



MICHEL MARTINS ARAÚJO SILVA

**PROJETO DE LINHAS PARA PULVERIZADOR: UMA
ANÁLISE COMPARATIVA DE CENÁRIOS PLANEJADO E
EXECUTADO**

LAVRAS-MG

2023

MICHEL MARTINS ARAÚJO SILVA

**PROJETO DE LINHAS PARA PULVERIZADOR: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE
CENÁRIOS PLANEJADO E EXECUTADOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Adão Felipe dos Santos

Orientador

Jéssica Elaine Silva

Coorientadora

LAVRAS-MG

2023


MICHEL MARTINS ARAÚJO SILVA

**PROJETO DE LINHAS PARA PULVERIZADOR: UMA ANÁLISE COMPARATIVA
DE CENÁRIOS PLANEJADO E EXECUTADO**

**LINES PROJECTED FOR SPRAYER: A COMPARATIVE ANALYSIS OF PLANNED
AND EXECUTES SCENARIOS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 18 de julho de 2023.
Dr. Adão Felipe dos Santos – UFLA
Jéssica Elaine Silva – UFLA
Marcelo Araújo Junqueira Ferraz – UFLA
Thiago Orlando Costa Barboza – UFLA

 Documento assinado digitalmente
ADAO FELIPE DOS SANTOS
Data: 20/07/2023 15:03:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adão Felipe dos Santos
Orientador

LAVRAS-MG

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Michel Martins Araújo.

Projeto de linhas para pulverizador: uma análise comparativa
de cenários planejado e executado / Michel Martins Araújo Silva. -
2023.

43 p. : il.

Orientador(a): Adão Felipe dos Santos.

Coorientador(a): Jéssica Elaine Silva.

TCC (graduação) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Agricultura de Precisão. 2. Piloto Automático. 3. AgroCAD.
I. Santos, Adão Felipe dos. II. Silva, Jéssica Elaine. III. Título.

*Primeiramente a Deus.
À minha família, em especial aos meus pais Flávia e Celso.
À minha namorada Maria Clara.
Que me deram forças para enfrentar os desafios.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Com profunda gratidão, expresso meus mais sinceros agradecimentos àqueles que fizeram uma diferença marcante em minha jornada acadêmica e profissional.

Primeiramente, sou imensamente grato aos meus pais por terem me proporcionado as condições necessárias para concluir minha graduação. Eles sempre acreditaram em meu potencial e me incentivaram a perseguir meus sonhos incansavelmente.

Ao Grupo de Estudos em Máquinas e Mecanização Agrícola (GEMMA), devo uma enorme parcela de meu crescimento pessoal e profissional desde o início de minha jornada universitária. Cada membro desse grupo contribuiu imensamente, moldando minha visão e ampliando meus horizontes.

Não posso deixar de mencionar o Grupo de Extensão e Pesquisa em Agricultura Digital (GEPAD), cuja influência significativa se fez presente em grande parte dos trabalhos que desenvolvi ao longo da graduação. Agradeço de todo o coração pela oportunidade de fazer parte desse grupo excepcional e pelo privilégio de compartilhar meu tempo de forma excepcional com profissionais exemplares.

Ao professor Adão Felipe dos Santos, sou imensamente grato por sua orientação dedicada neste trabalho. Além disso, agradeço pelas inúmeras oportunidades que me foram proporcionadas ao longo de minha carreira e, acima de tudo, por sua amizade e por ser um professor próximo de seus alunos.

Ao Núcleo de Estudos em Sistemas Agrícolas (NESA), expresso minha gratidão pelas amizades sinceras que cultivei e pela possibilidade de realizar experimentos em campo, compartilhando momentos enriquecedores de conhecimento com membros não apenas da graduação, mas também do programa de Mestrado e Doutorado da UFLA.

Ao Professor Gabriel Araújo e Silva Ferraz, meu profundo reconhecimento por sua orientação e pela oportunidade de trabalhar no Programa Institucional de Bolsas de Pesquisa (PIBIC/UFLA) e também no NESA.

A todos os colegas que cruzaram meu caminho durante a graduação, compartilhando desafios e momentos felizes, meus sinceros agradecimentos. Vocês foram imprescindíveis para transformar essa jornada em algo verdadeiramente inesquecível.

Não posso deixar de mencionar a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“A maior recompensa para o trabalho do homem não é o que ele ganha com isso, mas o que ele se torna com isso.” (John Ruskin)

RESUMO

Com a mecanização agrícola muitas operações tiveram uma grande evolução, possibilitando o aumento na produção de alimentos e facilitando o trabalho, além de torna-lo mais eficiente. Arelado a isso, houve um aumento significativo no uso de tecnologias embarcadas e sensores. No entanto, a tecnologia não se restringiu apenas às operações, vários processos prévios e posteriores passaram a ser feitos com a ajuda de softwares e metodologias que garantem operações cada vez mais eficientes e seguras. Ferramentas da agricultura de precisão, GNSS, softwares de sistematização de área e sistemas de autodirecionamento via satélite (piloto automático) são amplamente usados hoje em dia, sendo precursores de avanços no campo. Dessa forma, objetivou-se realizar a sistematização das áreas de pulverização visando melhorar a execução no campo, afim de minimizar os erros de percurso e garantir que a acurácia do sinal seja atendido e fique dentro do limite adequado. A partir do software de Desenho Assistido por Computador (Civil 3D – Autodesk) com auxílio do plug-in AgroCAD (Tecgraf), foi realizado um projeto de linhas para um pulverizador M4025 (John Deere), licenciado com sinal SF3 (John Deere), com uma passada de bordadura, linhas internas retas e manobra automática. O experimento foi conduzido em uma lavoura de trigo, localizada em Campo Belo, estado de Minas Gerais, Brasil. Após a operação, os dados do trabalho de campo foram extraídos no monitor do pulverizador e em seguida transformados em arquivo *shapefile*. O processamento dos dados foi realizado com o AgroCAD, possibilitando assim comparações entre as trajetórias planejadas e executadas, buscando acompanhar a eficiência de execução do projeto de linha, a aderência durante a execução e o paralelismo. Concomitantemente, foi analisada a operação realizada com definição das linhas de orientação em campo pelo operador, em comparação com um cenário otimizado planejado previamente no Civil3D. As operações realizadas em linhas retas apresentaram melhores resultados do que as linhas da bordadura que apresentava trechos mais sinuosos. Nas linhas retas houve uma eficiência de execução do projeto de linha de 88,31% e aderência aceitável do percurso de 40,83%. Já nas curvas da bordadura houve uma eficiência de 55,33% e aderência aceitável de apenas 14,97%. O espaçamento médio das passadas na análise de paralelismo foi de 27,56 m, com apenas 20,56% do percurso dentro do espaçamento ideal. Para a análise de cenários houve bom resultado para o planejamento feito previamente, reduzindo o número de manobras em 16,7% e o comprimento das linhas em 1,2%. Por fim, o uso de piloto automático tem melhores resultados em linhas retas, do que em curvas, o sinal utilizado para operação se apresentou com erro maior do que o estabelecido pela fabricante e o planejamento prévio da operação apresentou bons resultados, sendo viável antes de iniciar uma operação de pulverização.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Piloto Automático. Projeto de linha. AgroCAD.

ABSTRACT

With agricultural mechanization, many operations underwent significant evolution, enabling an increase in food production and simplifying work, making it more efficient. Alongside this, there has been a significant rise in the use of embedded technologies and sensors. However, technology has not been limited to operations alone; several pre- and post-processes are now being performed with the aid of software and methodologies that ensure increasingly efficient and safe operations. Precision agriculture tools, GNSS, area systematization software, and satellite-based auto-guidance systems (autopilots) are widely used nowadays, leading the way to advancements in the field. Using Computer-Aided Design software (Civil 3D - Autodesk) with the assistance of the AgroCAD plugin (Tecgraf), a line project was carried out for a M4025 sprayer (John Deere), licensed with SF3 signal (John Deere), including a boundary pass, straight internal lines, and automatic maneuvering. The experiment was conducted in a wheat crop at Fazenda Dias, located in Campo Belo, Minas Gerais, Brazil. After the operation, fieldwork data was extracted from the sprayer's monitor and subsequently transformed into a shapefile. Data processing was performed using AgroCAD, enabling comparisons between the planned and executed trajectories to assess the efficiency of the line project execution, adherence during execution, and parallelism. Simultaneously, the operation performed with field-guided orientation lines by the operator was analyzed, compared to a previously optimized scenario planned in Civil3D. Therefore, it is expected that the systematization of spray areas will be a tool that improves field operations and their overall execution. Furthermore, it is expected that the manufacturer's guaranteed path errors are within the appropriate limit. Operations carried out in straight lines yielded better results than the boundary lines, which had more sinuous stretches. In straight lines, there was an 88.31% efficiency in line project execution and an acceptable path adherence of 40.83%. However, in the boundary curves, there was an efficiency of 55.33% and an acceptable path adherence of only 14.97%. The average spacing of passes in the parallelism analysis was 27.56 m, with only 20.56% of the path within the ideal spacing. For the scenario analysis, there were good results for the previously planned route, reducing the number of maneuvers by 16.7% and the length of the lines by 1.2%. In conclusion, the use of autopilot systems yields better results in straight lines compared to curves. The signal used for the operation presented a larger error than established by the manufacturer. Pre-planning of the operation showed good results, making it viable before starting a spraying operation.

Keywords: Precision Agriculture. Autopilot. Project line. AgroCAD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.	20
Figura 2 – Área de estudo semeada com trigo.....	21
Figura 3 - RPA DJI Phantom 4 Advanced.	22
Figura 4 - Pulverizador M4025 da John Deere.....	22
Figura 5 - Plataforma <i>Operations Center</i>	23
Figura 6 - Trator 6100J John Deere com receptor GNSS utilizado no estudo.	23
Figura 7 – Ortomosaico da área de estudo com foco nos rastros de operações anteriores.....	24
Figura 8 – Projeto de linha com manobra automática criado no AgroCAD pelo software Civil 3D.....	25
Figura 9 – Parâmetros para análise de aderência de Execução definidos no plug-in AgroCAD do software Civil 3D.	28
Figura 10 – Parâmetros para análise vetorial de paralelismo definidos no plug-in AgroCAD do software Civil 3D.	29
Figura 11 – Comparação de cenários otimizado e executado criados no AgroCAD pelo software Civil 3D.	30
Figura 12 – Eficiência de execução em curva.	31
Figura 13 – Aderência de execução em curva.	32
Figura 14 – Diferença entre trajetória realizada pelo receptor e a realizada pelo ponto de operação deslocado.	34
Figura 15 – Eficiência de execução em linhas retas.....	35
Figura 16 – Aderência de execução em reta.....	36
Figura 17 – Paralelismo em linhas retas.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aderência de execução em curva.....	32
Tabela 2 – Aderência de execução em reta.....	35
Tabela 3 – Paralelismo de execução em retas.....	37
Tabela 4 – Parâmetros de cenários.	39

LISTA DE SIGLAS

RPA	Aeronave Remotamente Pilotada
AP	Agricultura de Precisão
ASAE	American Society of Agricultural Engineers
CAD	Computer Aided Design
DGPS	Differential Global Position System
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
GSD	Ground Sample Distance
ha	Hectometro quadrado
h	Horas
iOS	iPhone Operating System
l	Litros
PPP	Precise Point Positioning
km	Quilomêtro
kPa	Quilopascal
RTK	Real Time Kinematic
RGB	Red, Green, Blue
.shp	Shape File
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
.tif	Tagged Image File Format
UTM	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Máquinas e mecanização agrícola	15
2.2	Agricultura de Precisão	16
2.3	<i>Global Navigation Satellite System</i> (GNSS)	17
2.4	Piloto Automático	18
2.5	Sistematização de área	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1	Local do experimento	20
3.2	Projeto de linha	21
3.2.1	Limite da área de estudo	22
3.2.2	Imagens Aéreas	23
3.2.3	Linhas de Orientação	24
3.2.4	Pulverização	25
3.2.5	Análises da operação agrícola	26
3.2.6	Eficiência de Execução	26
3.2.7	Aderência Vetorialmente	27
3.2.8	Paralelismo Vetorialmente	28
3.2.9	Comparação de cenários (executado x otimizado)	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Eficiência de Execução e Aderência Vetorial	31
4.1.1	Curvas Adaptáveis	31
4.1.2	Linhas Retas	34
4.2	Paralelismo Vetorialmente	37
4.3	Cenários (executado x otimizado)	38
5	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a mecanização agrícola tem apresentado tendências que impulsionam o desenvolvimento do setor, sendo aplicada em todas as etapas do processo agrícola. Um exemplo notável é a mecanização das operações de semeadura, colheita e pulverização, que até alguns anos atrás eram predominantemente realizadas de forma semimecanizada. Essa transição ocorreu devido à necessidade de aumentar a produtividade por área cultivada, à escassez de mão de obra e às restrições legais.

Com a adoção de máquinas autopropelidas, especialmente na área de pulverização, houve um aumento considerável no grau de mecanização. Nesse contexto, a adoção de boas práticas de pulverização desempenha um papel fundamental para obter resultados positivos nas culturas. Isso inclui a melhoria da eficiência operacional, um melhor controle de plantas daninhas, pragas e doenças, aplicação mais uniforme, maior conforto para o operador e redução dos riscos ambientais, entre outros benefícios essenciais para o sucesso da lavoura, desde o plantio até a colheita.

Nesse sentido, a análise prévia de diferentes cenários de pulverização antes da execução do projeto torna-se uma aliada das boas práticas, pois assim como em qualquer outra atividade, o setor agrícola também requer um equilíbrio entre receitas e despesas para garantir a lucratividade dos negócios. A agricultura de precisão enquadra nessa situação, pois adota estratégias de gestão agrícola que levam em consideração a variabilidade espacial e temporal no campo. Esse conceito refere-se à otimização do desempenho de cada unidade produtiva, considerando as variações presentes em diferentes áreas da propriedade.

A agricultura de precisão desempenha um papel importante no sistema agrícola mecanizado, abrangendo equipamentos, máquinas e ferramentas responsáveis pelas atividades agrícolas. Essa abordagem depende de informações precisas e a tomada de decisão desempenha um papel fundamental. Por meio do uso de tecnologias avançadas, como sensoriamento remoto, análise de dados e monitoramento em tempo real. Dessa forma, a agricultura de precisão permite tomar decisões mais assertivas e eficientes. Essa abordagem busca maximizar o uso de recursos, como água, fertilizantes e produtos fitossanitários, ao mesmo tempo em que minimiza os impactos ambientais.

A mecanização agrícola tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias no campo, e uma delas é o uso dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) em conjunto com sistemas de orientação automática. Essa integração proporciona um maior controle nas operações mecanizadas, garantindo precisão, paralelismo e repetibilidade durante

atividades como semeadura, plantio, pulverização e colheita. Os sistemas GNSS permitem o posicionamento preciso e em tempo real dos equipamentos agrícolas, enquanto os sistemas de orientação automática (piloto automático) proporcionam a automação desses equipamentos ao longo de trajetórias de trabalho pré-definidas. O resultado é uma maior eficiência, redução de desperdícios de insumos e maior qualidade na execução das tarefas agrícolas.

A adoção recente de sistemas de piloto automático pode ser atribuída a diversos fatores, um deles é a redução do estresse do operador, o que aumenta a capacidade de trabalho no campo. Além disso, a utilização desses sistemas possibilita um aumento no número de horas trabalhadas, uma vez que é viável realizar operações até durante a noite, devido à facilidade de operação fornecida pelo controle automatizado.

Atualmente, existem softwares específicos utilizados como ferramentas de apoio nesse setor. Dentre as diversas técnicas computacionais empregadas nesses softwares, o processamento digital de imagens se destaca pelos bons resultados obtidos.

Na agricultura, assim como em outras áreas, os softwares desempenham um papel importante ao fornecer ferramentas essenciais para facilitar análises e alcançar resultados desejados. No entanto, observa-se uma quantidade limitada de estudos que utilizam softwares específicos voltados para a agricultura, quando comparado a outras áreas, apesar de sua importância.

Nesse contexto, objetivou-se avaliar a qualidade da operação em trajetórias curvas e retilíneas de um pulverizador autopropelido operando com projeto de linhas bem como os benefícios de se realizar um planejamento antes da operação. Assim, comparando projeto de linhas planejado e executado com intuito de otimizar a operação de pulverização, com a utilização de softwares de sistematização de área. Além disso, também foi de interesse avaliar a qualidade do sinal SF3 utilizado neste experimento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Máquinas e mecanização agrícola

A mecanização agrícola trouxe grandes avanços para a agricultura, possibilitando o aumento da capacidade de trabalho, eficiência nas operações e rentabilidade na produção. Com o uso de máquinas no campo, as necessidades agrícolas de se produzir em maior quantidade com menos recursos, têm influenciado a evolução dos equipamentos, resultando em uma melhor adequação das máquinas para pequenas e grandes áreas, condições climáticas diversas e terrenos com diferentes níveis de dificuldades de locomoção (NOGUEIRA, 2001)

Com a digitalização da agricultura, cada vez mais máquinas e implementos estão sendo equipados com sensores e eletrônica embarcada. Além disso, a utilização de dados georreferenciados provenientes de monitores de produtividade está sendo estendida para outras operações além da função de determinar parâmetros de desempenho, como semeadura ou aplicação de defensivos. Para isso, é necessário contar com um coletor de dados conectado a um receptor de Sistema Global de Posicionamento (GPS), capaz de armazenar a posição geográfica e o horário correspondente (MOLIN et al., 2006).

Entretanto, a mecanização agrícola apresenta alguns desafios que requerem atenção, devido à dificuldade em escolher corretamente as máquinas e os conjuntos motomecanizados, levando em consideração as condições do ambiente de produção e as características específicas de cada cultura (EMBRAPA, 2005). Ainda, a mecanização exige mão de obra especializada, desde operadores capazes de utilizar todas as funcionalidades da máquina, até mecânicos qualificados para realizarem manutenção, garantindo eficiência e segurança nas operações (REIS et al., 2005).

No que se refere à pulverização agrícola, os pulverizadores autopropelidos têm ganhado destaque nas operações de aplicação de produtos fitossanitários, tornando-se uma opção viável para grandes áreas de cultivo. A utilização de pulverizadores autopropelidos pode garantir uma aplicação mais uniforme e precisa, uma vez que são equipados com diversas tecnologias avançadas (FARIAS et al., 2015).

Várias vantagens têm sido atribuídas aos pulverizadores autopropelidos, sendo uma delas a maior velocidade de deslocamento desses equipamentos em comparação com os pulverizadores montados e de arrasto, o que garante maior capacidade de cobertura em menor tempo (CAVALIERI et al., 2015). Outra vantagem está na mobilidade dos pulverizadores autopropelidos, que permitem acesso a áreas de difícil alcance. Ademais, esses equipamentos

também possibilitam um maior controle dos parâmetros relacionados à pulverização, como pressão, taxa de aplicação, tamanho de gota e formato de deposição (CUNHA et al., 2007).

Em contrapartida às vantagens citadas, a operação de pulverização enfrenta algumas dificuldades. Uma delas, diz respeito à calibração inadequada dos equipamentos, que envolve a seleção da ponta, ajuste de pressão e garantia de uniformidade de aplicação (ZELIK, 2018). Ainda existem fatores externos que influenciam, como condições climáticas, relevo, formato das passadas nos talhões e acúmulo de erros nas calibrações (SANTOS; AMOROSO, 2018).

2.2 Agricultura de Precisão

No contexto do cultivo agrícola, há muitas inovações em curso para aumentar a eficiência e reduzir os impactos das atividades agrícolas, impulsionadas pela demanda mundial por alimentos. Nesse contexto, a agricultura de precisão desempenha um papel promissor para atender essa demanda, principalmente pelo fato de mapear a variabilidade espacial e temporal das áreas. Essa tecnologia em constante desenvolvimento modifica as técnicas existentes e incorpora novas ferramentas especializadas no manejo agrícola. Com a integração da computação, eletrônica e alto controle, a agricultura de precisão vai além da simples aplicação de tratamentos variáveis, permitindo o monitoramento e acesso precisos da atividade agrícola em nível local (MANTOVANI et al., 1998).

Diante disso, ao considerar a agricultura de precisão (AP) como um ciclo que se inicia com a obtenção de dados, que fornecem a base para um estudo aprofundado por meio de seu processamento. Com base em critérios desejáveis, esses dados são tratados, permitindo uma análise crítica dos resultados obtidos após o processamento. Essa análise possibilita tomadas de decisões mais assertivas sobre as atividades agrícolas incluídas no manejo da AP. Por fim, a decisão final é aplicada adequadamente na operação agrícola, buscando-se a melhor eficiência e o menor impacto ambiental, levando em consideração a variabilidade espacial e temporal da lavoura (INAMASU et al., 2014). Dessa forma, ao finalizar um ciclo, outro se inicia com o objetivo de solucionar as dificuldades encontradas no ciclo anterior, focando na melhoria contínua. Portanto a obtenção de dados, processamento, tomada de decisão e a aplicação das melhorias se tornam uma ferramenta fundamental para garantir o tratamento ideal da lavoura, safra após safra (MOLIN et al., 2015).

No que diz respeito à obtenção de dados no ciclo da agricultura de precisão, as Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs), também conhecidas como drones, são plataformas que apresentam diversas vantagens na obtenção de imagens da lavoura. Essas aeronaves podem ser equipadas com sensores ópticos e realizar o imageamento da lavoura a partir de uma

perspectiva aérea, garantindo uma boa resolução espacial e temporal (ROSA, 2021). Com o uso dessa tecnologia, é possível realizar várias análises, como avaliação de índices vegetativos das plantas, classificação dos objetos presentes nas imagens, medições físicas do objeto de estudo, entre outras. Todas essas informações podem ser analisadas de forma temporal, acompanhando o desenvolvimento da lavoura ao longo do tempo (DOS SANTOS et al., 2018).

2.3 Global Navigation Satellite System (GNSS)

A tecnologia conhecida como Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) é utilizada mundialmente em aplicações como navegação, posicionamento e temporização. Esse sistema é composto por uma constelação de satélites em órbita ao redor do planeta Terra, que emitem sinais de rádio que podem ser recebidos por receptores em terra. Esses receptores permitem determinar a localização geográfica e o tempo com precisão em qualquer lugar do planeta (LASCH, 2018).

Existem vários sistemas que compõem o GNSS, sendo o mais conhecido e utilizado o Sistema de Posicionamento Global (GPS). O GPS é uma constelação de 24 satélites operados pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, que realizam duas órbitas circulares ao redor da Terra a cada dia. Esse sistema é amplamente empregado em atividades de navegação veicular, mapeamento geográfico, monitoramento de frotas e operações agrícolas (BERNARDI; LANDIM, 2002).

Além do GPS, existem outros sistemas amplamente utilizados que, quando combinados, podem garantir uma excelente qualidade de sinal, independentemente da aplicação. Sendo eles, GLONASS (Sistema Global de Navegação por Satélite da Rússia), composto por 24 satélites, dos quais são necessários apenas 18 para cobrir o território Russo. O Galileo (da União Europeia), com declaração de fase operacional completa a partir de 2020, é composto por 30 satélites em órbita. E o BeiDou (da China) conta atualmente com 35 satélites, atuando desde de 2012 (LI et al., 2015). Todos esses sistemas fornecem precisão no posicionamento por satélite, constituindo uma rede a partir dos quatro sistemas com mais de 100 satélites disponíveis (VALERO et al., 2019).

No entanto, apesar dos avanços na tecnologia GNSS, também existem desafios a serem enfrentados, como a interferência no sinal, seja ela física ou não. Uma das principais formas de interferência é a eletromagnética, que afeta a qualidade do sinal durante sua transmissão (EMÍLIO, 2020). Além disso, a interferência pode ser física, onde o nível e o tipo de interferência podem afetar a precisão e a acurácia do sinal (JACINTHO et al., 2020).

São vastas as aplicações do GNSS, que abrangem diversos setores, sendo de grande importância na agricultura de precisão. Especificamente nesse contexto o GNSS desempenha um papel crucial no controle de diversas operações agrícolas, como plantio, pulverização, colheita, entre outras (MOLIN, 2014). Esse sistema pode estar presente em etapas como no mapeamento e levantamento topográfico, autodirecionamento de máquinas agrícolas, no controle mais preciso durante a aplicação de insumos e também no monitoramento da produtividade e de outros atributos. Para pulverizadores autopropelidos a principal função que utiliza o GNSS é no autodirecionamento, possibilitando melhor precisão entre as passadas, reduzindo assim sobreposições ou falhas durante a operação (MOLIN et al., 2015).

2.4 Piloto Automático

O piloto automático é uma tecnologia de autodirecionamento via satélite amplamente utilizada na agricultura para realizar operações com maior precisão e eficiência. Essa tecnologia faz uso do Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) para orientação no espaço e por meio de software e hardware específicos, controla o direcionamento físico das máquinas agrícolas (COEN et al., 2008).

O uso dessa tecnologia no controle de operações agrícolas apresenta inúmeras vantagens significativas. Como exemplo, o piloto automático permite que as máquinas sigam rotas pré-programadas, evitando sobreposição nas passadas e reduzindo o tempo de manobra, o que resulta em uma operação mais eficiente como um todo (BANDEIRA; DENADAI, 2021). Além de contribuir para a diminuição da fadiga do operador, uma vez que este não precisa se concentrar no direcionamento da máquina, permitindo que ele gerencie outras atividades, como o monitoramento da operação e a tomada de decisões estratégicas (OLIVEIRA, 2009).

No âmbito geral da AP, o piloto automático desempenha um papel fundamental como uma importante ferramenta que, em conjunto com outras tecnologias, agrega valor à agricultura. Uma dessas tecnologias é a aplicação de insumos em taxa variável, que possibilita o tratamento localizado do talhão, aplicando diferentes taxas de insumos de acordo com as necessidades específicas do ambiente (MARTIN et al., 2019). Dessa forma, otimiza-se a utilização de insumos, desempenhando um papel importante na preservação do meio ambiente, reduzindo os impactos ambientais das atividades agrícolas e diminuindo a contaminação do solo e dos recursos hídricos (BERNARDI; INAMASU, 2014). Na pulverização também podem ser aplicados produtos fitossanitários de forma variável, utilizando o piloto automático para garantir boa precisão e acurácia entre as passadas (CARBALLIDO et al., 2013).

2.5 Sistematização de área

O uso de softwares na agricultura tem se tornado cada vez mais comum devido ao aumento da automação e da tecnologia embarcada nas máquinas. Com isso há uma maior geração de dados a partir de sensores e outros sistemas, além das novas funcionalidades das máquinas, que exigem o auxílio de softwares para realizar o planejamento e outras etapas anteriores à operação propriamente dita (EMBRAPA, 2011).

Dentro desse contexto, podemos destacar o uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que são compostos principalmente por dados, hardware, métodos, pessoas e software. Com o uso desses sistemas, é possível processar dados de diversos tipos, com destaque para dados dos tipos vetor e raster. Além disso, os SIG possibilitam a integração entre pessoas e diferentes sistemas dentro do mesmo ambiente, facilitando a análise e a visualização de informações geográficas (ROSA, 2013).

Apesar do uso de softwares SIG serem boas ferramentas para a visualização dos dados, os softwares de Desenho Assistido por Computador (CAD) também desempenham um papel importante na agricultura, especialmente no planejamento e análise de áreas agrícolas. Tal planejamento se baseia na geração de projetos de linhas destinados ao uso em equipamentos de autodirecionamento via satélite, como por exemplo as máquinas agrícolas. Essa ferramenta permite garantir que as operações sejam realizadas nas melhores condições possíveis e de forma mais otimizada, trazendo diversas vantagens, como a redução da fadiga do operador, menor tempo de manobra, menor consumo de combustível e aumento da eficiência operacional em campo (NARDO, 2015).

Alguns softwares utilizados no planejamento, gerenciamento e análise das operações agrícolas ainda são de código aberto e podem ser facilmente utilizados. No entanto, é importante ressaltar que muitas vezes esses softwares ficam restritos a universidades e entidades de pesquisa, dificultando sua implementação aos produtores (LISBINSKI et al., 2020).

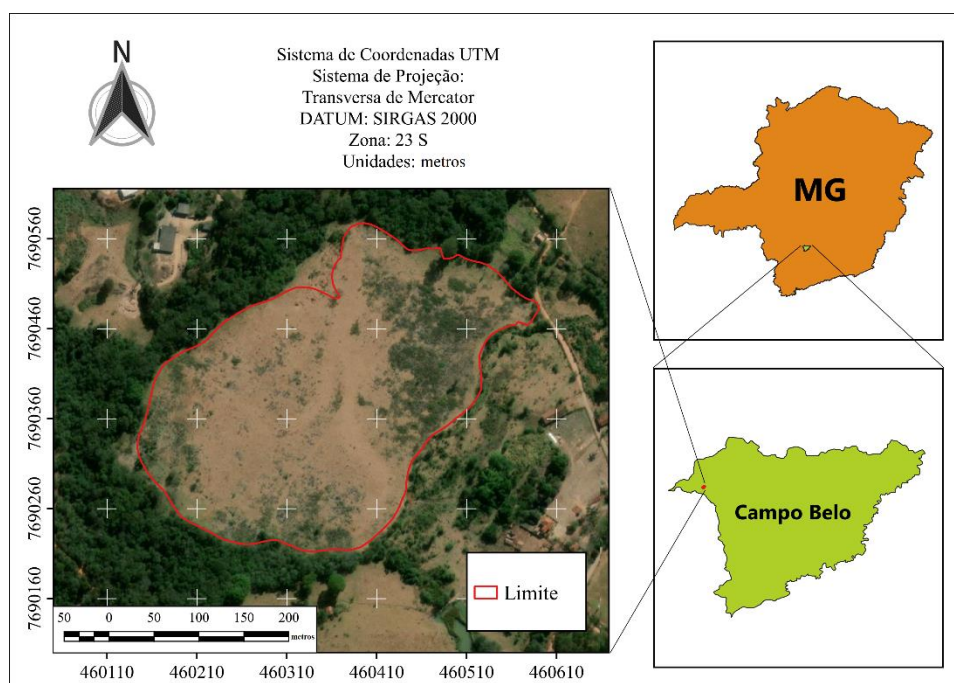
Um software que pode ser utilizado na sistematização de área é o AgroCAD, uma solução para agricultura de precisão que integra ferramentas de software CAD dentro de outro software, como modelo “plug-in”, como método para sistematizar áreas, realizar análises e obter o melhor aproveitamento dos insumos e recursos disponíveis para operação (Tecgraf Agro, 2023).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

A área de estudo, com extensão de 9,51 hectares, está localizada em Campo Belo, na mesorregião Oeste de Minas Gerais, Brasil. As coordenadas geográficas da área estão compreendidas entre os meridianos 459800 e 460800 metros a oeste e os paralelos 7690060 e 7690710 metros ao sul, na projeção Universal Transverse Mercator (UTM) 23 S e referência geodésica SIRGAS 2000 (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Do autor (2023).

Durante o período de execução do experimento, a área estava cultivada com trigo (Figura 2) encontrando-se entre as fases de alongamento e espigamento. O projeto incluiu análises entre as trajetórias planejadas e executas e foi realizado a partir de dados de trabalho de uma operação de pulverização necessária para preservar a sanidade da cultura.

Figura 2 – Área de estudo semeada com trigo.



Fonte: Do autor (2023).

3.2 Projeto de linha

O planejamento e criação das linhas de orientação para pulverização foram realizados no software Civil 3D (Autodesk, Califórnia, EUA, 2022), com o auxílio do plugin AgroCAD (Tecgraf Agro, Brasil, 2023). Uma análise exploratória da área e algumas conversões de formato de arquivo foram realizadas no QGIS (QGIS Development Team, Trondheim, Norway, 2023). Durante a execução do projeto, foram necessários outros softwares e equipamentos, como o PIX4D Mapper (Versão 4.5, Pix4d SA, Prilly, Suíça) e o PIX4D Capture (Versão 4.13.1, Pix4d SA, Prilly, Suíça) para planejamento do voo. Para a captura das imagens aéreas e estudo da área, foi utilizada uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) da marca DJI, modelo Phantom 4 Advanced (Figura 3).

Na pulverização com o projeto de linha, foi utilizado um pulverizador autopropelido modelo M4025 (Figura 4), com uma barra de 27,43 metros, equipado com piloto automático hidráulico (*AutoTrac*), composto por uma antena *StarFire* 6000 e um monitor Gen4 4600 *Command Center*, ambos da marca John Deere.

Figura 3 - RPA DJI Phantom 4 Advanced.



Fonte: DJI (2023).

Figura 4 - Pulverizador M4025 da John Deere.



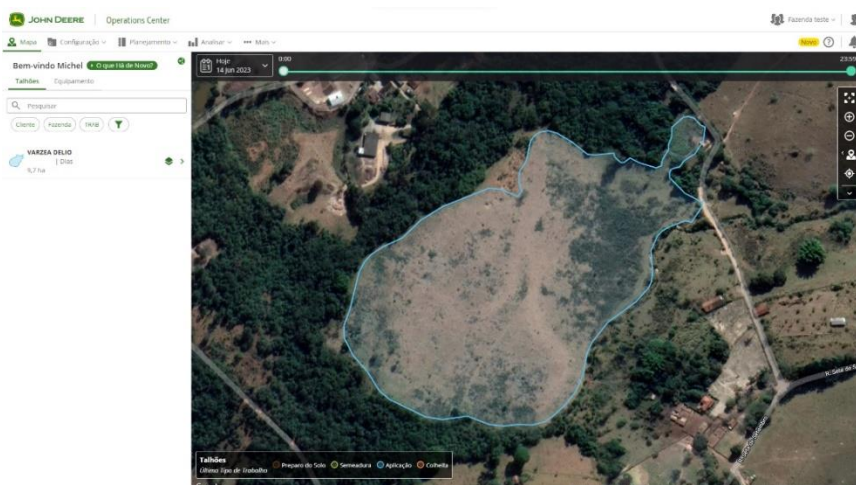
Fonte: Do autor (2023).

3.2.1 Limite da área de estudo

Para obter maior precisão na realização do projeto de linha, o limite da área foi gerado utilizando um trator com receptor GNSS percorrendo o contorno da área. Em seguida, os dados foram exportados para o *Operations Center* (John Deere, 2023), como mostrado na Figura 5. O *Operations Center* é um sistema de gerenciamento on-line da fazenda que disponibiliza informações sobre as máquinas conectadas em tempo real. Posteriormente, o arquivo foi baixado em formato *shapefile* e exportado para o QGIS. O trator utilizado foi um 6100J (Figura 6), equipado com uma antena receptora *StarFire 6000*, ambos da marca John Deere. O sinal utilizado foi o SF3, proporcionando uma correção de precisão passada a passada horizontal de 3 cm, com repetibilidade de 9 meses no ano. O sinal utilizado precisa de uma licença paga para

ser liberada no monitor e a repetibilidade diz respeito ao tempo em que o receptor garante uma passada sobre o mesmo ponto localizado na terra.

Figura 5 - Plataforma *Operations Center*.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 6 - Trator 6100J John Deere com receptor GNSS utilizado no estudo.



Fonte: Do autor (2023).

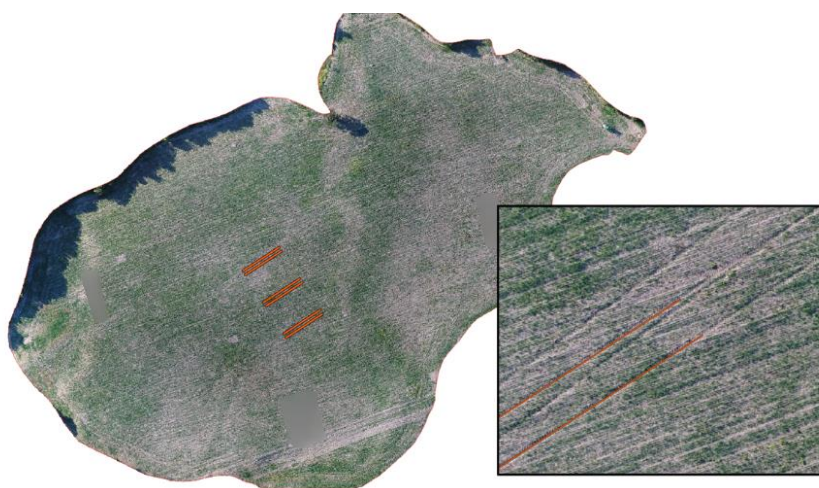
3.2.2 Imagens Aéreas

As imagens aéreas foram obtidas por meio de RPA modelo Phantom 4 Advanced (SZ DJI Technology Co., Shenzhen, China), equipada com uma câmera RGB (modelo FC330, DJI,

Shenzhen, China). O planejamento do voo foi realizado por meio do software PIX4D Capture, instalado em um dispositivo móvel com sistema operacional iOS (Apple Inc., California, Estados Unidos). O plano de voo foi configurado a altura de 110 metros, sobreposição frontal e lateral de 80%, garantindo uma distância de amostra do solo (GSD) de aproximadamente 2,9 cm/pixel, resolução suficiente para identificar de forma visual os rastros da operação já existentes na área. Posteriormente, foi gerado o ortomosaico da área em formato de arquivo “.tif”, utilizando o software PIX4D Mapper.

Para que o pulverizador pudesse realizar a operação seguindo o rastro das operações anteriores e evitando maiores danos, foi utilizado o software QGIS 3.16.10 para criar, a partir do ortomosaico, linhas de orientação de forma visual para que nas etapas seguintes em software CAD fosse possível criar o projeto de linhas utilizando como referências tais linhas (Figura 7).

Figura 7 – Ortomosaico da área de estudo com foco nos rastros de operações anteriores.



Fonte: Do autor (2023).

3.2.3 Linhas de Orientação

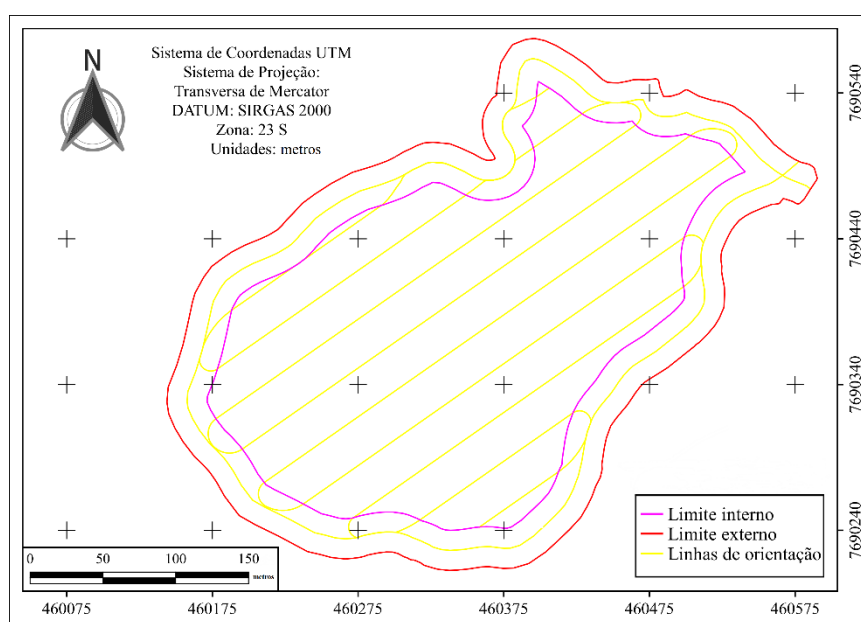
Para a elaboração do projeto de linha, que inclui as linhas de orientação utilizadas pelo piloto automático, foram utilizadas as linhas de referência mencionadas anteriormente, bem como o limite criado pelo trator. O desenvolvimento do projeto de linhas, incluindo a manobra automática de cabeceira (Figura 8), foi realizado por meio das ferramentas disponíveis no AgroCAD dentro do software Civil 3D.

A princípio, dentro do Civil 3D, o primeiro passo consistiu em importar o limite da área e as linhas de referência em um arquivo “.shp”, utilizando a ferramenta "Importar Arquivos SHP" disponível no menu "Importação/Exportação". Em seguida, no menu "Sistematização", utilizou-se a função "Criar Linhas", para gerar inicialmente a linha de cabeceira com uma única

passada, seguida das linhas internas, utilizando como referência o rastro já existente do pulverizador. Todas as linhas foram criadas com um espaçamento de 27,43 metros e um espaçamento mínimo entre os vértices de 2 metros. Para a manobra de cabeceira, foi utilizada a função "Criar manobra mínima" no menu "Sistematização", com o objetivo de criar uma manobra com o menor raio de giro possível.

Após a criação das linhas, uma etapa importante é a classificação do projeto, para garantir que os sistemas de autodirecionamento via satélite possam interpretar corretamente as linhas de orientação e os limites. Para isso, utilizou-se a ferramenta "Associar Cliente, Fazenda e Talhão aos Objetos", disponível no menu "Importação/Exportação". Em seguida, no mesmo menu, utilizou-se a ferramenta "Importar Cartão" da interface John Deere. Essa ferramenta permite exportar o projeto de linha para um cartão de memória com uma estrutura de pastas específica, de modo que o monitor da marca seja capaz de interpretar todos os objetos presentes no projeto.

Figura 8 – Projeto de linha com manobra automática criado no AgroCAD pelo software Civil 3D.



Fonte: Do autor (2023).

3.2.4 Pulverização

Com o projeto de linha salvo em um cartão de memória, foi transferido para o monitor do pulverizador os dados importados como um novo talhão a ser executado. Durante a operação, foram utilizadas as tecnologias *AutoTrac* e Corte de Seção Ativos. A taxa alvo de aplicação foi

de 100 l.ha⁻¹ e a velocidade média de aplicação foi de 10,1 km.h⁻¹. A pressão na barra do pulverizador ficou em média de 4567,7 kPa.

A operação de aplicação dos produtos fitossanitários foi realizada em grande parte de forma autônoma, com pouca intervenção do operador. Inicialmente, foi feita a pulverização da bordadura e, em seguida, direcionou-se para o limite interno do talhão. Durante as manobras, entre as passadas do pulverizador, o piloto automático esteve sempre acionado, eliminando a necessidade de desacoplar manualmente e direcionar o pulverizador.

Ao final da operação, os dados de trabalho foram exportados do monitor para um pendrive e, em seguida, carregados para o *Operations Center*. Posteriormente, o arquivo foi baixado no formato “.shp” para que pudesse ser aberto em outras plataformas.

3.2.5 Análises da operação agrícola

A partir dos dados exportados do trabalho realizado, foi possível criar a trajetória efetivamente percorrida pelo pulverizador em campo. Isso possibilitou a comparação entre a operação planejada (projeto de linha) e a operação executada (dados de trabalho). Para realizar essa análise, foram utilizadas as ferramentas de análise do AgroCAD, sendo elas, Eficiência de Execução, Aderência Vetorialmente e Paralelismo Vetorialmente. A seguir as ferramentas são mostradas em detalhe.

3.2.6 Eficiência de Execução

A primeira análise realizada é chamada de "Grade de Eficiência de Execução", localizada no menu "Análises". Sua função é avaliar a eficiência da execução da operação em relação ao planejado, fornecendo informações sobre a precisão da execução em metros e a eficiência da execução em porcentagem. Essa ferramenta, utiliza os dados para realizar uma análise matricial, comparando o que foi executado com o que foi planejado em cada pixel da área. Os dados foram compilados e calculou-se uma média geral para obter as informações de eficiência.

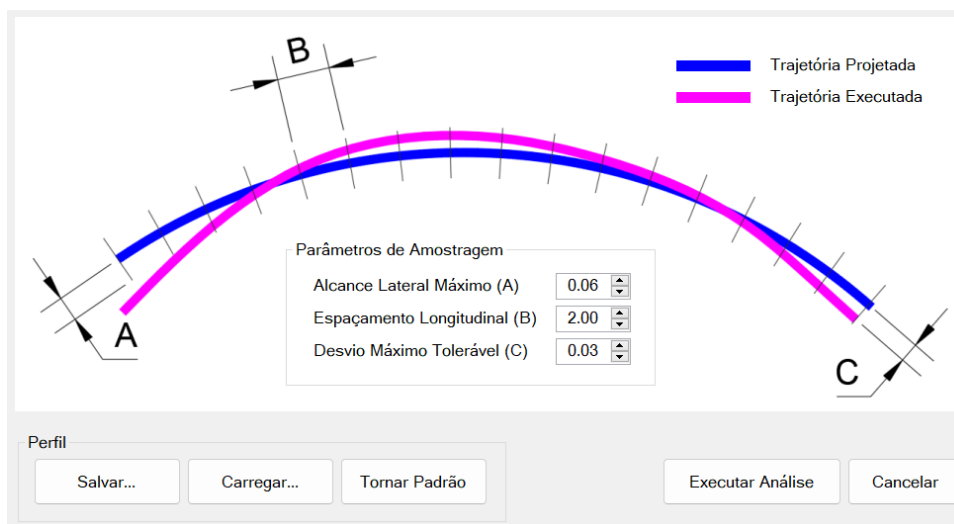
3.2.7 Aderência Vetorialmente

Bem como a ferramenta de eficiência de execução, a análise de aderência vetorial é uma análise da trajetória executada em comparação com a planejada. No entanto, a análise é realizada de forma vetorial em intervalos de amostragem pré-definidos.

A ferramenta "Analisar aderência vetorialmente" do menu "Analisar" é utilizada para verificar a fidelidade entre as linhas projetadas e executadas. A análise é feita vetorialmente, medindo-se a distância perpendicular entre a linha planejada e a linha executada em intervalos de distância pré-definidos. Com base em dois parâmetros definidos anteriormente, são geradas estatísticas sobre a aderência da trajetória, classificando-a como aceitável, inadequada ou fora de alcance.

Os parâmetros definidos para a análise (Figura 9) são os seguintes: alcance lateral máximo (A), que define o limite aceitável para a diferença entre as trajetórias; espaçamento longitudinal (B), que determina a distância entre cada amostra ao longo do percurso, estabelecendo uma amostra a cada 2 metros, conforme o "default" da ferramenta, e desvio máximo tolerável (C), que determina se a trajetória está dentro do planejado. O parâmetro C (desvio máximo tolerável) foi estabelecido com base na precisão do sinal fornecida pelo receptor GNSS, que é de 3 cm. Já o parâmetro A (alcance lateral máximo) foi definido como duas vezes a precisão de 3 cm, considerando que o erro pode variar ± 3 cm no sentido da trajetória.

Figura 9 – Parâmetros para análise de aderência de Execução definidos no plug-in AgroCAD do software Civil 3D.



Fonte: Do autor (2023).

3.2.8 Paralelismo Vetorialmente

A análise de paralelismo é utilizada para verificar a equidistância entre as passadas do pulverizador, sendo aplicável apenas às linhas retas no interior do talhão. A ferramenta "Analisar paralelismo vetorialmente", encontrada no menu "Análise", realiza essa verificação vetorial seguindo parâmetros pré-definidos (Figura 10).

Nessa análise, as amostras são classificadas como ideais, acima do ideal ou abaixo do ideal. O primeiro parâmetro é o espaçamento ideal interno, que varia de 27,37 a 27,49 metros. Essa variação ocorre devido ao erro acumulado entre duas passadas paralelas, considerando que o sinal garante uma precisão de 3 cm. Portanto, o espaçamento ideal pode variar em até ± 6 cm. O segundo parâmetro define espaçamentos muito maiores ou menores do que o ideal, os quais devem ser ignorados. Nesse caso, foi considerada uma variação de ± 1 metro em relação ao espaçamento ideal, sendo que acima disso o valor será ignorado para análise. O último parâmetro é o intervalo em metros no qual as amostras devem ser coletadas ao longo da trajetória, definido como 2 metros.

Figura 10 – Parâmetros para análise vetorial de paralelismo definidos no plug-in AgroCAD do software Civil 3D.

The image shows a dialog box titled "Opções" (Options) for the AgroCAD plugin. It is divided into three main sections:

- Opções:** Contains three buttons: "Salvar Como..." (Save As...), "Carregar..." (Load...), and "Tornar Padrão" (Reset).
- Espaçamento:** Contains three sub-sections for defining spacing parameters:
 - Ideal:** "De" (From) is 27.37 and "Até" (To) is 27.49.
 - Ignorar:** "Maior que" (Greater than) is 28.43 and "Menor que" (Less than) is 26.43.
 - Amostras:** "A cada" (Every) is 2.
- Buttons:** "OK" and "Cancel" buttons are located at the bottom center.

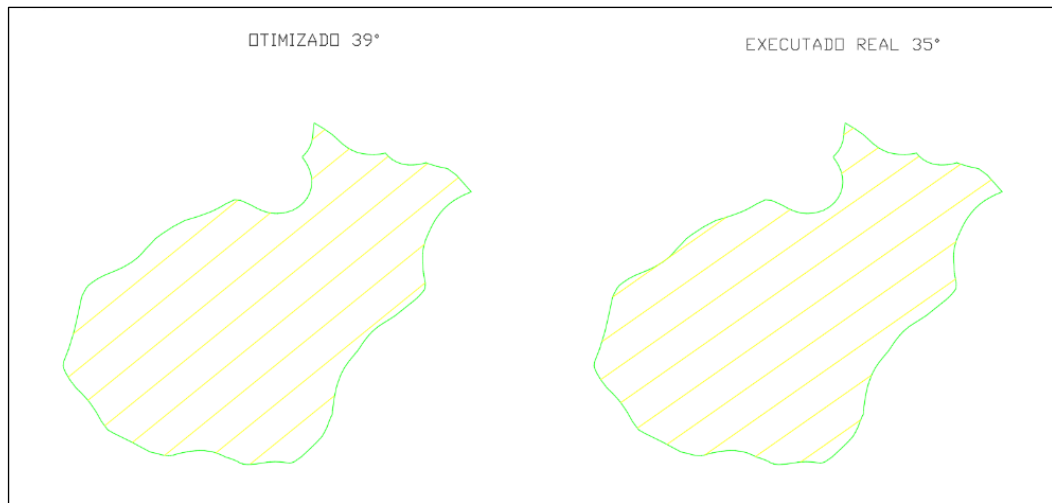
Fonte: Do autor (2023).

3.2.9 Comparação de cenários (executado x otimizado)

Por fim, uma última análise foi realizada para comparar o cenário realmente executado com o cenário mais otimizado possível (Figura 11). O objetivo dessa análise foi verificar, a partir das análises prévias, a possibilidade de encontrar uma trajetória melhor do que a executada. Vale ressaltar que a operação foi realizada sobre o rastro das operações anteriores, e a criação das linhas internas do talhão foi feita pelo operador em campo sem análise prévia para a decisão da melhor direção possível.

A análise comparativa foi realizada para identificar possíveis oportunidades de otimização na trajetória, levando em consideração fatores como distâncias percorridas, sobreposições indesejadas ou lacunas entre as passadas. Dessa forma, busca-se identificar se é possível melhorar a eficiência e a uniformidade da operação em futuras aplicações no mesmo talhão.

Figura 11 – Comparação de cenários otimizado e executado criados no AgroCAD pelo software Civil 3D.



Fonte: Do autor (2023).

A decisão sobre a melhor direção possível foi baseada na análise do comprimento total das linhas e do número de manobras. Levando em consideração esses fatores, foi selecionada a direção que resultasse em linhas mais curtas e um número menor de manobras.

Essa abordagem visa otimizar a operação, reduzindo o tempo e o consumo de combustível necessário para percorrer todas as linhas do talhão. Além disso, uma menor quantidade de manobras contribui para aumentar a eficiência e a produtividade do pulverizador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

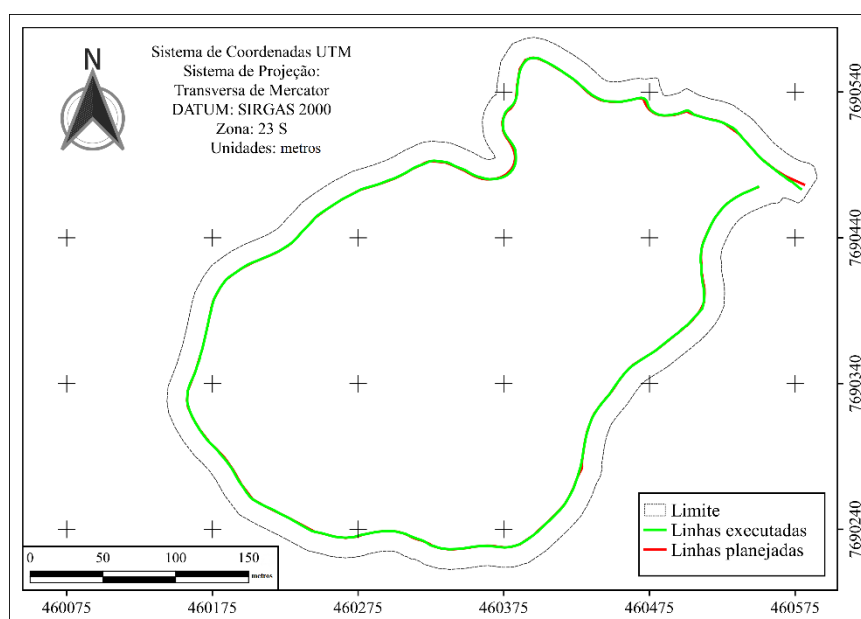
4.1 Eficiência de Execução e Aderência Vetorial

4.1.1 Curvas Adaptáveis

A análise de eficiência para o cenário de curvas direcionadas à bordadura do talhão, apresentou eficiência média de 55,33% na execução em relação ao planejado, com uma precisão de 2,5 cm. Embora a precisão esteja dentro do esperado, ocorreu baixa eficiência de execução e tendência a elevar à medida que aumenta o número de trajetórias não lineares durante o percurso.

Na Figura 12 é apresentado a sobreposição das linhas, na qual os locais mais críticos onde a linha executada não seguiu o planejado, foram nas curvas em que o raio de giro era reduzido.

Figura 12 – Eficiência de execução em curva.



Fonte: Do autor (2023).

Conforme evidenciado na análise anterior de aderência vetorial em pistas curvas, os resultados também não são muito satisfatórios (Tabela 1). Durante a execução da bordadura, apenas 14,97% da trajetória ficou dentro do limite aceitável definido a partir da precisão do receptor GNSS. A trajetória inadequada representou 38,18%, com uma aderência ao percurso entre 3 e 6 cm. Em 46,85% do percurso, a trajetória esteve fora de alcance, com uma aderência acima de 6 cm.

Esses resultados indicam que houve uma falta de precisão na execução das linhas curvas em relação ao planejado. A aderência fora do limite aceitável pode resultar em uma aplicação inadequada dos produtos fitossanitários e, conseqüentemente, pode comprometer a eficácia do tratamento. É importante investigar as possíveis causas desses desvios e realizar ajustes para melhorar a aderência nas curvas durante futuras operações.

Tabela 1 – Aderência de execução em curva.

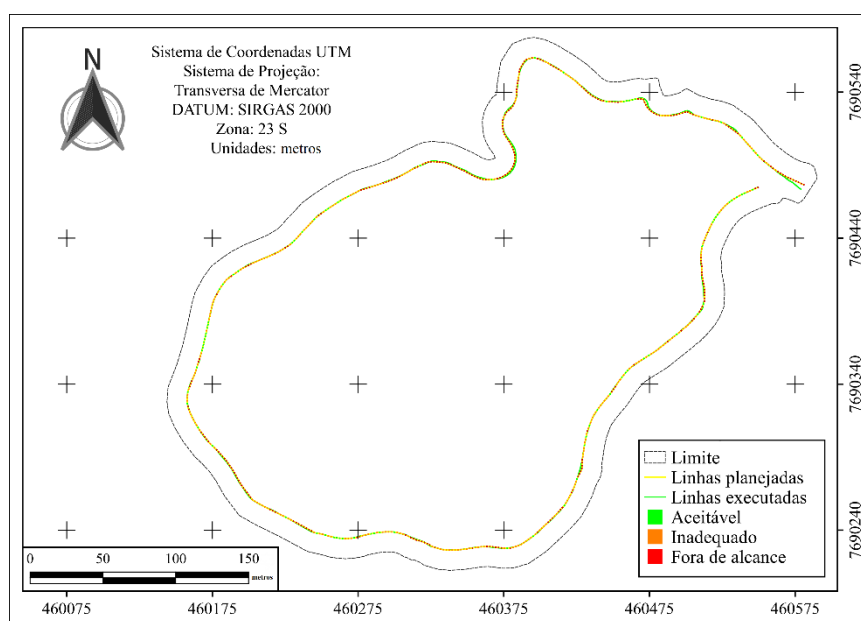
Cor	Aderência	Amostras	Medidas(m)	Desvio médio (m)	%
Verde	Aceitável	107	214,29	0,01	14,97
Laranja	Inadequada	273	546,74	0,08	38,18
Vermelho	Fora de alcance	335	670,91	N/A	46,85
TOTAIS		715	1431,94	-	100

N/A: não se aplica

Fonte: Do autor (2023).

De forma geral, a aderência da trajetória não foi satisfatória (Figura 13), porém os pontos mais críticos são observados novamente nas trajetórias com curvas mais acentuadas. Nessas áreas, a aderência ao percurso é perdida à medida que a trajetória se torna mais sinuosa.

Figura 13 – Aderência de execução em curva.



Fonte: Do autor (2023).

Considerando condições de trabalho semelhantes, máquinas guiadas por piloto automático podem encontrar maior dificuldade em seguir trajetórias curvas, independentemente do sinal captado pelo receptor GNSS acoplado (SANTOS et al., 2018).

Foram comparados os ganhos econômicos e o rendimento médio entre o uso de piloto automático em trajetórias curvas e o uso convencional de um trator guiado pelo operador, durante a operação de plantio e inversão de amendoim. Os resultados mostraram que o uso do piloto automático em trajetórias curvas superou a abordagem convencional. Além disso, no mesmo estudo, foram comparados cenários de alta, média e baixa curvatura, e não houve interferência significativa da curvatura no desempenho do piloto automático (VELLIDIS et al., 2014). No entanto, é importante ressaltar que esse experimento foi conduzido utilizando um piloto automático Trimble com correção RTK baseada em torre fixa de correção, o que proporcionava uma precisão de $\pm 2,5$ cm com repetibilidade de um ano.

Essas informações indicam que, embora máquinas guiadas por piloto automático possam enfrentar desafios adicionais ao seguir trajetórias curvas, quando adequadamente configuradas e com sistemas de correção de alta precisão, elas podem superar as abordagens convencionais em termos de eficiência e desempenho.

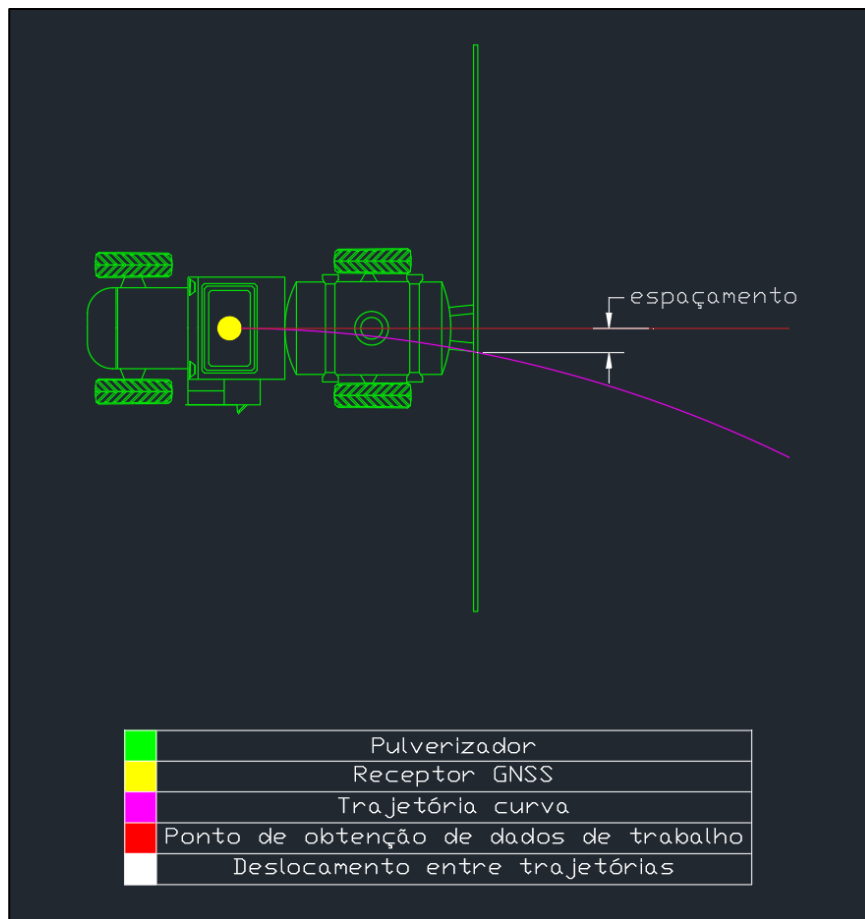
E ainda, foi observado que implementos acoplados ao sistema de levante hidráulico do trator (três pontos), sem o sistema *Trueguide*, não eram bem direcionados pelo piloto automático, devido à dificuldade de alinhar esses implementos com as linhas centrais mais curvas, pois quando o eixo longitudinal do trator mudava, o mesmo ocorria com o implemento, com isso o sistema estava sempre subcorrigindo ou supercorrigindo (VELLIDIS et al., 2014).

Em comparação com o pulverizador utilizado neste estudo, pode-se fazer uma analogia com um trator que possui implementos acoplados nos três pontos. Nesse caso, o ponto de trabalho, que corresponde à barra de pulverização, está deslocado em relação ao ponto de recebimento do sinal GNSS (antena). Esse deslocamento dificulta o direcionamento em curvas durante a operação e afeta a obtenção precisa dos dados de trabalho para análises futuras.

Outra dificuldade encontrada neste estudo está relacionada à criação da trajetória executada pelo pulverizador. A trajetória teve que ser construída com base nos pontos de trabalho da seção central da barra de bicos de pulverização. No entanto, devido ao deslocamento entre o ponto de trabalho e o ponto de recepção do sinal GNSS, a trajetória real fica deslocada em relação à trajetória planejada. O que difere dos estudos mencionados sobre outras marcas, como nos monitores Trimble utilizando sinal RTK, o monitor da marca John Deere não disponibiliza um arquivo específico com a trajetória executada pela máquina, o que exigiu a criação da trajetória com base nos dados de trabalho disponíveis.

Ao analisarmos a projeção das trajetórias (Figura 14), podemos observar um deslocamento do ponto de trabalho, localizado no centro da barra, em relação ao ponto de recepção do sinal GNSS, que está localizado sobre a cabine do pulverizador. Esse deslocamento se torna mais evidente à medida que o raio de giro diminui. Na figura 16, é simulada uma trajetória curva representada na cor magenta, enquanto o ponto real está localizado na barra de trabalho paralelo a direção de condução do pulverizador, na cor vermelha. Essa diferença de posição demonstra a necessidade de ajustes e considerações adicionais ao interpretar os dados e avaliar a precisão da trajetória executada.

Figura 14 – Diferença entre trajetória realizada pelo receptor e a realizada pelo ponto de operação deslocado.



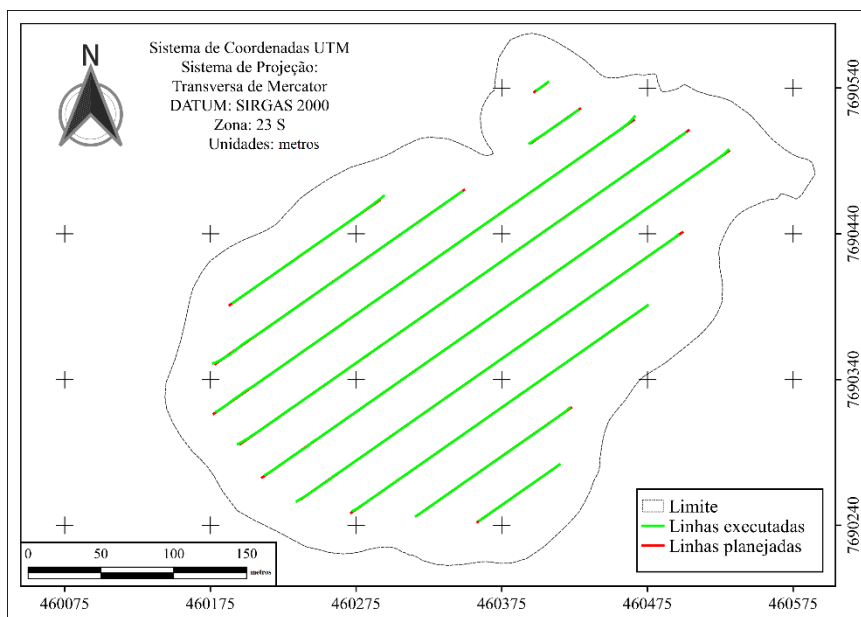
Fonte: Do autor (2023).

4.1.2 Linhas Retas

No que diz respeito às linhas retas do limite interno do talhão, podemos observar que a precisão se manteve em 2,5 cm, conforme o esperado. No entanto, nota-se um aumento na eficiência de execução, atingindo 88,31%. Isso indica uma maior confiabilidade em campo,

demonstrando que a operação está mais alinhada com o planejado e executada de forma mais precisa. Em um projeto de linhas retas, a segurança de que o projeto será melhor executado é maior. Isso pode ser observado ao longo do percurso, conforme ilustrado na Figura 15. É importante notar que os pontos que apresentaram maiores diferenças entre o executado e o planejado foram nas entradas e saídas das manobras.

Figura 15 – Eficiência de execução em linhas retas.



Fonte: Do autor (2023).

A aderência em linhas retas também apresentou melhores resultados (TABELA 2), na qual verificou-se que em 40,83% do percurso, a aderência foi considerada aceitável, em 50,3% foi considerada inadequada e em apenas 8,87% esteve fora do alcance desejado. No entanto, é importante ressaltar que a aderência dentro do limite aceitável ainda foi baixa. Os resultados obtidos podem ser influenciados por vários fatores, como a precisão do sinal durante a operação, o tempo de resposta do hardware e software para ajustar o direcionamento do pulverizador, bem como a interação entre o solo e os pneus do equipamento.

Tabela 2 – Aderência de execução em reta.

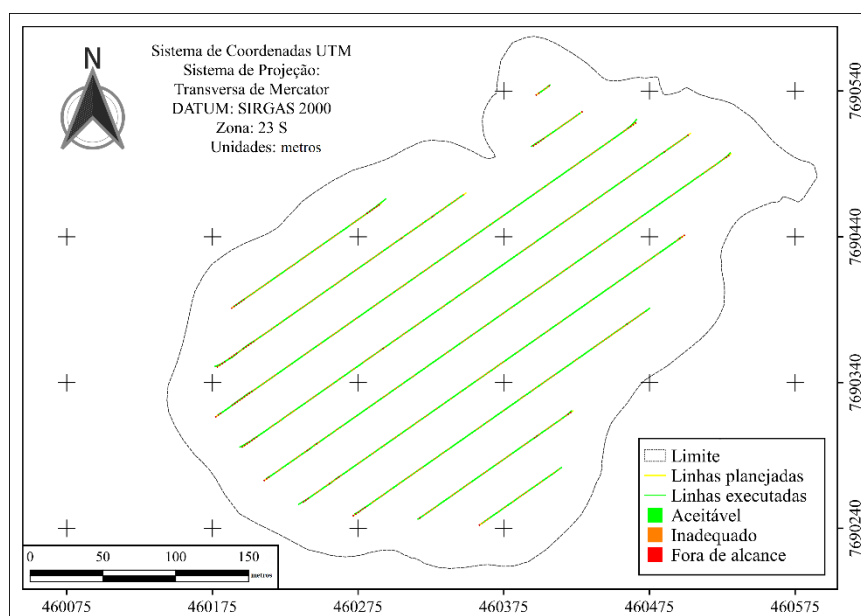
Cor	Aderência	Amostras	Medidas(m)	Desvio médio (m)	%
Verde	Aceitável	474	946,75	0,01	40,83
Laranja	Inadequada	584	1167,01	0,07	50,30
Vermelho	Fora de alcance	103	206,38	N/A	8,87

TOTAIS	1161	2320,14	-	100
---------------	------	---------	---	-----

Fonte: Do autor (2023).

No mapa apresentado pela Figura 16, é possível observar que à medida que nos aproximamos do centro das linhas retas, há uma redução nos pontos de aderência fora do alcance desejado e um aumento nos pontos de aderência considerados aceitáveis. Por outro lado, as piores situações, em que a trajetória executada difere significativamente da planejada, ocorrem nas extremidades das linhas e nas áreas de entrada e saída de manobras. Esses pontos são mais críticos em termos de aderência ao percurso desejado.

Figura 16 – Aderência de execução em reta.



Fonte: Do autor (2023).

De acordo com um estudo realizado, em sistemas de autodirecionamento com linhas de execução retas utilizando sinal de Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS), foi observado um erro médio de $\pm 7,78$ cm entre o executado e o planejado. Essa margem de erro está dentro da faixa considerada aceitável, que varia de 2,5 a 10 cm. É importante ressaltar que sinais de maior precisão geralmente têm um custo de aquisição mais elevado, porém, eles garantem uma melhor rentabilidade. Portanto, espera-se que um maior investimento em precisão resulte em uma maior rentabilidade do processo (AZMI et al., 2022).

A implementação de sistemas de orientação automática com precisão inferior a 2,5 cm pode trazer benefícios significativos para a produção de algodão. Além disso, uma análise econômica realizada em fazendas mostrou que sistemas com precisão inferior a 10 cm podem

ser economicamente viáveis para fazendas menores, enquanto para fazendas maiores, investir em precisão inferior a 2,5 cm pode ser mais lucrativo (BERGTOLD et al., 2009).

4.2 Paralelismo Vetorialmente

A análise de paralelismo entre as passadas executadas, conforme apresentado na Tabela 3, revelou resultados pouco satisfatórios. O espaçamento médio entre as passadas do interior do talhão foi de 27,56 m, o que significa que houve um espaçamento 13 cm maior do que o comprimento da barra. Essa diferença pode resultar em faixas sem a aplicação adequada do produto fitossanitário.

Quanto às amostras realizadas a cada 2 m, constatou-se que apenas 20,56% do percurso apresentou a distância entre as passadas dentro do intervalo ideal. Em 1,86% do percurso, a distância entre as passadas foi inferior a 27,37 m, enquanto em 77,58% do percurso essa distância foi superior a 27,49 m. Esses resultados indicam uma variação significativa no espaçamento entre as passadas ao longo do trajeto.

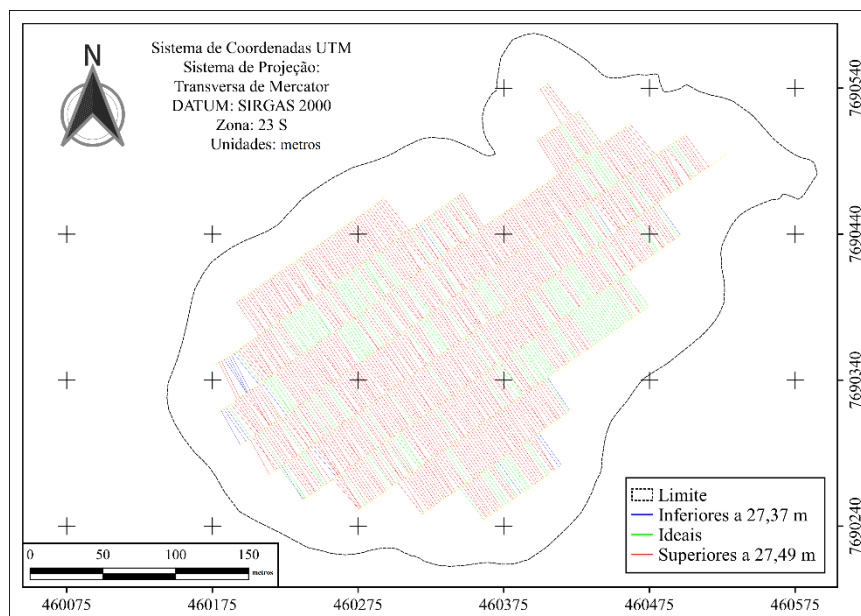
Tabela 3 – Paralelismo de execução em retas.

Cor	Medidas(m)	Amostras	%	Espaçamento médio
Azul	Inferiores a 27,37	18	1,86	
Verde	Ideais	199	20,56	27,56 m
Vermelho	Superiores a 27,49	751	77,58	

Fonte: Do autor (2023).

Ao observar o mapa (Figura 17), é possível notar que a maior parte do talhão apresenta distância entre as passadas superior ao ideal. As passadas com distância ideal estão principalmente localizadas no centro do talhão, enquanto as passadas com distância inferior ao ideal são observadas nas extremidades das linhas. Essa distribuição indica uma variação significativa no paralelismo, com áreas de maior desvio nas extremidades.

Figura 17 – Paralelismo em linhas retas.



Fonte: Do autor (2023).

Estudos apontam que em uma operação mecanizada de semeadura de amendoim com o uso do piloto automático Trimble e sinal Center Point RTX demonstraram resultados mais satisfatórios em relação ao paralelismo entre as passadas em linhas retas. O estudo relatou um erro máximo de paralelismo de 1,42 cm acima da precisão garantida pelo sinal, que é de 3,8 cm. Além disso, o erro médio foi de 1,36 cm, indicando resultados melhores do que os obtidos na operação de pulverização abordada neste trabalho (SANTOS et al., 2018). O sinal Real Time Kinematic (RTK) o qual apresenta precisão entre passadas de 2,5 cm, pode apresentar resultados superiores devido à utilização de uma base fixa para correção do sinal antes de ser interpretado pela máquina, o que contribui para reduzir as interferências.

Além disso, estudos que utilizaram sistemas de autodirecionamento com o sinal de correção RTK encontraram erro de paralelismo menor do que em outros sistemas, como Precise Point Position (PPP) (ZERBATO et al., 2019). Esses resultados reforçam a qualidade superior do sinal RTK em comparação com outros sinais discutidos

4.3 Cenários (executado x otimizado)

Com base na tabela de comparações (Tabela 4), é possível identificar que o cenário com linhas direcionadas no ângulo de 39° apresenta um menor número de manobras e um comprimento total percorrido menor. Esses resultados têm um impacto positivo no tempo de manobras, eficiência operacional e consumo de combustível. Portanto, a direção mais otimizada seria aquela com um ângulo de 39° , proporcionando uma vantagem em relação à operação

realmente executada, com duas manobras a menos para serem realizadas e 26,22 m percorridos a menos.

Tabela 4 – Parâmetros de cenários.

	Ângulo	Comprimento total	Manobras
Executado	35°	2262,69 m	12
Otimizado	39°	2236,47 m	10

Fonte: Do autor (2023).

No planejamento de linhas na operação de plantio de cana de açúcar, para áreas de 50 a 80 hectares, pode haver uma diminuição total no tempo de execução de 50 minutos entre um cenário otimizado e um não otimizado. Além disso, cenários otimizados podem ter uma redução de até 8% no consumo de combustível (NARDO, 2015).

A comparação entre o cenário otimizado em relação ao executado apresenta uma redução de 16,7% no número de manobras e 1,2% na distância percorrida. Com um menor número de manobras e uma distância percorrida menor, o tempo de execução diminuirá, resultando em economia.

De acordo com a Sociedade Americana de Agricultura e Engenharia (ASAE), a eficiência operacional na agricultura é relativamente baixa, variando de 60% a 65% para pulverizadores. Portanto, é importante adotar técnicas para otimização das operações. O projeto de linha planejado para a melhor orientação possível juntamente com manobras otimizadas, pode diminuir o tempo de operação. A otimização das curvas entre as passadas pode resultar em uma economia de tempo de até 50% (SPEKKEN; DE BRUIN, 2013).

5 CONCLUSÃO

A execução do projeto de linha para sistemas de autodirecionamento via satélite apresentou melhores resultados em linhas retas do que em curvas. Portanto, recomenda-se que a sistematização de linhas seja utilizada de modo a aumentar a oportunidade de o pulverizador locomover em linha retas, diminuindo assim erros em relação à direção curva, uma vez que na região onde o experimento foi realizado, os talhões têm dimensões menores e limites mais irregulares.

Na maior parte da trajetória a precisão do sinal não ficou dentro do limite garantido pelo fabricante, porém deve-se lembrar que nas análises foram acumulando erros da operação e dos pontos obtidos em campo para comparação.

A avaliação antecipada dos cenários de pulverização é uma ferramenta extremamente importante para auxiliar os agricultores, pois proporciona uma visão mais clara de como executar a operação de forma eficaz, resultando na redução de custos e no aumento do desempenho.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Eliseu Roberto de Andrade *et al.* **Benefícios da mecanização na agricultura.** Portal Embrapa. Embrapa Informação Tecnológica, 2005.
- ASAE EP496.3 (2009). **Agricultural machinery management.** In ASABE STANDARD 2009 (Ed.), ASABE, vol. I (pp. 354–357). St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- AZMI, Mohammad Anas *et al.* **A computer-based mapping approach for evaluating straight-line accuracy of autopilot tractor traversing the oil palm field terrain.** Smart Agricultural Technology, v. 2, p. 100033, 2022.
- BANDEIRA, Paloma Fogaça; DENADAI, Marcelo Scantamburlo. **Uso de agricultura de precisão (piloto automático e computador de bordo) como forma de melhoria na cultura da cana de açúcar.** X Jornacitec – Jornada Científica e Tecnológica. 2021.
- BASSOI, Luís Henrique *et al.* **Agricultura de precisão e agricultura digital.** TECCOGS: Revista Digital de Tecnologias Cognitivas, n. 20, 2019.
- BERGTOLD, J. S. *et al.* **The Economic Benefit of Improving the Proximity of Tillage and Planting Operations in Cotton Production with Automatic Steering.** Applied Engineering in Agriculture, v. 25, n. 2, p. 133–143, 2009.
- BERNARDI, Alberto C. de Campos; INAMASU, Ricardo Yassushi. **Adoção da agricultura de precisão no Brasil.** Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014.
- BERNARDI, José V. Elias; LANDIM, Paulo M. Barbosa. **Aplicação do sistema de posicionamento global (gps) na coleta de dados.** DGA, IGCE, UNESP/ Rio Claro, Lab. Geomática, Texto Didático 10, 31 pp. 2002.
- BERNÉ VALERO, José Luis *et al.* **GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en geomática.** Colección académica. Editorial UPV. Editorial Universitat Politècnica de València, 2014.
- CARBALLIDO, Jacob *et al.* **Field sprayer for inter and intra-row weed control: performance and labor savings.** Spanish Journal of Agricultural Research, v. 11, n. 3, p. 642–651, 2013.
- CAVALIERI, Jhonatan D. *et al.* **Sistemas de pulverização e velocidade de deslocamento no depósito e espectro de gotas em algodoeiro.** SBEA. Revista Engenharia Agrícola, v. 35, p. 1042–1052, 2015.
- COEN, Tom *et al.* **Autopilot for a combine harvester.** Computers and Electronics in Agriculture, Special issue on bio-robotics. v. 63, n. 1, p. 57–64, 2008.
- CUNHA, João P. A. R. da *et al.* **Avaliação do espectro de gotas de pontas de pulverização hidráulicas utilizando a técnica da difração do raio laser.** Engenharia Agrícola, v. 27, p. 10–15. Jaboticabal, 2007.
- EMÍLIO, Diogo F. de O. V. Duque. **Deteção de interferências com SDRs para receptores GNSS.** MasterThesis [s.l: s.n.], 2020
- FARIAS, Marcelo Silva de *et al.* **Critérios técnicos para a seleção de pulverizadores autopropelidos comercializados no mercado brasileiro.** Ciência Rural, v. 45, p. 939–942, 2015.

INAMASU, Ricardo Yassushi *et al.* **Agricultura de precisão: um novo olhar.** Portal Embrapa. Embrapa Instrumentação, 2011.

JACINTHO, João Luiz *et al.* **Receptores de sinais do sistema global de navegação por satélite submetidos a interferências físicas.** Energia na agricultura, v. 35, n. 1, p. 115–125, 2020.

LASCH, Rômulo. **Análise de viabilidade de plataforma para controle de seguimento de caminho baseado em GNSS para veículo agrícola.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2018.

LI, Xingxing *et al.* **Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo.** Journal of Geodesy, v. 89, n. 6, p. 607–635, 2015.

LISBINSKI, Fernanda Cigainki *et al.* **Perspectivas e desafios da agricultura 4.0 para o setor agrícola.** VIII Simpósio da Ciência do Agronegócio, Porto Alegre-RS, 2020.

MANTOVANI, Evandro Chaturni *et al.* **Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão.** Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27, p. 109-157, 1998.

MARTIN, Giovani Menegucci *et al.* **Avaliação do processo de adubação em taxa variável utilizando sistema de orientação e direcionamento por GNSS.** Faculdade de Tecnologia FATEC Shunji Nishimura, Pompéia, 2019.

MENDES, Cássia I. Costa *et al.* **Estudo do mercado brasileiro de software para o agronegócio.** Portal Embrapa. Embrapa Agricultura Digital, 2011.

MOLIN, José Paulo *et al.* **Utilização de dados georreferenciados na determinação de parâmetros de desempenho em colheita mecanizada.** Engenharia Agrícola, v. 26, p. 759–767, 2006.

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

MOLIN, José Paulo; AMARAL, Lucas Rios do; COLAÇO, André Freitas. **Agricultura de precisão.** Oficina de Textos, 2015.

NARDO, Luiz A. de Souza. **Análise de cenários para auxílio à tomada de decisão no plantio mecanizado de cana-de-açúcar.** UNESP: Aleph, 36 p., 2015.

NOGUEIRA, Antônio C. Lima. **Mecanização na agricultura brasileira: uma visão prospectiva.** Cderno de Pesquisas em Administração, v.8, n. 4, p. 77-87, 2001.

OLIVEIRA, Tiago C. Antunes de. **Estudos sobre desempenho de sistemas de piloto automático em tratores.** Dissertação Maquinas Agrícolas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

REIS, Gustavo N. dos *et al.* **Manutenção de tratores agrícolas e condição técnica dos operadores.** Engenharia Agrícola, v. 25, n. 1, p. 282–290, 2005.

ROSA, Helton Aparecido. **Sensoriamento remoto orbital e não orbital no delineamento de zonas de manejo para agricultura de precisão.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel-PR, 2021

ROSA, Roberto. **Introdução ao geoprocessamento**. Universidade Federal de Uberlândia, Apostila, Uberlândia 2013.

SANTOS, Daniel Valim; AMOROSO, Raphael V. Barboza. **Monitoramento da pulverização por meio do controle estatístico do processo e telemetria**. Faculdade de Tecnologia FATEC Shunji Nishimura, Pompéia, 2018.

SANTOS, Adão Felipe dos *et al.* **Position errors in sowing in curved and rectilinear routes using autopilot**. Engenharia Agrícola, v. 38, p. 568–576, 2018.

SANTOS, Otávio *et al.* **Análise de índice de vegetação através de imagens obtidas por vant**. Revista Científica Faesa, v. 14, p. 142–162, 2018.

SIQUEIRA, Rubens Hille. **Acurácia do piloto automático elétrico em linhas convencionais e sobre projeto de linhas**. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, 2017.

SPEKKEN, Mark; DE BRUIN, Sytze. **Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time**. Precision Agriculture, v. 14, n. 2, p. 224–244, 2013.

VELLIDIS, George *et al.* **Reducing digging losses by using automated steering to plant and invert peanuts**. Agronomy, 2014, n. 4, p. 337-348, 2014.

ZELIK, Teilor Tiago. **Avaliação dos pulverizadores de barras na região norte do estado do rio grande do sul**. Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Curitibanos, Lebon Regis-SC, 2018.

ZERBATO, Cristiano *et al.* **Quality of mechanical peanut sowing and digging using autopilot**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 23, n. 8, p. 630–637, ago. 2019.