas novamente.

1.4. Impacto Econômico: Custos de Produção e Perdas de Produtividade.

A ferrugem alaranjada causa reduções significativas na produtividade (TCH – Toneladas de Cana por Hectare) e no teor de ATR (Açúcar Total Recuperável), principal indicador da qualidade da cana. A redução da longevidade do canavial também é evidente, onde plantas severamente afetadas tornam-se menos resistentes e menos produtivas nos ciclos seguintes, exigindo plantio mais cedo e tornando mais caro o custo da renovação (ZENERATTO, 2017). Estudos realizados na Austrália demonstraram perdas de até 24% em áreas altamente suscetíveis à doença, enquanto no Brasil, apesar da maior diversidade genética de variedades cultivadas, ainda há relatos de prejuízos relevantes, especialmente em áreas onde o monitoramento não é contínuo (ZENERATTO, 2017).

1.5. Estratégias de Manejo e Controle.

O controle eficaz da ferrugem alaranjada requer um manejo integrado, baseado em quatro pilares principais: prevenção, monitoramento, controle químico e resistência genética. O uso de variedades resistentes, continua sendo a estratégia mais eficaz e de menor custo ao longo do tempo. Diversos programas de melhoramento genético, como os conduzidos pelo IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), têm obtido sucesso na identificação de variedades com alta resistência à doença. O manejo cultural, como espaçamento adequado entre plantas, controle de adubação e práticas que favoreçam a ventilação de folhas da parte superior da planta, reduz as condições ideais para a infecção.

Em cultivos com variedades suscetíveis ou em momentos de surtos da doença, o uso de fungicidas sistêmicos e protetores torna-se necessário. A escolha do produto,

sua dose e momento de aplicação devem ser orientados por dados de monitoramento e previsão climática, para garantir eficácia e reduzir o risco de resistência fúngica. (COLLETTE et al., 2016). A higienização de equipamentos e a restrição de movimentação entre talhões infectados e saudáveis complementam o conjunto de práticas preventivas e são fundamentais para evitar surtos.

2. Otimização do Manejo Fitossanitário: Como a Agricultura de Precisão Revoluciona a Detecção e o Controle de Doença.

A agricultura de precisão representa um conjunto de tecnologias que tem revolucionado a forma como os sistemas agrícolas são conduzidos, ao permitir a tomada de decisões baseadas em dados georreferenciais, variabilidade espacial e temporal e monitoramento contínuo da lavoura. No contexto da cana-de-açúcar, sua aplicação tem se mostrado promissora no combate a doenças com grande importância econômica, como a ferrugem alaranjada (*Puccinia kuehnii*). Ao integrar dados climáticos, sensores remotos, imagens de satélite e softwares de gestão, essas tecnologias permitem o monitoramento precoce de doenças, aplicação localizada de defensivos e identificação de áreas críticas dentro dos talhões, otimizando recursos e reduzindo perdas produtivas e ambientais.

2.1 Mapeamento e Monitoramento da Ferrugem com Tecnologias de Agricultura de Precisão.

A ferrugem alaranjada é uma doença que se dissemina rapidamente e impacta diretamente na área foliar da planta. Por esse motivo, o uso de tecnologias que detectam alterações visuais precoces na planta é de grande importância. Sensores remotos instalados em satélites, drones ou tratores, possibilitam a captação de imagens com muitas cores e tons, capazes de identificar alterações na vegetação (NDVI), indicando desgaste físico, mesmo antes da manifestação visível dos sintomas (Vieira, 2000; Bernardi et al., 2014). Essa detecção precoce permite uma adoção rápida de medidas fitossanitárias, como pulverizações pontuais com fungicida, além

disso, permite um mapeamento de áreas de risco dentro dos talhões, priorizando ações de manejo, que paralelamente acompanha a evolução da doença ao longo do tempo com imagens sequenciais, facilitando a avaliação da eficácia do controle aplicado.

Ademais, sensores de campo que monitoram microclima, como temperatura, umidade do ar, hidratação e umidade foliar, são aliados importantes na antecipação da doença. Com essas informações, é possível identificar os momentos de maior risco de infecção pelo fungo e planejar intervenções mais eficientes (BERNARDI et al., 2014). Trabalhando em conjunto, a aplicação em taxa variável, por meio de pulverizadores equipados com GPS e controle de seções, permite o uso racional de defensivos, reduzindo custos, minimizando o impacto ambiental e evitando o desenvolvimento de resistência fúngica por uso excessivo e errado.

3. Manejo Nutricional do Solo: Prevenção e Otimização para a Produtividade da Cultura.

3.1 Contextualização da Prática de Monocultura e Queima de Palha de cana.

A desnutrição do solo, problema causado em razão da perda de nutrientes e características essenciais, é um problema enfrentado por inúmeros trabalhadores da área agrícola e produtora de cana-de-açúcar, que gera desequilíbrio e prejuízos ambientais, além de menor rendimento e produtividade. No Brasil, a produção de cana-de-açúcar remonta ao período colonial, intensificada em meados do século XVI. Historicamente, essa produção se baseia no modelo de *“Plantation de exportação”*, uma prática colonial europeia caracterizada por quatro elementos principais: latifúndios, uso de mão de obra escravizada, produção voltada para a exportação e, em especial, a prática de monocultura.

Essa prática de uma cultura, é característica da estrutura fundiária do país desde o início do desenvolvimento agrário e possui grande influência no desgaste e carência nos solos dos canaviais. A Monocultura teve como origem a região da Zona da Mata, no Nordeste do país, em virtude das condições climáticas favoráveis e das

características do solo e do relevo, tornando-se assim, por um longo período, a base da economia brasileira. Além disso, a partir da introdução da Revolução Verde, por meio de novas técnicas agrícolas, e com a necessidade de agilizar e otimizar a colheita, surge a prática de queima de palha, com o objetivo de remover a palha e outros resíduos vegetais, facilitando o acesso e o corte da cana, desse modo, contribuindo com o trabalho dos colhedores manuais e o uso de máquinas colheitadeiras. Vale ressaltar que essa técnica, embora usada para simplificar a colheita, tem um custo ambiental significativo, especialmente na perda de nutrientes e na saúde do solo, tema que será abordado na seção “*Consequências*”.

3.2 Prática de monocultura na cana-de-açúcar e o empobrecimento gradual do solo.

O termo monocultura refere-se ao plantio de uma única espécie vegetal, exploradas por técnicas de baixa produtividade e realizadas em propriedades rurais de grande extensão. Ademais, esse modo de cultivo está diretamente relacionado à demanda internacional, uma vez que sua produção é feita objetificando a exportação. O método é amplamente difundido em todo o mundo em razão da sua eficiência em produzir grandes quantidades em menor tempo e baixo custo de produção.

“Cultivo de uma única espécie vegetal em uma determinada área durante uma ou mais safras consecutivas, permite a concentração no manejo de determinada cultura, o que pode simplificar a mecanização e o uso de tecnologias específicas” (OLIVEIRA, 2024).

Foi na Segunda Revolução Agrícola que a técnica de Monocultura foi incrementada, juntamente a práticas de indústrias de máquinas, sementes e material genético. Em outros termos, teve sua ascensão juntamente com a apropriação da agricultura pela indústria. Como consequência, muitos dos problemas ambientais são decorrentes da utilização errônea desse avanço industrial no setor agrônômico, uma vez que quem maneja esse modelo agrícola não mais é um produtor rural rústico, mas um empresário-gestor, em que a competitividade individual sobressai sobre a lógica comunitária. “A monocultura não é apenas um sistema de produção agrícola, mas um paradigma que destrói a diversidade em múltiplos níveis”. (SHIVA, 2014).

3.3. A Queima da Palha da Cana-de-Açúcar: Uma Prática Tradicional e seus Desafios Atuais.

A queima da palha de cana é uma prática usada para promover a limpeza parcial do canavial e facilitar o corte/ colheita da cana manual ou mecânica. (SÃO PAULO (ESTADO). SEMIL, 2024). A fim de facilitar a colheita manual, que por sua vez aumentará a quantidade de cana cortada diariamente e reduzirá o esforço físico necessário. O exercício da prática é regulamentado pelo decreto federal 2.661 de 1988, em que a prática de queima é definida como:

"O emprego do fogo como fator de produção e manejo em atividades agropastoris ou florestais, e para fins de pesquisas científica e tecnológica, em áreas com limites físicos previamente definidos". (BRASIL, 1998).

Um fator decisivo para a preferência da utilização de fogo sob a de máquinas para colheita é o rendimento da cana-de-açúcar. No entanto, a queima de palha causa sérios prejuízos ambientais e à saúde humana, incluindo a degradação do solo pela perda de matéria orgânica e microbiana, a contaminação do ar com fuligem e gases tóxicos, além da perda de biodiversidade pela morte da fauna e da flora.

Como meio solucionador, os Estados brasileiros têm criado regras e proibições regionalizadas e personalizadas para controlar a queima, como o estabelecimento de horários e até mesmo a estimativa da ventania. Assim explica a analista ambiental da CPRJ, Fernanda Soares: "[...] Com a finalidade de controlar ao máximo com fiscalização para que as regras sejam seguidas e, desta forma, impactar menos possível no meio ambiente". (SILVA, 2024). Conclusivamente, a transição das leis acerca da queima da palha tem sido um processo contínuo de restrição e conscientização ambiental, impulsionada pela lei estadual n. 0 11.242/2002, que visa a eliminação gradual da prática. A legislação atual, representada por resoluções da SEMIL e da CETESB, estabelece limites mais rigorosos para as autorizações de clima, exigindo planos de manejo e limite de atividades a momento específicos.

3.4. Panorama da Canavicultura Brasileira: Cenário Atual.

Nos tempos vigentes, o Brasil é considerado o produtor de mais da metade do açúcar consumido mundialmente, além disso, detém uma venerável colocação no ranking internacional de etanol. Não obstante, também gera a partir de seus subprodutos, alimentos para animais ruminantes, produtos farmacêuticos e químicos, e é utilizado na produção energia biogás. No país, a dimensão do cultivo de cana ultrapassa grande parte dos países exportadores.

"A cana-de-açúcar ocupa hoje por volta de 6 a 6,5 milhões de ha de terras, o equivalente a 1,5 % dos solos cultivados do Brasil, caracterizando um sistema de monocultivo que tem especial significado econômico e social para o país". (AMACHADO e HABIB, 2009, p.119).

Concentradas especialmente na região Sudeste do país e gradativamente manifestadas na região centro-oeste, são encontradas mais de 400 usinas de processamento de cana, com estimativa de uma área de mais de 10,2 milhões de hectares voltadas à produção. A área destinada para a cultura se mantém relativamente estável em relação a 2024/25, com um ligeiro aumento de 0,3% chegando a 8,79 milhões de hectares. Já a produtividade média dos canaviais está estimada em 75.451 quilos por hectares, uma queda de 2,3% quando comparada com a última safra. ([GOV.BR](https://gov.br), 2025). Segundo a Conab (Companhia Nacional de Abastecimento), essa brusca queda relaciona-se às condições climáticas adversas como baixas chuvas e altas temperaturas, principalmente na região Centro-Sul.

É importante frisar que, no âmbito vigente, a insistente prática de queima de palha tem causado perdas da ordem de 30% da matéria bruta, que poderia ser aproveitada para a produção de biogás ou geração de energia de biomassa ao ser queimada em caldeiras. Adiciona-se a isso, a prática de monocultura persiste como modelo dominante, que perpetua um contexto com desafios ambientais e sociais.

4. Consequências: Impactos da Monocultura e Queima da Palha no Solo.

A monocultura da cana-de-açúcar e a prática da queima da palha para a colheita desencadeiam significativos impactos ambientais, que podem ser agrupados em três eixos principais: a degradação da fertilidade química do solo, a deterioração de sua estrutura física e a perda da saúde biológica.

A fertilidade química do solo é diretamente comprometida pela prática monocultora. O cultivo contínuo de uma única espécie vegetal em uma mesma área leva ao esgotamento acelerado de nutrientes específicos, visto que cada planta possui demandas nutricionais particulares. Sem a rotação de culturas, o solo é privado do tempo e da diversidade necessários para a reposição natural de seus componentes minerais. A este cenário, soma-se o impacto da queima da palha, que ao destruir a matéria orgânica superficial, prejudica a ciclagem de nutrientes e contribui para a perda da biodiversidade do solo.

4.1 O Impacto Atributos Químicos, Físicos e Biológicos do Solo Canaviais.

A degradação química do solo consiste na modificação de seus atributos fundamentais, um processo que limita seu potencial para manter a vida vegetal e, conseqüentemente, afeta de forma negativa o meio ambiente e a produtividade agrícola. No contexto da monocultura, essa degradação é acelerada, pois o cultivo repetitivo de uma única espécie leva à exaustão de nutrientes específicos, culminando no empobrecimento geral do solo.

A capacidade de um solo em fornecer elementos cruciais ao crescimento das plantas relaciona-se a sua disponibilidade de macronutrientes essenciais, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) — essenciais para o cultivo de cana-de-açúcar. A remoção contínua desses elementos pela colheita, sem a devida reposição, é a principal causa da perda de sua capacidade produtiva. Um solo quimicamente esgotado torna-se incapaz de nutrir as plantas adequadamente, essa condição de infertilidade impede o desenvolvimento pleno das culturas, e resulta na diminuição da produção e, em casos extremos, na inutilização da terra para fins agrícolas.

Uma consequência adicional do manejo inadequado é a acidificação, processo derivado do acúmulo de íons de hidrogênio (H^+) que reduz o pH do solo. Solos excessivamente ácidos podem aumentar a toxicidade de certos elementos, como o alumínio, e diminuir a disponibilidade de outros, prejudicando a absorção de água e nutrientes pelas raízes.

4.1.1. Degradação Química: Esgotamento Nutricional e Acidificação do Solo.

Adicionalmente ao esgotamento nutricional causado pela monocultura, a degradação química e biológica do solo é intensificada pela prática da queima da palha nos canaviais. As altas temperaturas geradas neste processo — que podem ultrapassar 100 °C no subsolo e atingir 800 °C acima da superfície — impactam severamente a biota do solo, um componente essencial para a manutenção de sua fertilidade.

Entre as consequências diretas desta prática, destacam-se: o aumento do teor de cinzas, a oxidação acelerada da matéria orgânica e a quebra do equilíbrio ecológico pela eliminação da vegetação nativa e da fauna local. Essas alterações resultam em um solo compactado, infértil e desprotegido. Essa exposição do solo, desprovido de sua cobertura vegetal, torna-o um terreno propício à ação prejudicial da lixiviação. Neste processo, a água da chuva filtra os elementos solúveis pelo perfil do solo, arrastando os nutrientes para camadas mais profundas, fora do alcance radicular. Tal fenômeno não só diminui a eficiência de fertilizantes, elevando os custos agrícolas, como também representa um grave risco de contaminação para os lençóis freáticos.

4.1.2. Degradação Física: Compactação e Erosão.

O segundo eixo de impactos ambientais da monocultura e das queimadas é a degradação da estrutura física do solo. Este processo manifesta-se principalmente de duas formas: pela compactação, que consiste no aumento da densidade do solo e na redução de sua porosidade, e pela erosão, que é a remoção da camada superficial do solo por agentes como a água e o vento. A compactação é gerada por forças que podem ser de origem externa ou interna. No contexto da canavicultura, a causa predominante são as forças externas, especificamente a pressão excessiva exercida pelo tráfego contínuo de tratores e veículos pesados, que comprime o solo, dificultando a circulação de água e ar. As implicações da compactação são severas, limitando o crescimento das raízes e, conseqüentemente, a absorção de nutrientes. A baixa infiltração de água aumenta o escoamento superficial, o que agrava a erosão e pode causar alagamentos.

As consequências diretas incluem maior risco de inundações superficiais e intensificação da erosão. A relevância desse problema é tão intensa que, segundo a MACHADO (2003), a compactação pode reduzir a produtividade agrícola em até 60%, atuando como um teto degradante na produção mesmo quando outros fatores, como pragas ou acidez, são controlados. Nesse ponto, a monocultura e a prática de queimadas contribuem diretamente para a degradação física por duas vias principais. Primeiramente, o uso repetitivo e padronizado de maquinário pesado intensifica a compactação. Em segundo lugar, ao deixar o solo descoberto após a colheita ou então, extremamente vulnerável após uma queimada, eliminam a proteção oferecida pela cobertura vegetal, pela própria palha de cana-de-açúcar e pelas diversas estruturas radiculares que estabilizam o solo em um sistema de policultura. Essa falta de diversidade e proteção torna o terreno extremamente suscetível à erosão hídrica e eólica.

4.1.3. Degradação Biológica: Simplificação da Biota e Perda de Funcionamento.

Finalmente, a degradação biológica conclui a trinca de impactos no solo, interligando-se aos danos químicos e físicos. A saúde biológica é comprometida tanto pela queima da palha quanto pela estrutura da monocultura. A primeira afeta o solo diretamente: as altas temperaturas da queima dizimam a micro e a macrofauna da camada superficial, simplificando drasticamente a complexidade da comunidade microbiana. A remoção da biota do solo compromete funções ecossistêmicas vitais. Processos como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes, a regulação de doenças e a manutenção da estrutura física do solo são executados por esses organismos. A perda dessa biodiversidade funcional resulta em um solo menos resiliente e fértil, o que, por sua vez, impacta a produtividade agrícola e agrava a erosão.

Nesse contexto, os microrganismos atuam como bioindicadores precisos da saúde do solo. Enquanto as alterações nos teores de matéria orgânica — o principal indicador de fertilidade em solos tropicais — levam anos para serem detectadas, a comunidade microbiana responde rapidamente a qualquer perturbação. Segundo a pesquisadora Ieda Mendes, da Embrapa, a biologia é o que efetivamente faz um solo

"funcionar", tornando-se a "maquinaria biológica" que transforma uma mistura de areia, limo e argila em um solo vivo e funcional (MENDES, 2018). Adicionalmente, a própria estrutura da monocultura cria um desequilíbrio biológico. A uniformidade genética e a simplificação do ecossistema tornam a lavoura um alvo fácil para a proliferação de pragas e doenças. Isso desencadeia um ciclo vicioso de dependência de defensivos agrícolas, em que o uso intensivo de agrotóxicos contamina o solo e os recursos hídricos, eliminando organismos não-alvo —incluindo predadores naturais de pragas— e, crucialmente, induz a resistência dos patógenos. Com o tempo, as pragas tornam-se imunes aos químicos, exigindo doses maiores ou produtos mais tóxicos, em um ciclo que degrada o ambiente e reduz a produtividade a longo prazo.

5. Benefícios da utilização da Agricultura de Precisão na prevenção e mitigação dos efeitos adivinhos da produção de cana de açúcar.

Diante dos desafios agronômicos e ambientais impostos pela monocultura e pela queima de palha, a Agricultura de Precisão (AP) surge como um novo paradigma de gestão, capaz de transformar os sistemas de produção da cana-de-açúcar. Longe de ser apenas uma tecnologia, a AP oferece uma abordagem estratégica que mitiga os efeitos negativos da debilidade nutricional e da variabilidade do solo, ao mesmo tempo em que aprimora as práticas sustentáveis. Ela não só otimiza o manejo dentro do sistema de monocultura, mas também potencializa a adoção da colheita de cana crua, tornando-a uma alternativa eficiente e superior à prática da queima. Dessa forma, a AP se consolida como uma ferramenta essencial para o avanço da produtividade e da sustentabilidade a longo prazo.

A transição para um modelo de gestão agrícola mais sustentável, especialmente no contexto da monocultura da cana-de-açúcar, demanda a adoção de tecnologias capazes de mitigar os efeitos negativos de práticas históricas, como o esgotamento nutricional do solo. Nesse cenário, a Agricultura de Precisão (AP) emerge não como uma ferramenta para eliminar a monocultura, mas como uma abordagem estratégica para otimizar seu manejo, abordando a variabilidade espacial do solo e do talhão de forma granular e localizada. A principal contribuição da AP reside na sua capacidade de diagnosticar e gerenciar a heterogeneidade da lavoura.

Diferentemente do modelo de manejo uniforme, a AP baseia-se na coleta de dados georreferenciados para a criação de mapas detalhados de atributos do solo, como níveis de nutrientes, pH, e índices de compactação. Utilizando tecnologias de sensoriamento remoto (como imagens de satélite e drones) e análise de solo por amostragem em grade, a AP identifica com exatidão as zonas que sofrem com deficiência ou excesso de nutrientes, ou ainda com a degradação física. Esse mapeamento fornece a base para um entendimento preciso do problema, que a monocultura tende a intensificar de forma não homogênea ao longo do tempo.

Com o diagnóstico da variabilidade em mãos, a AP permite a implementação da Aplicação em Taxa Variável (ATV). Esta tecnologia utiliza equipamentos agrícolas controlados por GPS que ajustam automaticamente a dosagem de insumos — como fertilizantes e corretivos — de acordo com a necessidade específica de cada zona mapeada. Segundo Rodrigues et al. (2018), apud SILVA (2024), o uso de sensores, GPS, softwares de gestão e drones têm permitido um monitoramento detalhado do solo, da umidade e do crescimento das culturas, reduzindo desperdícios e maximizando a produtividade. A ATV, portanto, contribui diretamente para a otimização da absorção de nutrientes pelas plantas, minimizando o desequilíbrio químico do solo e a sobrecarga de insumos, um fator-chave na degradação ambiental.

Além da aplicação direcionada, a AP incorpora o monitoramento contínuo da produtividade e da saúde do solo. Através de sensores e mapas de produtividade gerados durante a colheita, é possível avaliar a eficácia das intervenções de manejo e identificar novas áreas problemáticas. Esse ciclo de monitoramento, diagnóstico e aplicação em taxa variável cria um sistema de gestão de ciclo fechado, em que o produtor rural não apenas corrige os problemas existentes, mas também previne o surgimento de novas deficiências, promovendo a sustentabilidade do sistema produtivo a longo prazo.

6. Agricultura de Precisão como Estratégia Integrada para a Produtividade e a Sustentabilidade em Canaviais.

Nas lavouras de todo o Brasil, se torna presente os embates fitossanitários, embates esses, que podem resultar em perda gradativa de produção, quando não são

notados e tratados de maneira correta, ou no tempo de prevenção dos mesmos. (PRETTY e BHARUCHA, 2015). No entanto, não apenas com pragas e doenças lidam os produtores, mas também com a desnutrição do solo. Esse embate, principalmente na cultura da cana, quando não é cuidado é tratado de maneira correta, se torna um dos maiores vilões da lavoura.

As ferramentas disponibilizadas na Agricultura de Precisão são cruciais para um bom desenvolvimento da vida no campo, oferecendo controle preciso e monitoramento constante da lavoura e do solo. Esta oferta pode salvar a vida dos produtores quando se trata de produtividade e da redução de gastos.

“Com a utilização da agricultura de precisão, o produtor rural, seja pequeno, médio ou grande, consegue ter um aumento de até 29% na produtividade e uma redução média de 23% nos gastos com insumos”. (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil - CNA, 2021).

Os dados relatados, provém de estudos científicos, dentre 1,2 mil produtores que foram entrevistados, 65,6% relataram o uso e a eficiência nas operações de fertilidade, plantio e aplicação. (LEANDRO ABREU, 2021)

6.1 Aplicação no Campo: Ferramentas da Agricultura de Precisão.

O princípio para o combate desses problemas fitossanitários, se divide em quatro pilares. A prevenção, o monitoramento, o controle químico e a resistência genética. Com essa estrutura construída e a base consolidada, temos um alto grau de desenvolvimento. Hoje, com a agricultura de precisão inserida no campo, o auxílio de suas tecnologias é imprescindível, trazendo frutos e resultados chamativos aos produtores. No cenário da desnutrição do solo, a maior forma de evitá-lo é o monitoramento constante, se relacionando com a Taxa variável. As tecnologias responsáveis por evitar esses, e por monitorar e combater tais questões nas lavouras, são: Os drones, Equipamentos aplicados com Taxa Variável, Sensores presentes no campo e os equipamentos que auxiliam todos os citados. Com um bom monitoramento e a utilização dos equipamentos citados, torna-se mais fácil prevenir a perda de nutrientes no solo, ou até mesmo que seja causado um estresse hídrico, o que acarretará problemas futuros para o agricultor.

6.1.1. Drones e Sensoriamento Remoto: A Nova Fronteira do Monitoramento em Canaviais.

Historicamente, os drones possuíam por muito tempo somente papéis armamentistas, que ainda hoje perduram. Mas foi nos anos finais do século 20, que esses veículos aéreos, se tornaram auxiliares no campo. No primeiro momento, seu papel era de monitoramento, o que atualmente, foi muito bem desenvolvido com o passar dos anos, desempenhado também, trabalhos feitos como um pulverizador.

Os VANT, como são conhecidos esses veículos aéreos não tripulados, são utilizados no campo em sua vertente, multirotores. Esses drones possuem ampla variedade, mas todos funcionam com base nos princípios da aerodinâmica e da estabilidade. Sendo equipados com múltiplos rotores, os *Vant* possuem a capacidade complexa de realizar manobras e de se mover em diferentes direções. Assim, se torna capaz de realizar suas funções de monitoramento das áreas desejadas e nas aplicações de insumos.

De acordo com o Blog do GEO-AGRI

Com os drones, é possível definir áreas, fazer o levantamento topográfico do terreno, gerar um mapa de saúde da vegetação, realizar amostragem do solo, realizar o gerenciamento estratégico do plantio, entre muitas outras aplicações, que dependerá da necessidade do agricultor . (BLOG-GEOAGRI ,s.d)

Para desempenhar todas essas funções, alguns tipos diferentes de drones são utilizados. Os principais, na agricultura, são os de asa fixa como mostrado na Imagem 1 e os multirotores, exposto na imagem 2.

Imagem 1 – Drone asa fixa mapeando uma lavoura.



Fonte: Revista Irrigazine (2019).

Esses são escolhidos devido sua grande autonomia de voo, e sua capacidade de transportar grandes sensores, além das câmeras tradicionais. O objetivo deste, é de cobrir grandes áreas, sendo utilizados com um propósito de monitoramento e mapeamento de grandes propriedades. Sua autonomia e capacidade de carga, permite que usemos equipamentos avançados de sensoriamento, o que resultará em um detalhamento maior de dados sobre o estado da lavoura.

Imagem 2 - Tipos de drones multirotores



Fonte: Giovanni (2020).

Esses, são almejados pela sua alta estabilidade e facilidade de operação. São utilizados para tarefas que requerem maior precisão, como por exemplo, a aplicação

localizada de insumos, auxilia na detecção de pragas e doenças através do seu detalhamento em suas inspeções na lavoura.

6.1.2. Sistemas Inclusos Nos drones.

Os drones, analisam e inspecionam as culturas, por meio de câmeras embutidas nos mesmos. As imagens produzidas permitem que os produtores monitorem constantemente suas terras, diferenciando plantas saudáveis daquelas infectadas, podendo assim, monitorar a proliferação de pragas ou doenças, de forma eficaz. Para a produção dessas imagens, contamos com dois grupos de câmeras: RGB: câmera responsável por capturar cores de maneira natural, como é visto aos olhos humanos, ou seja, no espectro Visível; Multiespectrais: câmeras que desfrutam de vários sensores, elas são capazes de captar frequências não visíveis aos olhos humanos.

6.1.3. Índice NDVI.

Através desses canais espectrais, foram criados índices. Ferramentas essas, que auxiliam a monitoração e a identificação de pragas e doenças nas culturas. O mais utilizado entre os agricultores, é o NDVI, Índice de vegetação por diferença normalizada, é um sistema para medir a saúde das plantas com base em sua reflexão de luzes, em frequências específicas. Seu funcionamento ocorre quando a luz solar atinge a estrutura foliar, certos comprimentos de onda são absorvidos, enquanto outros são refletidos. Em uma planta saudável, a clorofila absorve fortemente a luz visível, enquanto a estrutura celular das folhas reflete intensamente a luz do infravermelho próximo (NIR). Em uma planta que enfrenta desafios e pode se considerar doente, ela absorve mais luz infravermelha. Então ela reflete menos o infravermelho e mais a luz vermelha.

Essas ondas refletidas, são capturadas e assim, uma equação com as informações geradas, são dadas. A refletividade da área, é dada por: Refletividade do infravermelho próximo (NIR) menos a refletividade vermelha (VIS), dividido pelo NIR

mais o VIS. A equação é exposta pela Imagem 3. E o seu funcionamento em formato de mapa, na Imagem 4.

Imagem 3: equação do índice NDVI

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{VIS}}{\text{NIR} + \text{VIS}}$$

Fonte: AEGRO – 2020

A partir dessa equação temos valores de NDVI que variam entre 0 e 1, os quais significam:

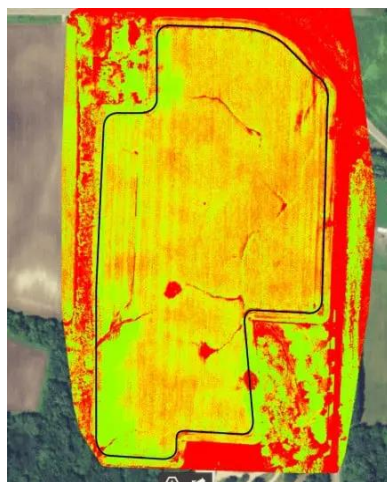
1 – 0: Planta morta ou objetivo inanimado;

0 – 0,33: Planta não saudável;

0.33 – 0.66: Planta moderadamente saudável;

0.66 – 1: Planta muito saudável.

Imagem 4: Exemplificação dos valores obtidos em formato de mapa.



Fonte: AEGRO (2020).

A partir dos valores de fitossanidade do NDVI entre -1,0 e +1,0 é possível obter os mapas NDVI. Dessa forma, para cada faixa de valores é atribuída uma cor. Por

exemplo na figura acima, as áreas com NDVI de -1 a 0 são exibidos em vermelho, de 0,0 a 0,33 são laranjas e amarelos, 0,33 a 0,66 alguma variação de verde e acima de 0,66 são verdes.

Com os drones, a identificação de pragas, doenças, ou até mesmo estresse hídrico, torna-se mais fácil. Uma vez que drones como esses, podem levantar voo de 5 a 10 vezes no dia, se necessário for. Isso, para os produtores, é de extrema importância. O monitoramento das lavouras, previne perdas totais da lavoura, facilitando a reação contra o problema e resultando em uma maior produção, sendo assim, extremamente eficiente.

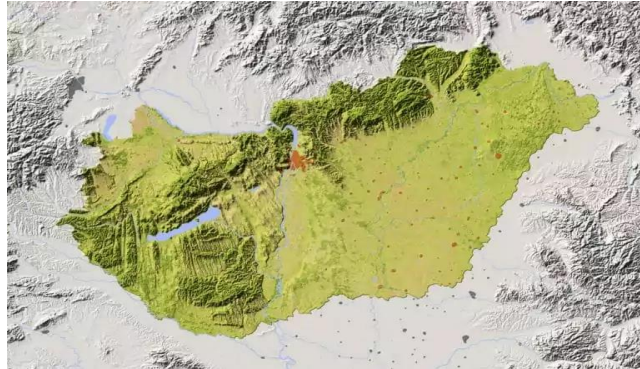
6.1.4. Taxa Variável.

A VRT- Tecnologia de taxa variável, é o que os agricultores usam para variar a taxa de insumos aplicados, maximizando a produção e minimizando o desperdício de recursos. A opção prática para a orientação dessas taxas, é o sensoriamento remoto, que pode ser realizado pelos drones. Através do sensoriamento e junto a tecnologia SIG, mapas são desenvolvidos e acoplados aos maquinários utilizados no campo, a aplicação de insumos se torna eficientes.

6.1.5. Tecnologia SIG - Sistema de Informação Geográfica.

É através dessas informações, que mapas são gerados, proporcionando uma representação visual dos dados inscritos. Um mapa sig, como representado na Imagem 5, é dinâmico e interativo, podendo revelar recursos que não foram vistos em uma avaliação anterior, evidenciando mudanças ao longo do tempo, com base nas informações fornecidas.

Imagem 5: Exemplo de um mapa SIG.



Fonte: EOS DATA ANALYTICS (2022).

Para o funcionamento das aplicações variadas, se usa mapas de prescrição que são guiados e gerados por sistemas SIGs. Esse sistema, faz do campo, um mosaico com zonas otimizadas, fazendo assim, com que cada uma dessas áreas receba exatamente os insumos e as quantidades que precisam. Essa tecnologia, acaba tendo dois métodos básicos de adoção: Baseada em mapas prescritivos, como se fossem uma receita digital, sendo criados por sistemas de controle agrícola, como o GPS, a partir de dados sobre o campo coletados. Gerando para os maquinários, ordens programadas para cada situação. Por exemplo, quando é identificado pelo sistema, a falta de nutrientes, o mapa indicará para o maquinário responsável a proporção de aplicação dos insumos que resultaram na melhora daquele solo. Ou diretamente nas máquinas que suportam a tecnologia de taxa variável, ou seja, significa que, ao em vez de algum sistema de controle, enviar as ordens programadas, os maquinários possuem a capacidade de receber esses mapas descritivos diretamente. Tornando-as mais eficientes e autônomas. Baseados em sensores, que coletam dados em tempo real dos sensores para informar as taxas para aplicação. Geralmente, essa vertente é utilizada em sistemas de irrigação, permitindo o controle uniforme da umidade do solo.

6.1.6. Tecnologia de Taxa Variável para o Controle de Doenças.

A aplicação tradicional uniforme, acaba resultando em culturas danificadas, uma vez que a aplicação dos insumos químicos é aplicada não só em plantas doentes,

mas também nas saudáveis. Podendo resultar em danos, custos desnecessários e impactos negativos no solo. A tecnologia de taxa variável, acaba oferecendo uma abordagem mais inteligente, uma vez que, com o auxílio do monitoramento constante, de sensores e de mapas antigos, pode se fazer aplicações focadas nas áreas mais afetadas, abrindo caminho para a aplicação pré-emergente, em áreas que contenham histórico de infestações, contando com o auxílio de mapas com registros de campo antigo. Ou para a aplicação pós-emergentes, que se beneficiam de imagens aéreas, ou do sensoriamento que acompanha a estação de crescimento da cultura, evitando o espalhamento dessas pragas.

6.1.7. Sistemas Utilizados como Suporte.

Os sistemas utilizados para a programação dos maquinários responsáveis pelo cuidado, são vários. Além dos índices gerados pelas câmeras inseridas nos drones, sensores e sistemas são utilizados para maior precisão no campo, facilitando nos principais problemas encontrados. Entre eles, se destacam os seguintes: Sistema Sig, responsável pela criação de mapas. Os sensores, que são responsáveis pelo monitoramento próximo da cultura. Os índices já citados. E a IOT, sistema que conecta toda a inteligência presente no campo.

6.1.8. Tecnologia SIG.

O SIG, para a agricultura de precisão, trabalha com mapas detalhados da cultura, contendo informações de produtividade e vegetação. Essas informações, fornecem aos maquinários, o ajuste de quantidades de nutrientes, herbicidas, fertilizantes e até sementes para cada zona analisada. A Imagem 6, ilustra o funcionamento da tecnologia SIG nos mapas.

Imagem 6: Mapa de produtividade baseado em dados históricos, identificando áreas mais e menos produtivas no campo.



Área verde: maior produtividade. Área vermelha: menor produtividade. Fonte: EOS DATA ANALYTICS (2022).

6.1.9. IOT – Internet das Coisas.

Esse é o sistema responsável por conectar todas as informações obtidas no campo, e assim, enviar para um único dispositivo as informações em tempo real, facilitando a tomada de decisões pelos produtores. A IOT, conecta informações dos sensores instalados pela lavoura. Sendo assim, a resposta para um problema, como por exemplo: um estresse hídrico notado em uma zona da lavoura, é comunicado ao monitor responsável pela conectividade com a iot, em seguida, informações são enviadas para sistemas de irrigação, controlados também, por meio de componentes inteligentes, dando prioridade para a área desejada. Os sensores que fazem parte do time da IOT, são capazes de monitorar a luz, a umidade, a temperatura, a umidade do solo e até mesmo os combustíveis presentes nos maquinários.

Sensores de umidade são capazes de monitorar constantemente o solo e sua função hídrica. O que junto aos sensores climáticos, pode ser quantificado para aquela determinada cultura, a quantidade de irrigação necessária. Para a nutrição das plantas, existem sistemas de sensores responsáveis pelo monitoramento dos nutrientes presentes, tanto no solo, quanto os que são ofertados e absorvidos pela planta. Todos os sistemas citados, compõem o time da agricultura de precisão. Tornando-a eficiente e auxiliando os produtores para um melhor aproveitamento e rendimento da safra.

4.CONCLUSÃO

A agricultura de precisão aplicada ao manejo de doenças da cana-de-açúcar demonstra-se como uma estratégia promissora para enfrentar os desafios atuais da produção agrícola. Embora ainda existam barreiras relacionadas ao alto custo de implementação, à necessidade de capacitação técnica e à adaptação das tecnologias às realidades regionais, os avanços recentes indicam que tais entraves tendem a ser minimizados com o tempo, ampliando a viabilidade de adoção, inclusive por pequenos e médios produtores.

Mais do que um recurso tecnológico, a agricultura de precisão representa uma mudança de paradigma na forma de conduzir a produção agrícola, unindo eficiência econômica, sustentabilidade ambiental e inovação. Ao possibilitar diagnósticos mais precisos e intervenções localizadas, contribui para a redução do uso indiscriminado de insumos, preservando o equilíbrio dos ecossistemas e promovendo maior longevidade dos canaviais.

Portanto, sua consolidação depende de um esforço coletivo, no qual pesquisadores, produtores, técnicos e instituições públicas atuem de forma integrada para viabilizar a difusão do conhecimento e a democratização do acesso às tecnologias. Nesse contexto, a agricultura de precisão deixa de ser apenas uma ferramenta opcional e se consolida como um instrumento indispensável para garantir a competitividade e a sustentabilidade da canavicultura no cenário nacional e internacional.

REFERÊNCIAS

AEGRO. O que são mapas NDVI e como utilizá-los na fazenda. Blog Aegro, 16 abr. 2020. Atualizado em: 23 jan. 2025. Disponível em: <https://blog.aegro.com.br/ndvi/>. Acesso em: 30 set. 2025.

ALIGER. Os sensores IoT e suas aplicações na agricultura e pecuária. Aliger, 2021. Disponível em: <https://aliger.com.br/os-sensores-iot-e-suas-aplicacoes-na-agricultura-e-pecuaria/>. Acesso em: 13 set. 2025.

BERNARDI, A. C. C. et al. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1002959/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar>. Acesso em: 03 ago. 2025.

BRASIL. Decreto nº 2.661, de 8 de julho de 1998. Regulamenta o parágrafo único do art. 27 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (Código Florestal), mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ed. 130, p. 1, 9 jul. 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2661.htm. Acesso em: 1 set. 2025.

COLLETTE, L. P.; et al. Controle químico da ferrugem alaranjada na cana-de-açúcar. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2016. PDF. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/6f04f313-5c03-4cb2-a610-bd6d42663116/download>. Acesso em: 03 ago. 2025

EMBRAPA. Puccinia kuehnii: Um risco para a cultura de cana. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2008. (Comunicado Técnico, 184). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/191184/3/cot1841008.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2025.

EOSDA. SIG na agricultura: como ajuda no campo. Blog EOS, 13 mar. 2023. Atualizado em: 24 abr. 2025. Disponível em: <https://eos.com/pt/blog/sig-na-agricultura/>. Acesso em: 13 set. 2025.

FERRARI, J. T. et al. Divulgação Técnica: Ferrugem Alaranjada da Cana-de-Açúcar no Brasil. Biológico, São Paulo, v.75, n.1, p.71-74, jan./jun. 2013. PDF. Disponível em: https://biologico.agricultura.sp.gov.br/uploads/docs/bio/v75_1/ferrari.pdf. Acesso em: 03 ago. 2025.

GEOAGRI. Taxa variável e controle de taxa. Blog GeoAgri. [s.d.]. Disponível em: <https://geoagri.com.br/blog/87/taxa-variavel-e-controle-de-taxa>. Acesso em: 13 set. 2025.

GONÇALVES, Wellinton Barros. A utilização de drones na agricultura de precisão. 2022. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Faculdade Anhanguera, Rondonópolis. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/56239/1/WELLINTON_BARRROS_GONCALVES.pdf. Acesso em: 13 set. 2025.

MACHADO, Arnaldo de Toledo; HABIB, A. M. G. A cana-de-açúcar: O Brasil e a agroenergia. Estudos Avançados, São Paulo, v. 23, n. 65, p. 117-134, 2009.

MENDES, I. C. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1110832/1/CircTec38IedaMendes.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.

MUNDO GEO. Tipos de câmeras para agricultura de precisão. MundoGEO, 1 jun. 2021. Disponível em: <https://mundogeo.com/2021/06/01/tipos-de-cameras-para-agricultura-de-precisao/>. Acesso em: 13 set. 2025.

OLIFER, Bruna. De solo a irrigação: Gestão agrícola melhora com câmeras potentes incorporadas à vants. Revista Irrigazine, 29 abr. 2019. Disponível em: <https://irrigazine.wordpress.com/2019/04/29/de-solo-a-irrigacao-gestao-agricola-melhora-com-cameras-potentes-incorporadas-a-vants/>. Acesso em: 19 out. 2025.

OLIVEIRA, Ana Carolina. O que é monocultura e quais seus principais impactos? Agro Blog, [S.l.], 2024. Disponível em: <https://blog.agro.com.br/o-que-e-monocultura/>. Acesso em: 1 set. 2025.

SERGIEIEVA, Kateryna. Mapa SIG: Tipos De Mapeamento Interativo E Suas Aplicações. EOS Data Analytics, 17 mai. 2022. Disponível em: <https://eos.com/pt/blog/mapa-sig/>. Acesso em: 18 out. 2025.

SHIVA, Vandana. Monocultura da vida. Fronteiras do Pensamento, [S.l.], 2012. 1 vídeo (7 min). Publicado em 22 de fevereiro de 2014. Disponível em: <https://www.fronteiras.com/index.php/assista/exibir/monocultura-da-vida>. Acesso em: 1 set. 2025.

SILVA, Franksuel Henrique da. Tecnologias e práticas sustentáveis na consultoria agrícola. Rio Verde: Instituto Federal Goiano, 2024. 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia). Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/5454/1/TCC_Franksuel%20Henrique%20Da%20Silva%20PDF.pdf. Acesso em: 17 set. 2025.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à Agricultura de Precisão. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/45530547.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2025.

ZENERATTO, M. A. Viabilidade econômica do controle de ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar. 2017. Jaboticabal: UNESP. PDF. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/42cc7de4-2bee-4786-bad7-f4467ad18a2c/content>. Acesso em: 03 ago. 2025.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não é apenas um requisito acadêmico, mas também o reflexo de muitas mãos, palavras e gestos que nos trouxeram até aqui. De pessoas que, junto a nós, sonharam ao nosso lado e nos incentivaram a continuar e dar esse último passo, rumo à vida adulta. Que fique aqui, nosso amor e admiração por aqueles que nos criaram, com tanto orgulho e paixão. Aos nossos portos seguros, nossas referências. Obrigado pelo amor, pelo apoio que até mesmo no silêncio, nunca deixaram faltar. Dedicamos e agradecemos esse artigo científico, inteiramente a vocês, combustíveis dos nossos sonhos.

Guardamos no coração toda a trajetória que aqui tivemos, incentivados por aqueles que moldaram nossos conhecimentos, para que tivéssemos a oportunidade de ser e estar, onde sempre desejamos. Levamos conosco o carinho e o respeito por todos os profissionais que trilharam conosco, esses 3 anos de nossas vidas. Obrigada por acreditarem amplamente em nossos potenciais, por verem portas abertas antes mesmo de nós. Ao nosso querido André, por pegar em nossas mãos e nos guiar, com sabedoria, compaixão e transmitindo a segurança que nos faltava no início deste projeto.

Que a ETEC. Professor Francisco, continue encantado, acolhendo e trilhando caminhos de todos que aqui passarem. É com profundo carinho, que encerramos nosso TCC, agradecendo a todos que fizeram parte disso, nos assegurando de que sempre seremos capazes de tudo aquilo que sonhamos, batalhando juntos e correndo atrás para desfrutar dos frutos que virão.