

AVALIAÇÃO DOS ERROS DE PARALELISMO DE UM CONJUNTO COLHEDORA E TRATOR-TRANSBORDO DE CANA DE AÇÚCAR

JOSÉ V. SALVI¹, JOSÉ P. MOLIN², RUI D. CASARIN JÚNIOR³, GUILHERME N. DOS SANTOS⁴, MARK SPEKKEN⁵

¹ Eng. Agrônomo, Professor Associado, Fatec “Shunji Nishimura”, Pompeia - SP, josevitorsalvi@gmail.com

² Eng. Agrícola, Professor Associado, Depto. Engenharia de Biosistemas, ESALQ/USP, Piracicaba - SP, jpmolin@usp.br

³ Tecnólogo, Fatec “Shunji Nishimura”, Pompeia - SP

⁴ Graduando em Tec. Mecanização em Agricultura de Precisão, Fatec “Shunji Nishimura”, Pompeia - SP

⁵ Eng. Agrônomo, Msc, Pós-Graduando, ESALQ/USP, Piracicaba, SP.

Apresentado no
Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão - ConBAP 2014
14 a 17 de setembro de 2014 - São Pedro - SP, Brasil

RESUMO: O uso de sistema de direção automática na colheita de cana-de-açúcar para o controle de tráfego no canavial é crescente, assim como a necessidade de se conhecer efetivamente a qualidade do seu desempenho. Com isso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o paralelismo da direção automática em trajetos curvos realizados por uma colhedora com atuador hidráulico e sinal de correção diferencial via rádio (RTK) e trator-transbordo direcionados automaticamente por atuador elétrico na coluna de direção e sinal de correção diferencial via satélite (RTX®). Os erros de paralelismo foram avaliados pela diferença em metros da distância ortogonal entre os pontos formados pelas coordenadas métricas do mapeamento do plantio com pontos formados pelas coordenadas métricas do trajeto realizadas pela colheita, por meio de um algoritmo automatizado, e seus resultados analisados por estatística descritiva e comparativa pelo teste de Tukey a 5% de significância. Verificou-se nestas condições que na colhedora os erros foram significativamente inferiores ao direcionamento manual e o caso dos tratores-transbordos, erros foram inferiores a 0,1 m e diferentes significadamente em relação ao direcionamento manual.

PALAVRAS-CHAVE: colheita, RTK, RTX, controle de tráfego

PARALLELISM ERROS EVALUATION ON SUGAR CANE HARVESTER AND TRACTOR-HAULOUT

ABSTRACT: The use of automatic steering system to harvest sugar cane for the traffic control in the fields is increasing, as is the need to effectively evaluate its quality performance. Thus, the aim of this study was to evaluate the parallelism of the machine direction in curved paths made by a harvester with hydraulic actuator and differential correction signal via radio (RTK) and tractor-haulout automatically driven by electric actuator on the steering wheel and satellite differential correction (RTX ®) signal. The parallelism errors were evaluated by the orthogonal distance difference in meters between the points formed by the coordinates of the planting points and the coordinates of the harvesting path points using an automated algorithm and the results were analyzed by basic statistics and comparative test by Tukey at 5% significance. It was found that in the experimental conditions and for the harvester, errors were significantly lower on the auto steering than on

the manual steering and the case of tractors with haulout, errors were less than 0.1 m and significantly different to the manual steering.

KEYWORDS: harvest, RTK, RTX, traffic control

INTRODUÇÃO

A colheita mecanizada de cana-de-açúcar exige o tráfego controlado do conjunto colhedora e trator-transbordo, pois caso isso não ocorra nas entre linhas, o tráfego dos rodados sobre a cultura irá causar dano mecânico na soqueira de cana, podendo acarretar em aumento da compactação do solo e queda de produtividade, acarretando prejuízos.

Uma das maneiras de se obter o paralelismo é com o uso de sistemas de direcionamento automático de máquinas agrícolas por sinal GNSS. As usinas estão utilizando equipamentos de direção automática de atuador hidráulico com sinais de correção diferencial via rádio de alta acurácia (erros inferiores a 0,025m) nas colhedoras. No caso dos tratores, o uso de sistemas de direção automática está em fase inicial de implantação com opção de utilizar atuadores elétricos na coluna de direção com sinal diferencial via satélite de alta acurácia (erros inferiores a 0,05m).

Com o uso de sistemas de direção automática, surgiram os primeiros trabalhos de avaliação da acurácia do paralelismo dos trajetos realizados em operações mecanizadas. Molin et al. (2011) desenvolveram uma metodologia de cálculo dos erros de paralelismo e Baio (2012) demonstrou que com a utilização de direção automática de atuador hidráulico com sinais de correção diferencial via rádio de alta acurácia na colhedora de cana em operação durante o dia e à noite, foi possível aumentar a qualidade dos percursos em relação ao direcionamento manual.

O trabalho realizado na Espanha de Carballido et al. (2014) tinha o intuito de observar o comportamento de um trator autônomo em percursos retilíneos comparando o uso de sinais GNSS de alta acurácia com correção diferencial via rádio e com correção diferencial via satélite. Verificou-se que os erros não foram superiores a 0,04m com o uso de correção diferencial via rádio e no caso de correção via satélite, os erros não foram superiores a 0,10m.

Não foram encontrados trabalhos com o uso de direção automática com atuadores elétricos e com sinal diferencial via satélite de alta acurácia em tratores para cana.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o paralelismo em trajetos curvos realizados por uma colhedora e um trator-transbordo de cana-de-açúcar, direcionados automaticamente por atuadores hidráulicos e elétricos e por sinais de correção diferencial de alta acurácia via rádio (RTK) e via satélite (RTX®).

MATERIAL E MÉTODOS

Para a avaliação utilizou-se uma colhedora marca John Deere® modelo 3522 com direção automática de atuador hidráulico marca Trimble® e dois tratores marca Valtra® modelo BH 180 com direção automática de atuador elétrico de coluna de direção marca Trimble®.

Os mesmos operadores foram utilizados nas avaliações, nas quais foram utilizados sinais GNSS com correção diferencial via rádio (RTK) e de correção diferencial via satélite RTX®, da marca Trimble. O provedor dos sinais indica que a exatidão do sinal RTK é de 0,025m e do RTX de 0,038m, analisados em 95% das observações.

O experimento foi instalado em um canavial da região de São Carlos, SP, dividido em três tratamentos (T): T1: colhedora e transbordos direcionados manualmente (2,85 ha); T2: colhedora com direção automática e sinal RTK e transbordos direcionados manualmente (2,67

ha); T3: colhedora com direção automática e sinal RTK e transbordos com direção automática e sinal RTX (3,02 ha).

O canavial dos tratamentos apresentava trajetos curvos e porte acamado. Cada tratamento possuía dez pares de fileiras com espaçamento combinado de 0,9 por 1,5m, sendo que para a avaliação dos erros de paralelismo, cada par de fileiras colhida era constituída uma repetição, totalizando dez repetições por tratamento.

Para a avaliação do paralelismo das máquinas da colheita foram utilizadas as linhas georreferenciadas do mapeamento de plantio que serviram de referência para o direcionamento automático.

Durante a operação de colheita, as máquinas registraram o percurso por meio de áreas georreferenciadas delimitadas pela largura de trabalho e velocidade de colheita. No caso das máquinas com o direcionamento manual, o computador de bordo do equipamento estava ligado, porém com a tela desativada, servindo apenas para o registro dos dados. As máquinas estavam com velocidade média de $4,0 \text{ km h}^{-1}$ e a coleta de dados do computador de bordo estava programada para um ponto por segundo.

As avaliações foram realizadas entre outubro e novembro de 2013 e durante a coleta dos dados os níveis de cintilação ionosférica, campo magnético e número de satélites estavam considerados adequados para a avaliação.

Os erros de paralelismo foram avaliados pela diferença em metros da distância ortogonal entre os pontos formados pelas coordenadas métricas do mapeamento do plantio com pontos formados pelas coordenadas métricas da área do trajeto realizada pela colheita, por meio de um algoritmo automatizado desenvolvido em ambiente Pascal proposto por Spekken et al. (2014). Como foram utilizadas as linhas do mapeamento do plantio como referência para a colheita, para esta avaliação não foram considerados os possíveis erros de paralelismo na obtenção dos dados de mapeamento.

Os erros de paralelismo calculados pelo modelo foram submetidos à análise de estatística descritiva e comparativa pelo teste de Tukey a 5% de diferença significativa, calculado pelo software R, versão 3.1.0 (R Development Core Team, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra os histogramas dos erros de paralelismo da colhedora e do transbordo. Verifica-se que na colhedora, os tratamentos que utilizam direção automática com sinal RTK, em torno de 80% dos dados de erros de paralelismo analisados apresentaram valores de até 0,04m, enquanto que no direcionamento manual, esta frequência é reduzida para 19%. No caso dos tratores equipados com direção elétrica e sinal RTX apresentaram 65% dos dados analisados com erros de até 0,08 m enquanto que as máquinas com direcionamento manual, esta frequência estava em torno de 20%.

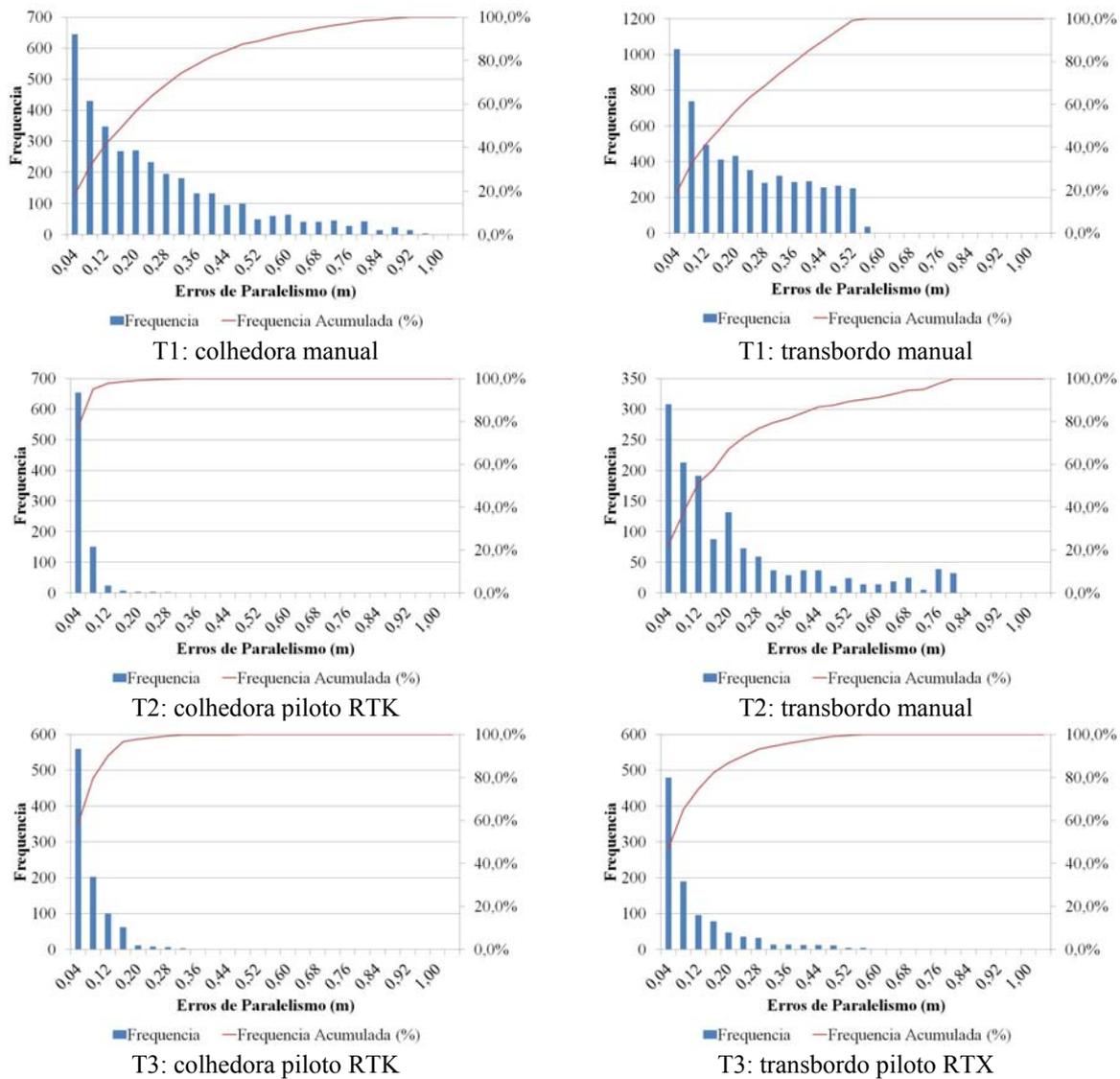


Figura 1. Histograma dos erros de paralelismo da colhedora e dos transbordos para os tratamentos em estudo em colheita durante o dia, com trajeto retilíneo e porte acamado.

Observa-se pela Tabela 1 que na colhedora, os tratamentos que utilizam direção automática com sinal RTK obtiveram médias de erros inferiores a 0,05 m, enquanto que no direcionamento manual a média ficou em torno de 0,22 m, diferentes entre si a 5% de significância. Os valores de coeficiente de variação encontram-se elevados, porém compatíveis ao que comumente se encontra em experimentos que exploram esta variável.

Os valores dos erros de paralelismo da colhedora com direção automática e sinal RTK são próximos aos valores encontrados por Baio (2012), que correspondiam a 0,039m.

Tabela 1. Estatística descritiva dos erros de paralelismo da colhedora para os tratamentos em estudo

Erros Paralelismo	Trajeto Curva Porte Acamado Colhedora		
	T1 - Manual	T2 - RTK	T3 - RTK
Área Tratamento (ha)	2,85	2,67	3,02
Quantidade de Pontos	3459	847	958
Erro Médio (m)	0,2245 A	0,0287 B	0,0490 B
Erro Mínimo (m)	0,0000	0,0000	0,0000
Erro Máximo (m)	0,9449	0,8664	0,5568
σ (m)	0,2074	0,0436	0,0550
2σ (m)	0,4147	0,0872	0,1100
CV (%)	92,38	151,86	112,11

CV: Coeficiente de Variação; σ (m): Desvio padrão do erro de paralelismo; 2σ : duas vezes o desvio padrão do erro de paralelismo; Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Para o trator-transbordo, Tabela 2, as máquinas que possuíam direção automática de atuador elétrico e sinal RTX apresentaram média de 0,087 m, enquanto que no direcionamento manual dos tratores a média foi próxima de 0,19 m, diferentes entre si a 5% de significância. Os valores de coeficiente de variação para o trator encontram-se elevados, assim como ocorreu na colhedora. Não há dados bibliográficos de erros observados para tratores tracionando transbordo com direção elétrica e sinal RTX.

Por meio desses resultados, sugere-se para estudos futuros realizar a avaliação do impacto do desalinhamento do transbordo em relação ao trator, pois o transbordo está sendo tracionado pelo trator pela barra de tração e em algumas situações, pode ocorrer o desalinhamento do trator em relação ao transbordo, especialmente em percursos curvos e em terrenos inclinados transversalmente ao percurso.

Tabela 2. Estatística descritiva dos erros de paralelismo do trator-transbordo para os tratamentos em estudo

Erros Paralelismo	Trajeto Curva Porte Acamado Trator-Transbordo		
	T1 - Manual	T2 - Manual	T3 - RTX
Área Tratamento (ha)	2,85	2,67	3,82
Quantidade de Pontos	5445	1387	1027
Erro Médio (m)	0,1975 A	0,1955 A	0,0872 B
Erro Mínimo (m)	0,0000	0,0000	0,0000
Erro Máximo (m)	0,5262	0,7969	0,5484
σ (m)	0,1559	0,2069	0,1078
2σ (m)	0,3119	0,4137	0,1744
CV (%)	78,95	105,80	123,63

CV: Coeficiente de Variação; σ (m): Desvio padrão do erro de paralelismo; 2σ : duas vezes o desvio padrão do erro de paralelismo; Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.

CONCLUSÕES

Nestas condições, na colhedora com direção automática, atuador hidráulico e sinal RTK, os erros foram significadamente inferiores ao direcionamento manual. Foi possível verificar também que o uso de direção automática na colhedora proporcionou menor dispersão dos dados em relação às médias, em comparação com o direcionamento manual. No caso dos tratores-transbordos com direção de atuador elétrico na coluna de direção e sinal RTX, estes apresentaram erros inferiores a 0,1 m e diferentes significadamente em relação ao direcionamento manual, além de apresentar menor dispersão dos dados em relação à media.

REFERÊNCIAS

BAIO, F. H. R. **Evaluation of an auto-guidance system operating on a sugar cane.** Precision Agriculture, v.13, p.141-147, 2012

CARBALLIDO, J.; PEREZ-RUIZ, M., EMMI, L., AGUERA, J. **Comparison of positional accuracy between RTK and RTX GNSS based on the autonomous agricultural vehicles under field conditions.** Applied Engineering in Agriculture, v.30, n.3,p.361-366, 2014

MOLIN, J. P.; POVH, F. P.; DE PAULA, V. R.; SALVI, J. V. **Método de avaliação de equipamentos para direcionamento de veículos agrícolas e efeito de sinais de GNSS.** Engenharia Agrícola, v.31, n.1, p.121-129, 2011

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. 2014.

SPEKKEN, M., SALVI, J.V., MOLIN, J.P. **A method to evaluate parallelism from machine logged positions.** In: II International Conference on Robotics an Associated High-Technologies and Equipment for Agriculture and Forestry. Proceedings... Madrid, 2014.