

Eficiência do uso do piloto automático agrícola em diferentes regiões do estado de Goiás: análise da sobreposição e do consumo de combustível em propriedades rurais

Efficiency of agricultural autopilot use in different regions of the state of Goiás: analysis of overlap and fuel consumption on farms

Aurélio Souza Cordeiro De Faria
Thiago Felipe Domingos Dias Fernandes

RESUMO

Este trabalho avaliou a eficiência do uso do piloto automático agrícola em 11 propriedades rurais de diferentes regiões do estado de Goiás, tomando como indicadores a sobreposição entre passadas e o consumo de combustível por hectare. A comparação foi quantitativa, observacional e pareada, com valores obtidos antes e depois do uso da tecnologia. A sobreposição média passou de 7,38% para 2,90%, o que correspondeu a uma redução média de 60,44%, e o teste t pareado indicou diferença estatisticamente significativa entre os momentos ($p < 0,001$). O consumo médio de combustível, por sua vez, diminuiu de 14,78 para 13,75 L/ha, com economia média de 6,99%; para essa variável, o teste de Wilcoxon também indicou diferença significativa ($p < 0,001$). Na análise exploratória, a redução percentual da sobreposição apresentou correlação positiva com a economia percentual de combustível ($r = 0,759$; $p = 0,0067$), e o modelo de regressão linear simples apresentou $R^2 = 0,577$. Na amostra estudada, portanto, o piloto automático esteve associado a menor sobreposição e menor consumo de combustível. A interpretação, contudo, permanece limitada pelo delineamento observacional, pelo número reduzido de casos e pela heterogeneidade da coleta.

Palavras-chave: agricultura de precisão; GNSS; piloto automático; sobreposição; consumo de combustível.

ABSTRACT

This study examined the efficiency of agricultural automatic steering in 11 rural properties from different regions of Goiás State, Brazil, using pass overlap and fuel consumption per hectare as the main indicators. The study used an observational paired design, comparing measurements obtained before and after the technology was adopted. Mean overlap decreased from 7.38% to 2.90%, an average reduction of 60.44%; the paired t-test indicated a statistically significant difference between conditions ($p < 0.001$). Mean fuel consumption decreased from 14.78 to 13.75 L/ha, corresponding to an average saving of 6.99%, and the Wilcoxon signed-rank test also indicated a significant difference ($p < 0.001$). Exploratory analysis showed a positive correlation between percentage overlap reduction and percentage fuel savings ($r = 0.759$; $p = 0.0067$), with $R^2 = 0.577$ in the simple linear regression model. Within the analyzed sample, automatic steering was therefore associated with lower overlap and lower fuel consumption. Interpretation is limited by the observational design, the small sample size, and heterogeneous data collection.

Keywords: precision agriculture; GNSS; automatic steering; overlap; fuel consumption.

1. INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola tem incorporado sistemas de posicionamento e automação para tornar as operações mais regulares e aproveitar melhor os recursos empregados no campo. Na agricultura de precisão, o direcionamento de máquinas por GNSS se relaciona diretamente à execução de passadas sucessivas e reduz a dependência exclusiva da percepção do operador para manter o paralelismo (SENAR, 2019; Molin; Amaral; Colaço, 2015).

O piloto automático recebe informações de posicionamento e atua no direcionamento da máquina para manter trajetórias mais regulares. Sem esse auxílio, desvios ao longo das passadas podem aumentar a sobreposição, repetir o trabalho sobre áreas já atendidas e reduzir o aproveitamento da largura efetiva do implemento. Ensaios de campo mostram que o direcionamento automático pode reduzir erros de paralelismo e sobreposição, embora os ganhos variem conforme a operação, o tipo de correção do sinal, o equipamento e as características do talhão (Santos *et al.*, 2017; D'Antonio *et al.*, 2023).

Reduzir a sobreposição é relevante porque diminui percursos redundantes e, em determinadas condições, pode contribuir para menor consumo de combustível por hectare. Há estudos que registram economia de combustível com tecnologias de orientação, mas esse efeito não ocorre de maneira uniforme: potência demandada, velocidade, relevo, manobras e tipo de operação também interferem no resultado (Bora; Nowatzki; Roberts, 2012; Ashworth *et al.*, 2022).

Em Goiás, onde a agricultura mecanizada ocupa papel importante no sistema produtivo, a presença de ferramentas de agricultura de precisão torna pertinente a avaliação de resultados obtidos em propriedades comerciais. No sudoeste do estado, Soares Filho e Cunha (2015) identificaram uso expressivo de piloto automático entre produtores que já adotavam agricultura de precisão. Dados provenientes de propriedades reais, porém, precisam ser interpretados considerando a diversidade dos sistemas de produção e os limites de representatividade da amostra.

Por isso, o trabalho foi concentrado nos dois indicadores disponíveis de forma comparável nos 11 registros analisados: porcentagem de sobreposição e consumo de combustível por hectare. Variáveis previstas no projeto inicial, mas sem definição ou unidade suficientemente uniformes para comparação, foram deixadas de fora. O recorte adotado permite responder ao problema de pesquisa sem atribuir aos dados uma abrangência que eles não possuem.

1.1. Problema de pesquisa

Em propriedades rurais selecionadas de diferentes regiões do estado de Goiás, quais alterações nos índices de sobreposição das operações mecanizadas e no consumo de combustível por hectare estão associadas ao uso do piloto automático agrícola, quando comparados os registros obtidos antes e depois da adoção da tecnologia?

1.2. Hipótese

Nas propriedades rurais analisadas, espera-se que o uso do piloto automático agrícola esteja associado à redução dos índices de sobreposição nas operações mecanizadas e à diminuição do consumo de combustível por hectare. Também se espera que maiores reduções percentuais de sobreposição ocorram juntamente com maiores percentuais de economia de combustível.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a eficiência do uso do piloto automático agrícola em propriedades rurais selecionadas de diferentes regiões do estado de Goiás, por meio da comparação dos índices de sobreposição das operações mecanizadas e do consumo de combustível por hectare antes e depois da adoção da tecnologia.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar a amostra quanto à localização regional, área das propriedades, culturas registradas e categoria de sinal corrigido utilizado.
- Comparar os índices de sobreposição das operações mecanizadas antes e depois do uso do piloto automático, quantificando a diferença absoluta e a redução percentual observada.
- Comparar o consumo de combustível por hectare antes e depois do uso do piloto automático, quantificando a diferença observada e a economia percentual de combustível.
- Avaliar a associação entre a redução percentual da sobreposição e a economia percentual de combustível por meio de análise de correlação e regressão linear simples exploratória.
- Descrever a distribuição dos casos e dos principais indicadores segundo as regiões e culturas representadas na amostra.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A agricultura mecanizada passou a incorporar sistemas de posicionamento, sensores, controladores e mecanismos de automação capazes de registrar e executar operações com maior repetibilidade espacial. A agricultura de precisão, nesse cenário, vai além da presença isolada de equipamentos eletrônicos: ela envolve a coleta e o uso de informações para orientar decisões e melhorar a utilização dos recursos. Inamasu e Bernardi (2014) a apresentam como uma abordagem de manejo apoiada em instrumentação, automação e informações

especializadas; Molin, Amaral e Colaço (2015), por sua vez, enfatizam o tratamento tecnicamente orientado da variabilidade existente nos sistemas produtivos.

Nesta pesquisa, o interesse está na parcela da agricultura de precisão diretamente ligada ao direcionamento de máquinas. Tecnologias como drones, aplicativos e sensoriamento remoto, embora façam parte do tema mais amplo, não participam da análise empírica realizada. A revisão, por isso, foi delimitada a GNSS, direcionamento automático, paralelismo entre passadas, sobreposição operacional e consumo de combustível.

3.1. Agricultura de precisão e automação das operações mecanizadas

A agricultura de precisão parte do reconhecimento de que as áreas agrícolas não são homogêneas e podem exigir decisões diferenciadas de manejo. O SENAR (2019) a define como um conjunto de ferramentas e tecnologias voltado ao gerenciamento localizado das lavouras, com foco na otimização do sistema produtivo, no retorno econômico e na redução de impactos ambientais. Molin, Amaral e Colaço (2015) trabalham com uma perspectiva compatível, que inclui posicionamento, aquisição de dados, sistemas de orientação e automação de máquinas entre os recursos utilizados no manejo.

Muitas operações agrícolas dependem de trajetórias sucessivas executadas por tratores, pulverizadores, colhedoras e outros equipamentos. Quando o direcionamento é convencional, manter o paralelismo exige correções contínuas do operador. Pequenos desvios podem criar faixas trabalhadas duas vezes, deixar áreas sem atendimento ou reduzir o aproveitamento da largura útil do implemento. Os sistemas de orientação utilizam uma referência espacial justamente para diminuir essa dependência e manter as passadas mais regulares (SENAR, 2019).

A expansão da mecanização e da eletrônica embarcada favoreceu a adoção desses recursos no Brasil. No sudoeste de Goiás, Soares Filho e Cunha (2015) verificaram presença expressiva de sistemas de direcionamento por GPS entre produtores que já utilizavam agricultura de precisão: 68,18% dos entrevistados empregavam piloto automático. Os autores também registraram obstáculos relacionados ao custo dos equipamentos e à disponibilidade de mão de obra qualificada, o que mostra que a adoção não depende apenas do desempenho técnico da tecnologia.

3.2. GNSS e sistemas de direcionamento automático

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS, do inglês Global Navigation Satellite System) fornecem a referência de posicionamento utilizada por grande parte dos sistemas de orientação de máquinas agrícolas. A sigla abrange constelações como GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou. A partir desses sinais, o receptor instalado na máquina determina a posição do equipamento e permite o acompanhamento de trajetórias pré definidas. Segundo o SENAR (2019), a mesma base tecnológica pode ser usada tanto para localizar atributos da lavoura quanto para orientar os trajetos dos equipamentos.

A qualidade do posicionamento varia com o receptor, o método empregado, as correções disponíveis, a geometria dos satélites e outros fatores que afetam a solução. Operações que exigem maior repetibilidade podem recorrer a correções centimétricas, como RTK e RTX, enquanto outras admitem precisão submétrica (SENAR, 2019). Essa diferença é operacionalmente relevante porque se reflete na regularidade das passadas e, portanto, na ocorrência de falhas e sobreposições.

Há sistemas que apenas indicam ao operador a correção de trajetória, como as barras de luzes, e sistemas que atuam diretamente sobre o mecanismo de direção. Neste último caso, caracteriza-se o piloto automático. O SENAR (2019) descreve o auto guiamento como o uso da posição fornecida pelo GNSS para comandar o direcionamento da máquina, reduzindo a necessidade de correção manual contínua e favorecendo trajetos paralelos.

Os resultados experimentais ajudam a mostrar como a qualidade do posicionamento aparece no campo. Em uma operação de semeadura de amendoim, Santos *et al.* (2017) verificaram que variações no posicionamento do sistema estavam associadas à regularidade das passadas e ao nível de sobreposição. Zerbato *et al.* (2019), ao comparar operações de semeadura e arranquio realizadas com direcionamento manual e automático, também observaram melhor paralelismo e qualidade operacional com o uso do piloto automático.

3.3. Paralelismo, falhas e sobreposição entre passadas

Há sobreposição quando uma faixa já atendida volta a ser percorrida ou trabalhada na passagem seguinte. Em algumas operações, uma pequena sobreposição pode ser deliberada para evitar falhas; quando excessiva, entretanto,

ela reduz o aproveitamento da largura de trabalho. Na pulverização, adubação ou semeadura, isso pode significar reaplicação sobre a mesma faixa. Em outras atividades, representa deslocamento adicional e mais tempo de máquina (SENAR, 2019).

Uma das funções do direcionamento automático é reduzir a dificuldade de manter passadas paralelas e espaçadas de acordo com a largura efetiva do conjunto mecanizado. O SENAR (2019) aponta seu uso em preparo do solo, semeadura, pulverização e colheita justamente para diminuir falhas e sobreposições. Nesse sentido, a porcentagem de sobreposição funciona como um indicador da qualidade do direcionamento e do aproveitamento da faixa operacional.

Os estudos de campo mostram que esse desempenho varia. Topcueri e Keskin (2019), ao comparar pulverizações em 13 áreas agrícolas, encontraram menores erros de sobreposição e espaçamento com direcionamento automático e correção RTK. Mesmo assim, os resultados não foram idênticos entre propriedades e configurações, pois ajustes do equipamento e condições de operação continuaram influenciando o desempenho.

D'Antonio *et al.* (2023) compararam direcionamento manual, semiautomático e automático em uma operação de controle de plantas daninhas. Com o sistema automático, a área sobreposta foi 88,9% menor que no direcionamento manual, acompanhada de aumento da capacidade de campo e redução no uso de insumos. O resultado ilustra que a sobreposição pode ser lida tanto como indicador geométrico da qualidade das passadas quanto como componente da eficiência operacional.

O percentual de redução, no entanto, depende do contexto de cada operação. Largura do implemento, formato do talhão, relevo, manobras de cabeceira, calibração, qualidade do sinal, habilidade do operador e sistema de correção podem alterar a magnitude do benefício. Por isso, valores observados em uma propriedade não devem ser tratados como constantes aplicáveis a qualquer sistema produtivo. Em estudos observacionais, é mais prudente descrever a tendência da amostra e a magnitude das diferenças efetivamente registradas (Topcueri; Keskin, 2019; Ashworth *et al.*, 2022).

3.4. Eficiência operacional e consumo de combustível

A eficiência operacional de um conjunto mecanizado depende de como tempo, largura de trabalho, potência e insumos são empregados para executar a operação. Quando uma faixa é sobreposta, a máquina percorre novamente parte de uma área já atendida. Esse deslocamento adicional pode aumentar o tempo necessário para cobrir a área e criar condições para maior consumo de combustível por hectare, embora outros componentes da operação também interfiram no resultado (Bora; Nowatzki; Roberts, 2012; D'Antonio *et al.*, 2023).

As propriedades de Dakota do Norte, Bora, Nowatzki e Roberts (2012) estimaram economias associadas a tecnologias de agricultura de precisão. Os sistemas de orientação por GPS foram relacionados a redução média de 6,32% no consumo de combustível; para sistemas de direção automática, a redução média reportada foi de 5,33%. O estudo vinculou esses ganhos à diminuição de passadas sobrepostas e do tempo de operação.

Em condições experimentais, D'Antonio *et al.* (2023) também registraram menor consumo: o direcionamento automático reduziu o uso de combustível em 11,5%, ao mesmo tempo em que diminuiu o tempo total e a área sobreposta. O resultado sugere que o efeito do auto guiamento não se limita à geometria das passadas, pois a eliminação de deslocamentos redundantes pode repercutir no consumo por área.

Nem sempre, porém, melhor direcionamento significa menor consumo. Ashworth *et al.* (2022), em cenários de manejo de pastagens, observaram redução de falhas e sobreposições, mas aumento do combustível em algumas situações. Produtividade, tipo de operação, implemento, percurso e número de passadas também participam do balanço energético. A leitura dos resultados, portanto, precisa considerar as condições em que cada operação foi executada.

A queda do consumo por hectare pode representar redução de custo variável, mas litros economizados não equivalem, por si só, a retorno financeiro. Para converter esse indicador em ganho monetário seriam necessários, entre outros dados, preço do combustível, área efetivamente trabalhada, frequência anual das operações e custos de aquisição e manutenção do sistema. Batte e Ehsani (2006) mostram que os benefícios econômicos dependem da redução de sobreposição e das características da propriedade e dos talhões. Sem essas informações adicionais, o consumo em L/ha deve ser tratado como um indicador de eficiência de uso do insumo, e não como medida direta de retorno sobre o investimento.

3.5. Relação entre redução da sobreposição e economia de combustível

É plausível esperar que propriedades com maior redução de sobreposição também apresentem maior economia de combustível. Menos área retrabalhada significa, em princípio, menos deslocamento redundante para cobrir a mesma superfície. Mantidas condições semelhantes de máquina, implemento e operação, isso pode reduzir tempo de funcionamento e consumo por hectare. Bora, Nowatzki e Roberts (2012) relacionam a economia de combustível à redução de passadas redundantes, enquanto D'Antonio *et al.* (2023) observaram simultaneamente queda da sobreposição, do tempo operacional e do consumo sob direcionamento automático.

Essa relação deve ser tratada como associação empírica, não como prova isolada de causalidade. O consumo por hectare também responde à potência demandada, à velocidade, às condições do solo, ao relevo, ao implemento, às manobras, ao estado mecânico do equipamento e à estratégia operacional. Assim, mesmo que redução de sobreposição e economia de combustível variem na mesma direção, não se pode atribuir toda a economia apenas ao primeiro fator (Ashworth *et al.*, 2022).

A cautela é ainda mais importante quando se trabalha com poucos casos e registros provenientes de propriedades comerciais, nos quais a heterogeneidade tende a ser maior do que em experimentos controlados. Por outro lado, esses dados retratam o uso da tecnologia em condições reais. Topcueri e Keskin (2019) ressaltam que o benefício do direcionamento automático varia entre agricultores e depende, entre outros aspectos, da configuração e do uso adequado do equipamento. Correlação e regressão podem explorar relações entre os indicadores, desde que a interpretação permaneça limitada à amostra observada.

3.6. Agricultura de precisão no contexto goiano

Goiás reúne sistemas de produção altamente mecanizados, sobretudo em áreas de grãos, contexto favorável ao emprego de tecnologias de posicionamento e direcionamento. No sudoeste goiano, Soares Filho e Cunha (2015) encontraram piloto automático entre as ferramentas utilizadas por produtores que adotavam agricultura de precisão. O estudo também destacou o uso de GPS e amostragem em grade e registrou soja e milho entre as culturas em que o direcionamento

automático contribuía para organizar melhor as linhas e o aproveitamento operacional da área.

A presença regional da tecnologia reforça a pertinência do estudo, mas não elimina o problema da representatividade. Soares Filho e Cunha (2015), por exemplo, recorreram a amostragem não probabilística porque não havia uma população conhecida de usuários de agricultura de precisão. Situação semelhante ocorre quando a pesquisa depende de contatos e registros disponíveis. Nesses casos, a contribuição está em descrever de maneira transparente o que foi observado e comparar esse comportamento com a literatura, sem generalização indevida.

3.7. Síntese da fundamentação e relação com as variáveis do estudo

A literatura dá suporte ao uso de sobreposição e consumo de combustível como indicadores relacionados ao desempenho do direcionamento automático. A primeira variável acompanha diretamente a regularidade do paralelismo entre passadas; a segunda, expressa por unidade de área, complementa a leitura da eficiência operacional e pode refletir a redução de deslocamentos redundantes. O consumo, entretanto, também depende de fatores que não pertencem ao sistema de direção (Santos *et al.*, 2017; Bora; Nowatzki; Roberts, 2012).

Comparar os registros antes e depois do uso do piloto automático permite verificar como esses dois indicadores se comportam na amostra disponível. Estudos brasileiros e internacionais relatam melhora do paralelismo, menor sobreposição e, em diferentes condições, redução de combustível com direção automática (Santos *et al.*, 2017; Topcueri; Keskin, 2019; D'Antonio *et al.*, 2023). Há também resultados divergentes para o consumo, o que reforça a necessidade de interpretar cada conjunto de dados dentro de seu contexto operacional (Ashworth *et al.*, 2022).

A revisão, portanto, conduz a três perguntas diretamente mensuráveis neste trabalho: quanto a sobreposição mudou após a adoção do direcionamento automático; como variou o consumo de combustível por hectare; e se a redução da sobreposição acompanhou a economia de combustível. Esse recorte mantém a fundamentação ligada aos dados efetivamente disponíveis e evita extrapolar para variáveis que não foram medidas.

4. METODOLOGIA

4.1. Delineamento da pesquisa

A pesquisa é aplicada e de abordagem quantitativa. O delineamento é observacional, com comparação intraunidade do tipo antes-depois, classificação compatível com a organização metodológica de estudos quantitativos descrita por Gil (2022). Cada produtor/propriedade rural constituiu uma unidade de análise. Não houve randomização nem grupo controle independente; em cada caso, os valores registrados antes do uso do piloto automático foram comparados aos valores posteriores.

4.2. Área do estudo e composição da amostra

Foram analisados 11 registros referentes a propriedades rurais localizadas em Goiás. A amostra foi não probabilística, formada por conveniência e disponibilidade de dados, e reuniu casos com informações comparáveis para os indicadores centrais do estudo.

Os 11 casos estavam distribuídos entre as regiões Sudoeste, Leste, Sul, Centro, Norte e Centro-Norte de Goiás, conforme a classificação existente na base. As culturas registradas foram soja, milho e combinações soja/milho. Em todos os casos, a categoria de sinal corrigido constava como RTP.

4.3. Origem e validação dos dados

Os dados vieram de diferentes formas de contato do pesquisador com os produtores: conversas e questionamentos por aplicativo de mensagens, atendimentos em campo, fotografias, documentos e registros associados aos equipamentos e às propriedades. Não houve um único instrumento padronizado aplicado a todos os participantes. Por essa razão, a análise ficou restrita às variáveis que apresentavam definição operacional clara e estavam disponíveis de modo comparável nos registros selecionados.

A base utilizada na pesquisa foi preservada como referência e, para as análises, os casos passaram a ser identificados por códigos de P01 a P11. Os

percentuais de redução da sobreposição e de economia de combustível foram recalculados diretamente a partir dos valores antes e depois, em vez de se reutilizarem percentuais já preenchidos. Valores ausentes não foram estimados para completar as variáveis analisadas.

4.4. Variáveis analisadas

A análise utilizou variáveis de caracterização da propriedade e duas medidas quantitativas principais, ligadas ao desempenho operacional e ao consumo de combustível. O Quadro 1 resume a natureza de cada variável e o papel que ela desempenhou no tratamento dos dados.

Quadro 1 – Variáveis mantidas na base analítica e sua finalidade

Variável	Unidade/natureza	Uso na análise
Município	Categórica	Caracterização da amostra.
Região	Categórica	Caracterização descritiva; sem comparação inferencial entre regiões.
Área	ha	Caracterização quantitativa da amostra.
Cultura	Categórica	Caracterização descritiva; sem comparação inferencial entre culturas.
Sinal corrigido (RTP)	Categórica constante	Caracterização; não utilizada em comparação entre sistemas.
Sobreposição antes e depois	%	Indicador operacional principal, analisado de forma pareada.
Consumo de combustível antes e depois	L/ha	Indicador de eficiência de uso de combustível, analisado de forma pareada.
Redução da sobreposição	%	Indicador derivado calculado a partir dos valores antes e depois.
Economia de combustível	%	Indicador derivado calculado a partir dos valores antes e depois.

Fonte: elaboração própria (2026).

O tempo operacional não foi mantido porque os registros não permitiam identificar, de maneira uniforme, a que unidade as horas se referiam - dia, operação, talhão, propriedade ou outro recorte. Pelo mesmo motivo de comparabilidade, ficaram fora da análise falhas operacionais, economia de sementes, fertilizantes e defensivos, custos monetários, retorno sobre investimento e percepção dos produtores. O consumo de combustível foi tratado como indicador de eficiência de uso do insumo e como aproximação de possível efeito econômico, sem conversão

direta para valores monetários, uma vez que esse tipo de estimativa exigiria informações adicionais de custo e escala de uso (Bora; Nowatzki; Roberts, 2012; Ashworth *et al.*, 2018).

4.5. Tratamento e cálculo dos indicadores

Para cada caso, foram mantidos os valores registrados antes e depois. A diferença absoluta correspondeu ao valor anterior menos o posterior; no caso da sobreposição, ela também foi expressa em pontos percentuais. As medidas relativas foram calculadas individualmente pelas expressões a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Redução da sobreposição (\%)} &= \left[\frac{\text{Sobreposição antes} - \text{Sobreposição depois}}{\text{Sobreposição antes}} \right] \cdot 100 \\ \text{Economia de combustível (\%)} &= \left[\frac{\text{Combustível antes} - \text{Combustível depois}}{\text{Combustível antes}} \right] \cdot 100 \end{aligned}$$

Primeiro foram obtidos os indicadores de cada produtor e, somente depois, as medidas-resumo da amostra. Desse modo, a estrutura pareada dos dados foi preservada e os percentuais não foram derivados apenas das médias gerais.

4.6. Análise estatística

A caracterização da amostra foi feita por estatística descritiva. Para as variáveis quantitativas, calcularam-se número de observações, média, mediana, desvio-padrão, mínimo, máximo, primeiro e terceiro quartis e coeficiente de variação. Nas comparações antes-depois, também foram obtidas as diferenças absolutas e as variações percentuais de cada caso.

Como as duas condições pertenciam aos mesmos 11 casos, a análise inferencial foi conduzida de forma pareada. A normalidade foi avaliada sobre as diferenças entre os valores antes e depois, e não sobre cada momento isoladamente, usando o teste de Shapiro-Wilk. Diferenças compatíveis com a normalidade foram comparadas pelo teste t de Student pareado; quando esse pressuposto foi rejeitado, utilizou-se o teste dos postos sinalizados de Wilcoxon, procedimento coerente com a avaliação de normalidade em amostras pequenas (Miot, 2017).

A sobreposição foi, assim, comparada pelo teste t pareado, com intervalo de confiança de 95% para a diferença média e cálculo do tamanho do efeito d_z de Cohen (Cohen, 1988). Para o consumo de combustível, empregou-se o teste de Wilcoxon pareado e a correlação bisserial de postos como medida de tamanho de efeito. Todos os testes foram bicaudais e adotaram um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

A relação entre o indicador operacional e o consumo de combustível foi examinada de forma exploratória. Calculou-se a correlação de Pearson entre a redução percentual da sobreposição e a economia percentual de combustível e, em seguida, ajustou-se uma regressão linear simples, com economia de combustível (%) como variável dependente e redução da sobreposição (%) como variável explicativa. O modelo não foi tratado como preditivo ou causal, sobretudo pelo tamanho reduzido da amostra e pela coleta não padronizada.

Regiões e culturas foram comparadas apenas de maneira descritiva. ANOVA e o teste de Tukey constavam do projeto inicial, mas não foram executados porque a amostra final gerou sub grupos muito pequenos e desequilibrados, alguns com uma ou duas observações. Diante dessa estrutura, optou-se por não produzir inferências entre grupos com sustentação amostral insuficiente.

4.7. Confidencialidade e integridade da base

Na base usada para os cálculos, nomes de produtores e propriedades foram substituídos por códigos alfanuméricos, e os resultados foram apresentados de forma agregada. Variáveis sem definição operacional consistente foram retiradas da análise, e valores ausentes não foram preenchidos por estimativa. Essa decisão manteve alinhados os dados disponíveis, o método descrito e os resultados apresentados.

5. RESULTADOS

O capítulo de resultados considera os 11 registros que compõem a amostra do estudo. As comparações de sobreposição e consumo de combustível foram pareadas, enquanto região, cultura e área foram utilizadas para caracterizar os casos. A inferência estatística ficou restrita às duas variáveis quantitativas com definição e unidade comparáveis.

5.1. Caracterização dos registros analisados

Os 11 registros estavam distribuídos por diferentes regiões de Goiás. Quatro pertenciam à região Sul (36,4%); Sudoeste e Norte contribuíram com dois casos cada (18,2%); Leste, Centro e Centro-Norte apareceram com um registro cada (9,1%). Quanto às culturas, cinco registros eram de soja (45,5%), cinco de soja/milho (45,5%) e um de milho (9,1%). Todos os casos incluídos traziam RTP como categoria de sinal corrigido.

As áreas variaram bastante, de 100 a 1.300 ha. A média foi de 509,55 ha e o desvio-padrão de 413,03 ha, enquanto a mediana ficou em 350,00 ha. A distância entre média e mediana reflete a presença de propriedades maiores puxando a média para cima; por isso, área, região e cultura foram mantidas apenas na caracterização descritiva.

Tabela 1 – Caracterização dos registros analisados

Característica	Categoria/estatística	n ou valor	%
Região	Sul	4	36,4
Região	Sudoeste	2	18,2
Região	Norte	2	18,2
Região	Leste	1	9,1
Região	Centro	1	9,1
Região	Centro-Norte	1	9,1
Cultura	Soja	5	45,5
Cultura	Soja/Milho	5	45,5
Cultura	Milho	1	9,1
Sinal corrigido	RTP	11	100,0
Área (ha)	Média ± DP	509,55 ± 413,03	—
Área (ha)	Mediana	350,00	—
Área (ha)	Mínimo–máximo	100–1.300	—

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

5.2. Sobreposição antes e após o uso do piloto automático

Antes do uso do piloto automático, a sobreposição média era de 7,38%, com mediana de 7,50% e desvio-padrão de 0,69 ponto percentual. Depois, a média caiu para 2,90%; a mediana também foi de 2,90% e o desvio-padrão, de 0,12 ponto percentual. A diferença média entre os momentos foi de 4,48 pontos percentuais, equivalente a uma redução média de 60,44%.

Em termos individuais, a redução percentual variou de 53,97% a 64,63%. Também houve menor dispersão após a adoção do piloto: os valores posteriores ficaram entre 2,70% e 3,10%, enquanto os anteriores variaram de 6,20% a 8,20%.

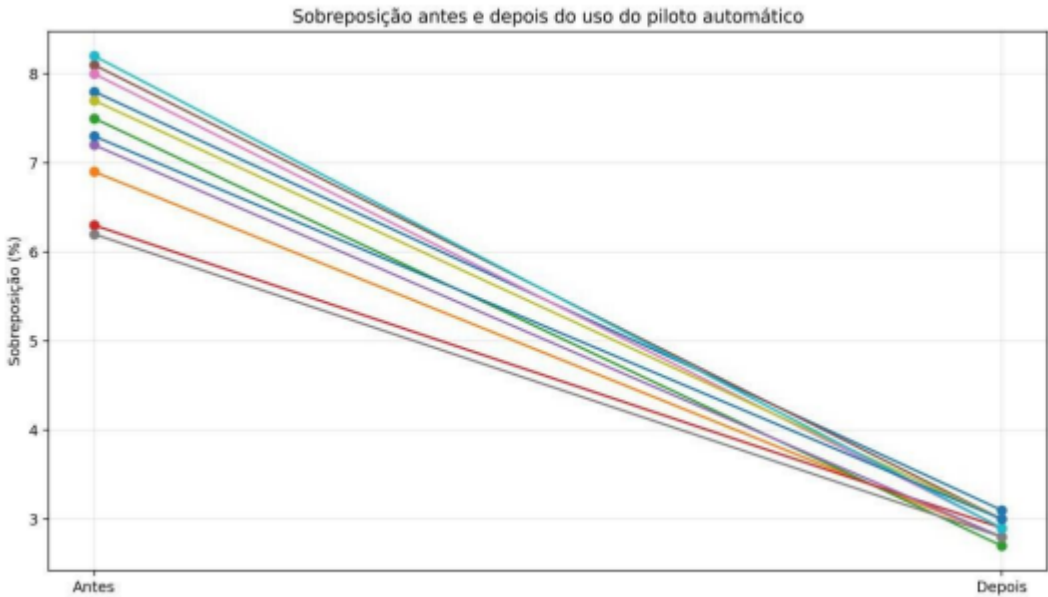
Tabela 2 – Estatística descritiva da sobreposição antes e após o uso do piloto automático

Indicador	n	Média	Mediana	DP	Mínimo	Máximo
Antes (%)	11	7,38	7,50	0,69	6,20	8,20
Depois (%)	11	2,90	2,90	0,12	2,70	3,10
Diferença (p.p.)	11	4,48	4,70	0,64	3,40	5,30
Redução (%)	11	60,44	61,04	3,54	53,97	64,63

Nota: p.p. = pontos percentuais; DP = desvio-padrão.

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

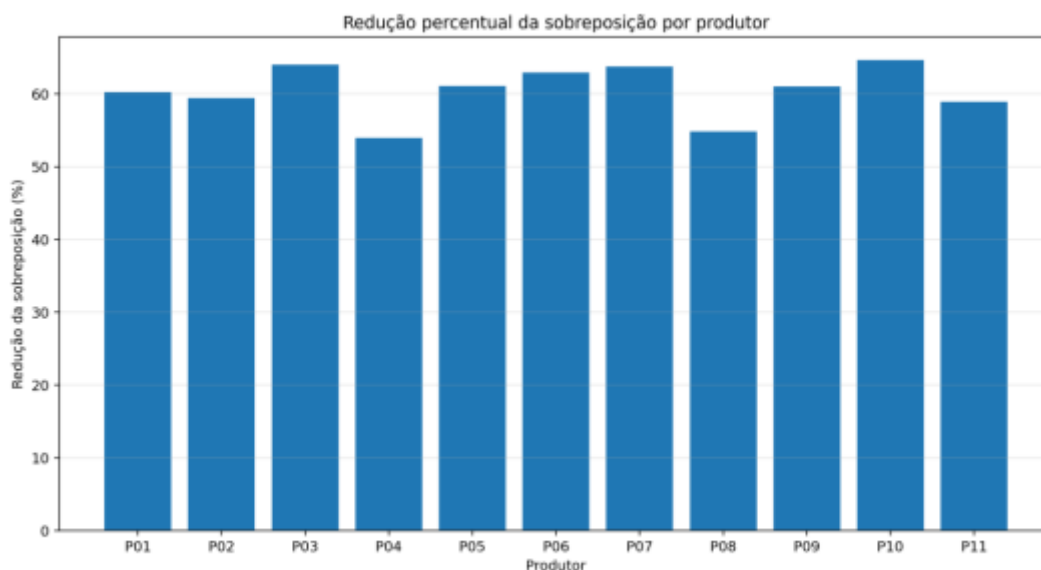
Figura 1 – Comparação pareada da sobreposição antes e depois do uso do piloto automático



Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

As linhas pareadas da Figura 1 descem em todos os 11 casos, isto é, nenhum registro apresentou aumento de sobreposição após a adoção do piloto automático. A Figura 2 detalha a redução percentual observada em cada caso.

Figura 2 – Redução percentual da sobreposição por registro analisado



Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

5.3. Consumo de combustível antes e após o uso do piloto automático

O consumo médio de combustível foi de 14,78 L/ha antes do piloto automático, com mediana de 14,90 L/ha e desvio-padrão de 0,59 L/ha. Depois, a média caiu para 13,75 L/ha, a mediana para 13,90 L/ha e o desvio-padrão para 0,49 L/ha. A diferença média foi de 1,04 L/ha, o que correspondeu a economia percentual média de 6,99%.

As reduções individuais ficaram entre 0,80 e 1,20 L/ha. Em termos percentuais, a economia variou de 5,88% a 7,74%, com mediana de 7,24%. Todos os 11 registros apresentaram consumo menor no momento posterior.

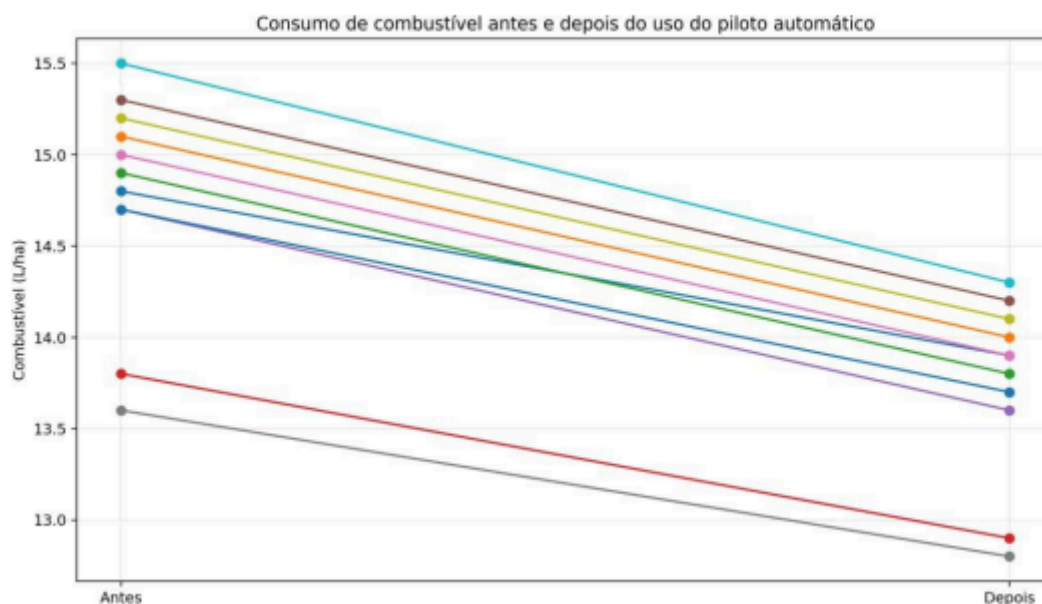
Tabela 3 – Estatística descritiva do consumo de combustível antes e após o uso do piloto automático

Indicador	n	Média	Mediana	DP	Mínimo	Máximo
Antes (L/ha)	11	14,78	14,90	0,59	13,60	15,50
Depois (L/ha)	11	13,75	13,90	0,49	12,80	14,30
Diferença (L/ha)	11	1,04	1,10	0,12	0,80	1,20
Economia (%)	11	6,99	7,24	0,60	5,88	7,74

Nota: DP = desvio-padrão; L/ha = litros por hectare.

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

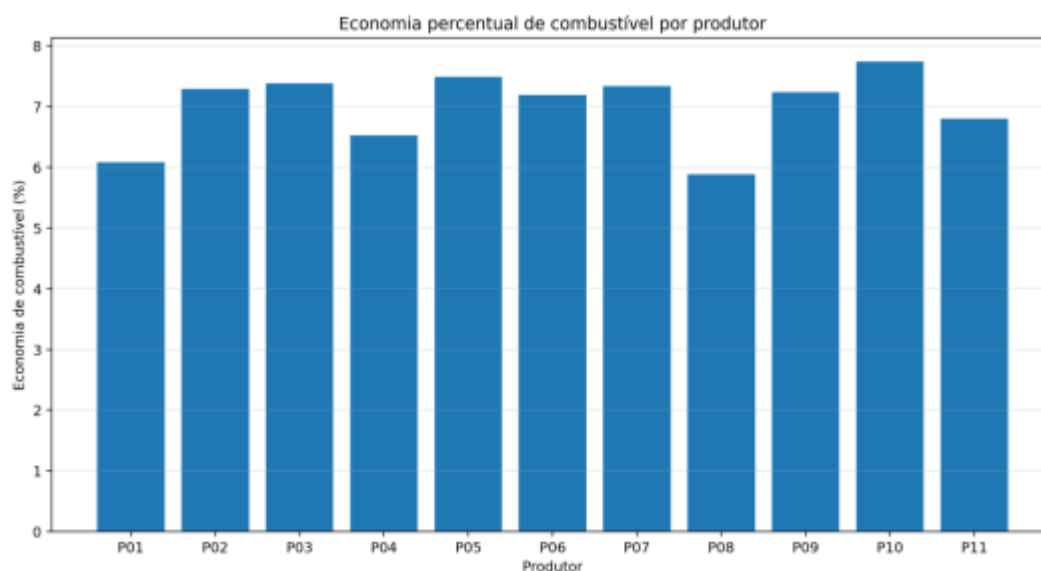
Figura 3 – Comparação pareada do consumo de combustível antes e depois do uso do piloto automático



Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

Na Figura 3, todos os pares apresentam queda de consumo. A Figura 4 mostra a economia percentual de cada caso e evidencia que, apesar das diferenças individuais, os valores ficaram concentrados em uma faixa relativamente estreita.

Figura 4 – Economia percentual de combustível por registro analisado



Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

5.4. Testes de normalidade e comparações pareadas

A escolha do teste para cada variável partiu da distribuição das diferenças pareadas. Para a sobreposição, o Shapiro-Wilk resultou em $W = 0,911$ e $p = 0,253$,

sem evidência para rejeitar a normalidade ao nível de 5%; por isso, utilizou-se o teste t de Student pareado. No combustível, $W = 0,841$ e $p = 0,033$ indicou desvio da normalidade, levando à adoção do teste de Wilcoxon pareado.

Tabela 4 – Teste de normalidade das diferenças entre os momentos antes e depois

Diferença avaliada	W	p-valor	Decisão ($\alpha = 0,05$)	Teste adotado
Sobreposição (antes – depois)	0,911	0,253	Não rejeitar normalidade	t de Student pareado
Combustível (antes – depois)	0,841	0,033	Rejeitar normalidade	Wilcoxon pareado

Nota: A normalidade foi avaliada sobre as diferenças pareadas, e não sobre os momentos isoladamente.

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

Na sobreposição, o teste t pareado indicou diferença estatisticamente significativa, $t(10) = 23,06$ e $p < 0,001$. A diferença média foi de 4,48 pontos percentuais, com IC95% de 4,05 a 4,91 pontos percentuais. O tamanho de efeito foi muito elevado ($d_z = 6,95$), o que expressa a magnitude da diferença em relação à variabilidade das diferenças pareadas (Cohen, 1988).

Para o consumo de combustível, o Wilcoxon também apontou diferença estatisticamente significativa entre os momentos ($W = 0$; $p < 0,001$). A mediana caiu de 14,90 para 13,90 L/ha. A correlação bisserial de postos foi 1,00, resultado compatível com o fato de todos os casos apresentarem mudança na mesma direção.

Tabela 5 – Comparações pareadas dos indicadores de sobreposição e consumo de combustível

Indicador	Teste	n	Estatística	gl	p-valor	Magnitude principal	Tamanho de efeito
Sobreposição (%)	t pareado	11	23,06	10	$< 0,001$	4,48 p.p. (IC95%: 4,05–4,91)	Cohen $d_z = 6,95$
Combustível (L/ha)	Wilcoxon	11	$W = 0$	—	$< 0,001$	Mediana: 14,90 → 13,90 L/ha	r bisserial = 1,00

Nota: IC95% = intervalo de confiança de 95%; gl = graus de liberdade. O teste de Wilcoxon foi adotado para combustível devido à não normalidade das diferenças.

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

5.5. Associação entre redução da sobreposição e economia de combustível

Na análise exploratória, a redução percentual da sobreposição apresentou correlação positiva com a economia percentual de combustível ($r = 0,759$; $p = 0,0067$). Na amostra, portanto, maiores reduções de sobreposição tenderam a ocorrer nos mesmos registros em que a economia de combustível foi maior.

A regressão linear simples apresentou $R^2 = 0,577$, $F(1,9) = 12,26$ e $p = 0,0067$. O coeficiente angular foi $\beta_1 = 0,1284$, com IC95% de 0,0454 a 0,2113. A equação ajustada foi:

$$\text{Economia de combustível (\%)} = -0,765 + 0,1284 \cdot \text{Redução da sobreposição (\%)}$$

Dentro da faixa observada nos 11 registros, o modelo descreve aumento da economia percentual de combustível à medida que cresce a redução da sobreposição. Essa leitura é estritamente associativa e exploratória; o ajuste não permite atribuir causalidade entre as duas variáveis.

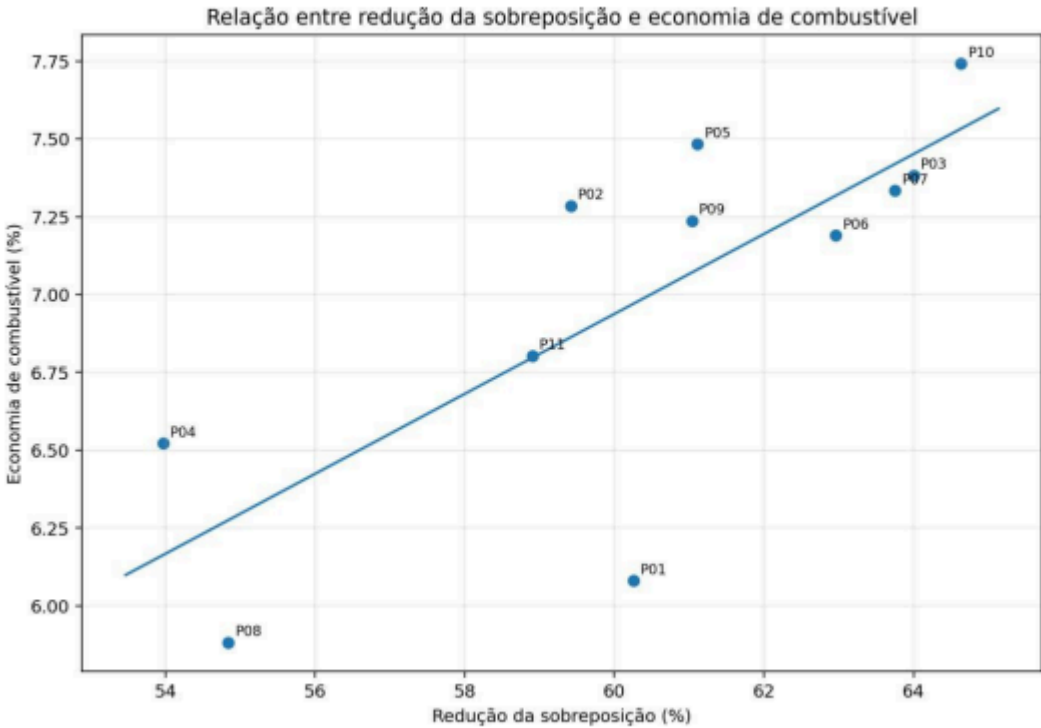
Tabela 6 – Associação exploratória entre redução da sobreposição e economia de combustível

Análise	Estimativa principal	IC95%	R ²	F	P-valor	Interpretação/equação
Correlação de Pearson	$r = 0,759$	—	0,577	—	0,0067	Associação positiva
Regressão linear simples	$\beta_1 = 0,1284$	0,0454 a 0,2113	0,577	12,26	0,0067	$\text{Economia (\%)} = -0,765 + 0,1284 \cdot \text{Redução da sobreposição (\%)}$

Nota: Análise exploratória com $n = 11$. Para a regressão, $gl = 1$ e 9. Os resíduos não apresentaram evidência de não normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk ($W = 0,899$; $p = 0,180$). A associação não deve ser interpretada como causal.

Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

Figura 5 – Relação entre redução da sobreposição e economia de combustível, com ajuste de regressão linear simples



Fonte: elaboração própria a partir dos dados da pesquisa (2026).

5.6. Síntese dos resultados

Nos 11 registros, os dois indicadores diminuíram após a adoção do piloto automático. A redução média da sobreposição foi de 60,44%, e a economia média de combustível chegou a 6,99%. As diferenças foram estatisticamente significativas tanto para sobreposição, pelo teste t pareado, quanto para combustível, pelo Wilcoxon. A análise exploratória ainda mostrou que reduções maiores de sobreposição tenderam a acompanhar economias maiores de combustível. Esses resultados descrevem a amostra e orientam a comparação com a literatura no capítulo seguinte.

6. DISCUSSÃO

Nos 11 casos analisados, o uso do piloto automático coincidiu com melhora nos dois indicadores mantidos no estudo. A sobreposição média caiu de 7,38% para 2,90%, uma redução média de 60,44%, e o consumo passou de 14,78 para 13,75 L/ha, com economia média de 6,99%. As comparações pareadas foram significativas e a análise exploratória mostrou associação positiva entre as duas reduções. O sentido desses resultados é compatível com o funcionamento esperado dos sistemas de direcionamento automático, que procuram manter trajetórias mais regulares e reduzir passadas redundantes (SENAR, 2019; D'Antonio *et al.*, 2023).

6.1. Redução da sobreposição e qualidade do direcionamento

A sobreposição foi o indicador que mais se alterou. A diferença média entre antes e depois chegou a 4,48 pontos percentuais, com IC95% de 4,05 a 4,91 pontos percentuais, e todos os registros apresentaram redução. Na prática, menor sobreposição significa menor repetição de faixas e melhor aproveitamento da largura de trabalho, exatamente o tipo de ganho operacional associado à manutenção do paralelismo (SENAR, 2019; Santos *et al.*, 2017).

Esse resultado pode ser comparado ao trabalho de Santos *et al.* (2017), que avaliou semeadura de amendoim com direcionamento automático e sinal RTX. Os autores observaram que o desempenho do posicionamento se refletia na regularidade das passadas e na ocorrência de sobreposição. Embora cultura, conjunto mecanizado e método de avaliação sejam diferentes dos utilizados aqui, o estudo reforça a ligação entre qualidade do posicionamento e paralelismo.

D'Antonio *et al.* (2023), em um experimento de controle de plantas daninhas em trigo, encontraram redução de 88,9% da área sobreposta ao comparar direção automática e manual. O percentual é maior que os 60,44% desta amostra, mas a diferença não é inesperada: operação, geometria dos talhões, equipamento, largura de trabalho, método de medição e qualidade da correção podem alterar bastante o resultado. O ponto comum entre os estudos é a direção do efeito, com menor sobreposição quando a trajetória é controlada com maior regularidade.

O contexto regional também ajuda a compreender a presença da tecnologia na amostra. No sudoeste de Goiás, Soares Filho e Cunha (2015) encontraram piloto automático em 68,18% dos produtores entrevistados que já utilizavam agricultura de precisão. O dado não serve para estimar a frequência de uso em todo o estado, mas confirma que o recurso já estava inserido em uma importante região produtora goiana.

6.2. Consumo de combustível e eficiência operacional

O consumo de combustível caiu, em média, 6,99%, de 14,78 para 13,75 L/ha. Como as diferenças não seguiram distribuição compatível com a normalidade, empregou-se o teste de Wilcoxon, que indicou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,001$). A mediana passou de 14,90 para 13,90 L/ha, e a correlação bisserial de postos foi 1,00 porque os 11 registros mudaram na mesma direção.

A magnitude se aproxima dos valores relatados por Bora, Nowatzki e Roberts (2012) em propriedades de Dakota do Norte. No levantamento, sistemas de orientação por GPS estiveram associados a economia média de 6,32% de combustível, e sistemas de autoguiamento, a 5,33%. Os métodos e as operações não são os mesmos, mas a proximidade dos percentuais mostra que a economia média de 6,99% observada aqui está dentro de uma ordem de grandeza já relatada para tecnologias de orientação.

Em condições experimentais de campo, D'Antonio *et al.* (2023) encontraram redução de 11,5% no combustível, acompanhada de queda de 28% no tempo total e de 88,9% na área sobreposta. O ganho foi maior que o desta amostra, o que reforça a ideia de que não existe um percentual fixo de economia: a resposta depende da operação e de como a melhora da trajetória se combina com as demais condições do trabalho mecanizado.

Há também resultados em sentido diferente. Ashworth *et al.* (2022), ao estudar cenários de manejo de pastagens, observaram menos falhas e sobreposições, mas maior consumo de combustível em algumas situações. Produtividade, configuração do sistema, tipo de aplicação e condições operacionais influenciaram o balanço. Por isso, a queda registrada neste TCC deve ser interpretada como característica dos casos analisados, e não como economia garantida para qualquer propriedade que adote piloto automático.

A redução em L/ha sugere menor custo variável, mas não permite calcular retorno financeiro. Para chegar a valores em reais, ROI ou prazo de retorno, seria necessário conhecer preço do combustível, área efetivamente trabalhada, frequência anual das operações, custo de aquisição e despesas de manutenção. Ashworth *et al.* (2018) mostram que os efeitos econômicos da orientação de tratores dependem de cultura, escala, equipamento e intensidade de uso dos insumos. Por esse motivo, o consumo foi mantido aqui como indicador de eficiência e de possível efeito econômico, sem extrapolação monetária.

6.3. Relação entre redução da sobreposição e economia de combustível

A redução percentual da sobreposição se correlacionou positivamente com a economia percentual de combustível ($r = 0,759$; $p = 0,0067$). O modelo linear apresentou $R^2 = 0,577$, indicando que as duas medidas variaram de forma relacionada dentro da amostra. O coeficiente angular foi 0,1284: nos registros analisados, reduções maiores de sobreposição tenderam a acompanhar economias percentuais maiores de combustível.

Há uma explicação operacional plausível para esse comportamento. Quando diminui a sobreposição, também diminui a repetição de trajetos sobre áreas já trabalhadas, o que pode melhorar o aproveitamento da largura efetiva. Bora, Nowatzki e Roberts (2012) relacionam economia de combustível e de tempo à redução de passadas redundantes. Ashworth *et al.* (2018) apontam, de forma semelhante, que parte do ganho de eficiência do direcionamento decorre de maior cobertura efetiva e menor ocorrência de falhas ou sobreposições.

Isso não significa que a redução da sobreposição tenha causado 57,7% da economia de combustível. O estudo é observacional, inclui apenas 11 casos e não controla fatores como potência do trator, implemento, velocidade, relevo, formato do talhão, experiência do operador ou condições do solo. A própria literatura mostra

que o combustível pode responder de forma diferente mesmo quando a sobreposição diminui (Ashworth *et al.*, 2022). O R^2 , portanto, descreve a associação linear observada nesta amostra e não deve ser lido como medida de causalidade.

6.4. Interpretação estatística dos resultados

Os testes confirmaram que as diferenças antes-depois foram consistentes nos 11 casos. Para a sobreposição, obteve-se $t(10) = 23,06$, $p < 0,001$ e $d_z = 6,95$; para o combustível, $W = 0$ e $p < 0,001$. O tamanho de efeito muito alto na sobreposição expressa a grande diferença em relação à variabilidade dos pares, mas sua interpretação deve considerar o tamanho e a forma de seleção da amostra (Cohen, 1988).

Esse cuidado é importante porque a amostra de 11 registros não resultou de seleção aleatória de propriedades goianas. Ela foi formada por conveniência e disponibilidade de dados. A significância estatística, portanto, mostra a consistência das diferenças dentro desse conjunto; não transforma o estudo em experimento controlado nem garante que a mesma magnitude seja encontrada na população do estado.

O pareamento foi necessário porque os valores antes e depois pertenciam às mesmas unidades de análise. A normalidade foi avaliada nas diferenças entre os pares e orientou a escolha entre o teste t e o Wilcoxon, procedimento compatível com a recomendação de avaliar a distribuição da variável que efetivamente entra no teste (Miot, 2017). Assim, cada indicador recebeu o teste adequado à estrutura observada, em vez de se aplicar uma única técnica de forma automática.

6.5. Limitações do estudo e implicações para pesquisas futuras

A limitação mais importante está na origem heterogênea dos dados. As informações vieram de contatos com produtores, atendimentos em campo, conversas por aplicativo, fotografias e documentos, sem um instrumento único aplicado a todos os casos. A análise restrita a variáveis com definição operacional clara e unidade comparável reduz parte desse problema, mas não elimina as limitações próprias de uma coleta não padronizada.

O número final de casos também limita comparações entre regiões e culturas. Alguns estratos ficaram com apenas uma ou duas observações, razão pela qual ANOVA e comparações múltiplas previstas no projeto não foram executadas.

Também não foi possível comparar tecnologias de correção, pois todos os registros mantidos traziam a mesma categoria de sinal, RTP. O tempo operacional, por sua vez, foi retirado porque a unidade de referência das horas não pôde ser estabelecida de modo uniforme.

A ausência de grupo controle independente e de padronização das operações antes e depois impõe outra restrição. Mudanças de máquina, implemento, operador, condições de campo ou manejo podem ter contribuído para parte das diferenças. O desenho adotado permite identificar uma associação temporal entre a adoção do piloto automático e os indicadores, mas não separar causalmente o efeito do sistema de todos os demais fatores.

Uma pesquisa futura poderia partir de um protocolo de coleta definido previamente e registrar, para cada operação, máquina, implemento, velocidade, largura de trabalho, tipo de correção GNSS, área trabalhada e arquivos de telemetria. Com mais casos, seria possível comparar regiões, culturas e sistemas de correção. A inclusão de preço do combustível e custos de aquisição e manutenção também permitiria avançar de um indicador físico de economia para uma análise econômica completa. Idealmente, as mesmas propriedades seriam acompanhadas de forma prospectiva e, quando viável, haveria comparação controlada entre direcionamento manual e automático.

6.6. Síntese da discussão

Apesar dessas limitações, os resultados seguem a mesma direção de parte importante da literatura. A redução média de 60,44% da sobreposição é compatível com a melhora de paralelismo descrita em estudos de direcionamento automático, e a economia média de 6,99% de combustível está na ordem de grandeza observada em levantamentos e experimentos, embora existam cenários sem economia de combustível (Bora; Nowatzki; Roberts, 2012; D'Antonio *et al.*, 2023; Ashworth *et al.*, 2022). A associação positiva entre os indicadores também é coerente com o mecanismo operacional de redução de passadas redundantes.

No conjunto dos 11 casos, portanto, o ganho mais claro foi a redução da sobreposição; a queda do consumo de combustível apareceu como resultado adicional. Essa interpretação deve permanecer restrita à amostra, sem generalização automática para todas as propriedades de Goiás e sem converter a economia de combustível em retorno financeiro que não foi mensurado.

7. CONCLUSÃO

O estudo avaliou o uso do piloto automático agrícola em 11 propriedades rurais de diferentes regiões de Goiás a partir de dois indicadores: sobreposição entre passadas e consumo de combustível por hectare. A análise foi limitada às variáveis que mantinham definição e unidade comparáveis, o que permitiu manter coerência entre objetivos, método e resultados.

A mudança mais expressiva ocorreu na sobreposição. A média caiu de 7,38% para 2,90%, o que correspondeu a redução média de 60,44%. O teste pareado confirmou diferença estatisticamente significativa, $t(10) = 23,06$ e $p < 0,001$. Nos casos estudados, o direcionamento automático esteve associado a passadas mais regulares e menor repetição de área trabalhada.

O consumo de combustível também diminuiu: a média passou de 14,78 para 13,75 L/ha, com economia média de 6,99%. Como as diferenças dessa variável não foram compatíveis com a normalidade, empregou-se o teste de Wilcoxon, que igualmente apontou diferença significativa ($W = 0$; $p < 0,001$). O resultado indica associação entre o período posterior à adoção do piloto e menor consumo por área, mas não permite calcular retorno financeiro, pois custos de investimento, manutenção e preço do combustível não foram medidos.

A análise exploratória mostrou ainda correlação positiva entre redução percentual da sobreposição e economia percentual de combustível ($r = 0,759$; $p = 0,0067$). O modelo linear apresentou $R^2 = 0,577$. Em outras palavras, os dois indicadores variaram de forma relacionada dentro da amostra, sem que isso autorize afirmar que a redução da sobreposição, isoladamente, causou a economia de combustível. O delineamento observacional, o número de casos e a ausência de controle de condições operacionais impedem essa inferência causal.

A hipótese foi, portanto, sustentada no âmbito dos registros analisados: após a adoção do piloto automático, houve redução tanto da sobreposição quanto do consumo de combustível, e os casos com maior redução de sobreposição tenderam a apresentar maior economia percentual de combustível. Os objetivos da versão final foram atendidos pela caracterização da amostra, pela comparação antes-depois e pela análise exploratória da relação entre os indicadores. Não foi possível, entretanto, testar diferenças entre regiões ou culturas nem avaliar tempo operacional, falhas, economia de sementes, fertilizantes e defensivos, percepção

dos produtores ou retorno sobre investimento, porque essas variáveis não tinham dados suficientes e comparáveis.

Com os limites apresentados, o piloto automático mostrou potencial para melhorar a eficiência das operações representadas nesta amostra, principalmente pela redução da sobreposição e, em segundo plano, pelo menor consumo de combustível por hectare. O resultado não deve ser generalizado para todas as propriedades de Goiás. Uma base maior, coletada de forma prospectiva e padronizada, com registro das condições operacionais e de custos, permitiria testar a robustez dos achados e avançar para comparações entre tecnologias de correção e para uma avaliação econômica da adoção do sistema.

REFERÊNCIAS

ASHWORTH, A. J.; LINDSAY, K. R.; POPP, M. P.; OWENS, P. R. Economic and environmental impact assessment of tractor guidance technology. **Agricultural & Environmental Letters**, v. 3, n. 1, e180038, 2018. DOI: 10.2134/ael2018.07.0038. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/ael2018.07.0038>. Acesso em: 24 ago. 2026.

ASHWORTH, A. J.; PUTMAN, W. B.; KHAREL, T.; THOMA, G.; SHEW, A.; POPP, M.; OWENS, P. R. Environmental impact assessment of tractor guidance systems based on pasture management scenarios. **Journal of the ASABE**, v. 65, n. 3, p. 645-653, 2022. DOI: 10.13031/ja.14930. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/ja.14930>. Acesso em: 24 ago. 2026.

BATTE, M. T.; EHSANI, M. R. The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 53, n. 1, p. 28-44, 2006. DOI: 10.1016/j.compag.2006.03.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.03.004>. Acesso em: 24 ago. 2026.

BORA, G. C.; NOWATZKI, J. F.; ROBERTS, D. C. Energy savings by adopting precision agriculture in rural USA. **Energy, Sustainability and Society**, v. 2, art. 22, 2012. DOI: 10.1186/2192-0567-2-22. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/21920567-2-22>. Acesso em: 24 ago. 2026.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2. ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

D'ANTONIO, P.; MEHMETI, A.; TOSCANO, F.; FIORENTINO, C. Operating performance of manual, semi-automatic, and automatic tractor guidance systems for precision farming. **Research in Agricultural Engineering**, v. 69, n. 4, p. 179-188, 2023. DOI: 10.17221/5/2023-RAE. Disponível em: <https://doi.org/10.17221/5/2023RAE>. Acesso em: 24 ago. 2026.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. Barueri, SP: Atlas, 2022.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. de C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y.

(ed.). **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21-33. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1003476>. Acesso em: 24 ago. 2026.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MIOT, H. A. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. **Jornal Vascular Brasileiro**, v. 16, n. 2, p. 88-91, 2017. DOI: 10.1590/1677-5449.041117. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/16775449.041117>. Acesso em: 25 ago. 2026.

SANTOS, A. F. dos; SILVA, R. P. da; TAVARES, T. O.; ORMOND, A. T. S.; ROSALEN, D. L.; ASSIS, L. C. de. Parallelism error in peanut sowing operation with auto-steer guidance. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 10, p. 731-736, 2017. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n10p731-736. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n10p731-736>. Acesso em: 24 ago. 2026.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL (SENAR). **Agricultura de precisão**: conceitos. Brasília, DF: SENAR, 2019. 28 p. (Coleção SENAR, 244). Disponível em: https://ead.senar.org.br/storage/senar-play/agricultura-de-precisaoco Conceitos/244_AP_Agricultura-de-precisao-para-todos_200313_154142_2022-0603-142929_xhzq.pdf. Acesso em: 24 ago. 2026.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. da. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás - Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 4, p. 689-698, 2015. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p689-698/2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430Eng.Agric.v35n4p689-698/2015>. Acesso em: 24 ago. 2026.

TOPCUERI, M.; KESKIN, M. Effectiveness of GNSS-based tractor auto steering systems in crop spraying. **Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi**, v. 24, p. 78-90, 2019. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/mkutbd/article/654769>. Acesso em: 24 ago. 2026.

ZERBATO, C.; FURLANI, C. E. A.; OLIVEIRA, M. F. de; VOLTARELLI, M. A.; TAVARES, T. de O.; CARNEIRO, F. M. Quality of mechanical peanut sowing and digging using autopilot. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 8, p. 630-637, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p630-637. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n8p630-637>. Acesso em: 24 ago. 2026.