Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Erros de percurso em carretas de transbordo de cana-de-açúcar

Bruna Pessoa Passalaqua

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Bruna Pessoa Passalaqua
Tecnóloga em Mecanização em Agricultura de Precisão

Erros de percurso em carretas de transbordo de cana-de-açúcar
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Passalaqua, Bruna Pessoa

Erros de percurso em carretas de transbordo de cana-de-açúcar / Bruna Pessoa Passalaqua. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011 - - Piracicaba, 2018.

72 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Desvios laterais 2. GNSS 3. Direcionamento automático 4. Controle de tráfego I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Célia e Edson, por todo o amor, pelo incentivo para eu me atrever, pela persistência para não desistir, pelo companheirismo e apoio para eu continuar e pela confiança depositada em mim todos esses anos.

Aos meus avós Salvador e Odila, Antônio e Iraci (in memoriam) pelo exemplo de humildade, coragem e determinação.

AGRADECIMENTOS

A **Deus** primeiramente, por me guiar pelos melhores caminhos, mesmo esses não sendo os mais fáceis. Por me manter sensata em todas as decisões e por me apresentar com pessoas tão especiais.

À **Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP)**, pela oportunidade de realizar o curso de mestrado contribuindo para minha formação acadêmica e profissional.

À **Faculdade de Tecnologia "Shunji Nishimura" - FATEC Pompeia**, pela formação acadêmica e por me auxiliar na continuação dos meus estudos.

À **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES** pela bolsa de estudos concedida para a realização do mestrado.

Ao meu orientador, professor **Dr. José Paulo Molin**, por todos os ensinamentos, pela infinita paciência, por me fazer acreditar que era capaz, pelo constante incentivo e pelo exemplo de dedicação e profissionalismo.

À Usina NovAmérica, em especial ao **Alexandre Carreira** e ao **Gustavo Palla**, pela amizade, atenção e pela estrutura oferecida para realização dos experimentos.

Ao querido amigo e professor **Jose Vitor Salvi**, pela confiança, atenção, por me incentivar e me dar amparo em todos os momentos, e principalmente pela amizade e companheirismo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, em especial ao **Áureo** e ao **Chicão**, pelas risadas e apoio durante o mestrado.

Aos meus amigos de pós-graduação: **Cassio Duarte (Trimble)**, **Leonardo Maldaner (Tchê)**, **Tatiana Canata**, **André Colaço (Napa)** e **Luis Gustavo Mendes (Guia)**, pelos momentos que dividimos juntos e por tudo que pude aprender com vocês. Muito obrigada por tudo.

Ao amigo **Rodrigo Trevisan**, pelo apoio e incentivo para sempre buscar pelo meu melhor, além de ser um exemplo de dedicação e comprometimento.

Ao amigo **Mateus Tonini Eitelwein (Teló)**, pela amizade, companheirismo, pelos momentos incríveis e por me fazer acreditar no meu potencial.

Ao amigo **Felipe Uemura (Sapo)**, por todos os anos de amizade, pelos constantes incentivos e imensurável paciência, por mostrar que distância não separa e sim nos aproxima e por sempre se manter presente.

Às minhas amigas de infância **Bárbara Maluf**, **Julia Cantarella**, **Juliana Guimarães**, **Mariana Pereira** e **Maria Ruth Deliberador**, por me incentivarem durante todos esses anos e por sempre estarem presentes mesmo com toda a distância. Agradeço por essa amizade e amo cada uma de vocês.

Às amigas **Maria Júlia Rosa**, **Jéssica Pádua** e **Tainá Shimura Macedo** pelo amparo, paciência e por me incentivarem a seguir em frente mesmo nos momentos mais difíceis. Amo cada uma de vocês.

Aos meus queridos tios **Cássia** e **Rui Passalacqua** por todo amor, confiança e certeza de que eu venceria mais essa etapa da minha vida.

E a todos, que de alguma forma, contribuíram para a execução deste trabalho.

EPÍGRAFE

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita”

Mahatma Gandhi

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. A IMPORTÂNCIA DA CANA-DE-AÇÚCAR	15
2.2. SISTEMA DE PRODUÇÃO E COLHEITA	15
2.3. MECANIZAÇÃO E CONTROLE DE TRÁFEGO	18
2.4. GNSS E SISTEMAS DE DIREÇÃO AUTOMÁTICA	20
2.5. AVALIAÇÃO DOS ERROS DE PARALELISMO	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	27
3.2. CARACTERIZAÇÃO DO CONJUNTO.....	29
3.3. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS	31
3.4. ANÁLISE DOS DADOS	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1. LINHAS DE PERCURSO.....	39
4.2. IMPACTO DO RELEVO NO DIRECIONAMENTO MANUAL EM FUNÇÃO DOS TIPOS DE PERCURSO	39
4.3. COMPARATIVO DO DIRECIONAMENTO AUTOMÁTICO EM RELAÇÃO AO MANUAL EM RELEVO PLANO.....	45
4.4. COMPARATIVO DO DIRECIONAMENTO AUTOMÁTICO EM RELAÇÃO AO MANUAL EM RELEVO INCLINADO	52
5. CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICES.....	71

RESUMO

Erros de percurso em carretas de transbordo de cana-de-açúcar

O sistema de produção canavieiro é dependente da sequência de cortes e rebrota das plantas de cana-de-açúcar. O tráfego sobre a soqueira deve ser evitado para garantir a integridade fisiológica da rebrota e possibilitar a obtenção de elevada produtividade. Essa necessidade de exatidão no tráfego de máquinas canavieiras impulsionou a adoção de sistemas de direcionamento automático para a otimização do tráfego dos conjuntos mecanizados nas lavouras, especialmente em colhedoras. No entanto, os conjuntos de tratores e carretas de transbordo apresentam o risco de desvios do tráfego ideal e trafegam sobre o terreno em igual intensidade ao das colhedoras, porém comumente sem sistemas de direcionamento automático ou com sistemas simplificados. Além disso, as carretas sofrem desvios em percursos curvos e em terrenos inclinados, o que frequentemente ocorre nas áreas produtoras. O desempenho dos sistemas de direcionamento automático está frequentemente associado aos erros transversais à trajetória, os quais devem estar abaixo de 0,1 m para evitar danos às soqueiras. Deste modo, este trabalho objetivou quantificar os desvios a que os tratores e carretas de transbordo estão submetidos sob diferentes tipos de percursos em terrenos planos e inclinados. Utilizou-se do sistema de transporte interno composto por um trator e duas carretas de transbordo com três eixos, sendo todos equipados com receptores GNSS e sistema de correção tipo RTK para a obtenção de suas respectivas posições. Os erros entre as passadas foram avaliados pela diferença da distância ortogonal entre os pontos de posição das antenas, no centro do trator e no centro do último eixo de cada carreta, em relação à linha referência. Os resultados obtidos mostraram que, quando analisado o impacto do relevo no direcionamento manual em função dos tipos de percurso, os maiores desvios ocorreram em terreno inclinado e, nesse caso, os erros são maiores em percursos curvos, pois as carretas de transbordo têm a tendência de diminuir o raio de curvatura. Observando os valores de desalinhamento em áreas de pequena inclinação, com ambos os direcionamentos, constatou-se que o sistema de direcionamento automático auxilia para minimizar os erros de desalinhamento no último transbordo. No entanto, quando o direcionamento passa a ser manual, esses erros aumentam em até cinco vezes acima do aceito. À medida que os desalinhamentos são relacionados às inclinações laterais, seus valores crescem sensivelmente, mesmo utilizando sistema de direcionamento automático. Sugere-se a adaptação e avaliação do desempenho de sistemas com atuadores nos rodados ou no cabeçalho dos transbordos e a utilização de transbordos montados em chassi de caminhão. Conclui-se que a metodologia desenvolvida foi eficiente para quantificar os erros de percursos do conjunto trator-transbordo de cana-de-açúcar e que a inclinação do terreno, mesmo com variações sutis, exerce forte influência para o desalinhamento do conjunto.

Palavras-chave: Desvios laterais; GNSS; Direcionamento automático; Controle de tráfego

ABSTRACT

Path error in sugarcane transshipment trailers

Sugarcane production system is dependent on the sequence of cuts and regrowth of sugarcane plants. The traffic on the ratoon should be avoided to ensure physiological integrity of the regrowth and enable high productivity. This need for accuracy in traffic of sugarcane machines boosted the adoption of automatic guidance systems for mechanized sets in crops, especially harvesters. However, tractors with transshipment trailers usually present the risk of deviation from the ideal path, since they rarely employ automatic steering systems, or use simplified ones, and travel on the ground at the same intensity as that of the harvesters. In addition, trailers are subject to deviations in curved paths and sloping terrain, which often occurs in producing areas. The performance of automatic steering systems is often associated with traverse errors, which should be less than 0.1m in order to avoid damage to the ratoon. Thus, this study aims to quantify deviations to which tractors and transshipment trailers are submitted under different paths on flat and inclined terrain. The transport system used in this study is composed of a tractor and two transshipment trailers with three axes, all of which are equipped with GNSS receivers and a RTK type correction system to obtain their respective positions. The errors between the passes were evaluated by the difference in the orthogonal distance between the antenna position points at the center of the tractor and at the center of the last axis of each truck, relative to the reference line. The obtained results showed that, when analyzing the impact of the relief on the manual steering according to the types of route, the greater deviations occurred in inclined terrain and, in this case, the errors are larger in curved routes, since the transshipment trailers tend to decrease the radius of curvature. Observing the values of misalignment in areas of small inclination, in both directions, it was verified that the automatic steering system helps to minimize misalignment errors of the last transshipment in the correct route. However, when steering becomes manual, these errors increase by up to five times what is accepted. As the misalignments are related to the lateral slopes, the values of misalignments increase significantly, even using an automatic steering system. Adaptations and evaluation of performance of systems with actuators in the wheels or in the heading of the transshipment and the use of transshipment mounted in truck are suggested. It is concluded that the developed methodology was efficient to quantify the errors of trajectories of the tractor-transshipment set of sugarcane and the inclination of the terrain, even with subtle variations, exerts a strong influence for the misalignment of the set.

Keywords: Lateral deviation; GNSS; Automatic steering; Controlled traffic

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Épocas das operações agrícolas para cana-de-açúcar para a região Centro-Sul.	16
Figura 2. Exemplo de modelos de transbordos existentes no mercado (a) dois eixos; (b) três eixos, conhecidos como tridem; e (c) quatro eixos, com capacidade para 22 toneladas.	18
Figura 3. Elementos de uma mensuração de erro transversal (XTE).	25
Figura 4. Fluxograma das variáveis estudadas para avaliação do deslocamento lateral do conjunto composto por um trator e duas carretas de transbordo.	27
Figura 5. Localização geográfica das áreas de estudo com contornos em vermelho.	28
Figura 6. Percurso pré-planejado em escritório de cada uma das áreas estudadas A1 (a), A2 (b) e A3 (c).	29
Figura 7. Representação gráfica do conjunto trator e carretas de transbordo utilizado para os experimentos.	30
Figura 8. Proteção utilizada para os monitores posicionados na parte traseira das carretas de transbordo.	31
Figura 9. Disposição das antenas de GNSS no conjunto.	31
Figura 10. Organograma da organização das etapas do processamento dos dados.	32
Figura 11. Procedimento utilizado para recuperar a distância entre a linha de referência e o ponto Pp do percurso.	33
Figura 12. Representação gráfica da posição relativa dos eixos em relação à referência (desvios) em percurso reto (a) e percurso curvo (b).	34
Figura 13. Geometria do veículo e rastreamento do deslocamento durante o trajeto.	35
Figura 14. Mapa de declividade pontual em cada uma das áreas do Experimento 3 mostrando as isolinhas de cotas verticais a cada 1 m com perpendiculares a cada 100 m.	37
Figura 15. Faixa de abrangência das linhas escolhidas, de menor e maior declividade do terreno, dentro das áreas amostradas.	37
Figura 16. Dados brutos coletados do caminhamento realizado pelo conjunto.	39
Figura 17. Antes e depois da retirada dos dados de percurso externo ao limite do talhão.	39
Figura 18. Frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada parte do conjunto trator e carreta de transbordo para a terreno plano e percurso reto (A 1.1), terreno declivoso e percurso reto (A 1.2) e terreno declivoso e percurso curvo (A 1.3).	41
Figura 19. Mapa de espacialização dos erros de desalinhamento para o segundo transbordo no Experimento 1.	44
Figura 20. Frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada parte do conjunto trator e carreta de transbordo para cada uma das declividades estudadas (A 2.1, A 2.2 e A 2.3) em ambos os direcionamentos.	48
Figura 21. Espacialização dos erros de desalinhamento para o direcionamento automático (a) e manual (b) no segundo transbordo para o Experimento 2.	51

Figura 22. Frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada parte do conjunto trator e carreta transbordo para cada uma das declividades estudadas (A 3.1, A 3.2 e A 3.3) em ambos os direcionamentos.....	54
Figura 23. Espacialização dos erros de desalinhamento para o direcionamento automático (a) e manual (b) no segundo transbordo para o Experimento 3.	57
Figura 24. Mapa de declividade pontual em cada uma das áreas do experimento 1 mostrando as isolinhas de cotas verticais a cada 1 m com perpendiculares a cada 100 m....	71
Figura 25. Faixa de abrangência dos pontos escolhidos de menor e maior declividade do terreno dentro das áreas amostradas.	71
Figura 26. Mapa de declividade pontual em cada uma das áreas do experimento 2 mostrando as isolinhas de cotas verticais a cada 1 m com perpendiculares a cada 100 m....	72
Figura 27. Faixa de abrangência dos pontos escolhidos de menor e maior declividade do terreno dentro das áreas amostradas.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização das áreas de estudo.	29
Tabela 2. Declividade do terreno em cada uma das linhas referentes as áreas do Experimento 3.	37
Tabela 3. Erros entre passadas do trator e de cada carreta transbordo no seu terceiro eixo para cada uma das áreas estudadas.	40
Tabela 4. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 1.1.	42
Tabela 5. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 1.2.	43
Tabela 6. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 1.3.	43
Tabela 7. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo nas áreas estudadas em cada um dos direcionamento.	46
Tabela 8. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 2.1.	49
Tabela 9. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 2.2.	50
Tabela 10. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 2.3.	50
Tabela 11. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo nas áreas estudadas em cada um dos direcionamento.	52
Tabela 12. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 3.1.	55
Tabela 13. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 3.2.	56
Tabela 14. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 3.3.	56
Tabela 15. Declividade do terreno em cada uma das linhas referentes as áreas do Experimento 1.	71

Tabela 16. Declividade do terreno em cada uma das linhas referentes as áreas do Experimento 2.....	72
--	----

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar adquire maior relevância no cenário agrícola nacional e internacional, sobretudo como maior fonte de matéria-prima para a produção de açúcar, pela capacidade de geração de energia renovável através do etanol e pela cogeração de energia por meio da queima do palhico e do bagaço.

Em busca da sustentabilidade, a utilização de fontes renováveis para a obtenção de energia tem sido priorizada, sendo o Brasil um dos países na vanguarda desta tendência dada a sua expressiva produção de cana-de-açúcar e seu potencial de expansão. Essa demanda crescente motiva a busca por ferramentas que proporcionem maior eficiência e melhor tecnologia a campo, visando redução nos custos de produção e o aumento da lucratividade (MAGALHÃES et al., 2008).

A mecanização agrícola tem sido um dos elementos essenciais dos avanços tecnológicos que vêm ocorrendo. Sua inserção na lavoura de cana promove ganhos no sistema de produção, principalmente com relação à produtividade da cultura e a eficiência da mão-de-obra. No entanto, o intenso uso da mecanização gera um crescimento no tráfego de veículos dentro das áreas, podendo acarretar problemas como a compactação do solo e danos causados às soqueiras de cana pelo inadvertido tráfego sobre estas.

O sistema de produção canavieiro é dependente de um contínuo corte e rebrotamento da cana-planta, sobre a qual o tráfego deve ser evitado para assegurar a integridade fisiológica da rebrota e das produtividades decorrentes dela (PAULA & MOLIN, 2013). Portanto, o tráfego dos rodados de máquinas sobre áreas recém-colhidas deve seguir de maneira exata as entrelinhas da cultura. Este processo se torna mais desafiador durante a colheita em períodos noturnos, devido à limitada margem de desalinhamentos permitidos para se evitar danos ao sistema radicular (BAIO, 2011; SPEKKEN et al., 2014). Além disso, o espaçamento assimétrico das fileiras de cana-de-açúcar é o maior causador dos danos do tráfego associados à colheita (BAIO, 2007).

A necessidade de exatidão no tráfego de máquinas canavieiras impulsionou a adoção de tecnologias que pudessem otimizar o deslocamento dos conjuntos mecanizados nas lavouras. Tecnologias como os sistemas de barra de luzes e direcionamento automático são utilizados para auxiliar que os rodados trafeguem nos locais corretos. Para tanto, estes sistemas utilizam sinais de GNSS (Global Navigation Satellite Systems) para se orientarem geograficamente quando estão no campo. A qualidade desse sinal faz com que seja possível ter precisão e acurácia suficientes para que os rodados dos veículos trafeguem nas entrelinhas da cana-de-açúcar, sem causar danos às soqueiras.

Para os tratores que executam o plantio e para as colhedoras, a adoção de sistemas de direcionamento automático já vem sendo utilizadas, porém para os tratores com carretas de transbordo que acompanham continuamente as colhedoras no campo, ainda não há adoção de tal recurso, ou quando é adotado usa-se tecnologia com menor exatidão de posicionamento. Além disso, as carretas sofrem desvios em percursos curvos e em terrenos inclinados, o que ocorre com frequência nas áreas produtoras.

O desempenho dos sistemas de direcionamento automático é frequentemente associado aos erros transversais à trajetória. Estes podem ser atribuídos a fatores como dinâmica dos veículos, erro de posição geográfica, tipo de máquina ou implemento tracionado, ambiente da operação, qualidade do sinal GNSS, etc. (EASTERLY et al., 2010).

Assim, estabeleceu-se a hipótese de que a utilização a tecnologia de sistema de direcionamento automático melhora a qualidade dos percursos nos quais o conjunto de trator e carretas de transbordo são submetidos. Nesse contexto, busca-se avaliar os padrões de desvios laterais que ocorrem em carretas de transbordo em diferentes

percursos e sistemas de direcionamento. Sendo assim, o trabalho tem por objetivo quantificar os desvios a que os tratores e carretas de transbordo são submetidos a uma dada condição, em diferentes tipos de percursos, em terrenos planos e inclinados, a partir da obtenção dos desvios de cada parte do conjunto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A importância da cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) tem destaque crescente no cenário agrícola nacional e internacional. Introduzida no Brasil no período colonial, o país não é apenas o maior produtor de cana-de-açúcar, seguido por Índia e China, como também o maior produtor de açúcar e etanol (FAO, 2017).

A produção de cana-de-açúcar estimada para a safra 2016/2017 é de 694,54 milhões de toneladas, com crescimento de 4,4% em relação à safra anterior. A área a ser colhida está estimada em 9,1 milhões de hectares, com aumento de 5,3%, se comparada com a safra 2015/2016. A produção de açúcar deverá atingir 39,8 milhões de toneladas, 18,9% superior à safra 2015/2016 devido a preços mais rentáveis. Enquanto que a produção de etanol deve se manter acima de 27,9 bilhões de litros, com redução de 8,5% em razão da preferência pela produção de açúcar (CONAB, 2016).

A produção de etanol e açúcar, além de outros derivados de importância nacional, coloca o complexo sucroalcooleiro em posição de destaque no agronegócio brasileiro (DIAS NETO, 2000). A cana-de-açúcar vem sendo cultivada em quase todos os estados brasileiros, com destaque para São Paulo, estado responsável pela maior parte da produção de cana-de-açúcar e etanol do Brasil, devido a fatores como as condições de solo e de clima favoráveis, boa infraestrutura de transportes, proximidade dos mercados consumidores e utilização de pesquisas e tecnologias que incrementam cada vez mais a produção de tais produtos (AQUINO et al., 2014).

De acordo com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2016), o agronegócio do estado de São Paulo representa 20% de todo o PIB brasileiro, dos quais 11% estão correlacionados à agropecuária. O estado também representa 62% de toda a produção de cana-de-açúcar do país (UDOP, 2015).

A cana tem grande importância ambiental, pois o etanol é uma das principais alternativas como agrocombustível. Diante da possibilidade de escassez de combustíveis e dos problemas ambientais advindos da utilização de fontes energéticas fósseis, a busca pela utilização de energias renováveis é uma atitude natural e adequada (FIGUEIRA, 2005; CONAB, 2015; AQUINO et al., 2014). Para Tagnin e Mattes (2008) os agrocombustíveis são apresentados como uma medida capaz de diminuir a emissão de gases de efeito estufa. Estudos realizados pela Embrapa (2014) demonstram que o etanol advindo da cana-de-açúcar, utilizado como substituição à gasolina, reduz em aproximadamente 76% o nível de CO₂ emitido por um veículo, impactando na redução da emissão de gases de efeito estufa e quando comparado com o diesel, o uso de etanol reduz essa emissão em cerca de 77%.

2.2. Sistema de produção e colheita

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura perene da Família Poaceae. Apesar de não ser uma cultura exigente em solos, a cana-de-açúcar se desenvolve melhor em locais com boa aeração, drenagem e com profundidade maior que 1,0 m (COOPERSUCAR, 1988). A sua adaptação a condições de alta intensidade luminosa e elevadas temperaturas fazem da cana-de-açúcar uma cultura ideal para o cultivo em regiões tropicais (SEGATO et al., 2006).

Com relação ao ciclo de desenvolvimento da cultura, este varia entre dez meses para o EUA a até dois anos para países como África do Sul, Peru e Hawai. Enquanto que, para os demais países produtores, essa amplitude varia de 12 a até 18 meses, dependendo da época de plantio e fase de desenvolvimento (cana planta ou cana soca) (HUMBERT, 1968).

As condições climáticas observadas no Centro-Sul do Brasil permitem o plantio em duas épocas (MARCHIORI, 2004). As épocas de plantio durante o ano influenciam todo ciclo da cultura (cana planta). Estas épocas podem resultar em ciclos de 12 meses (ciclo de média duração) com cana plantada entre setembro e novembro, sendo conhecida como cana de ano; ou com ciclo de 18 meses plantada no período de janeiro a abril, passando a primeira estação de inverno em repouso e são cortadas apenas no ano seguinte, conhecidas como cana de ano e meio (Figura 1). Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser de 12 meses para todas as lavouras e estas passam a receber o nome de cana soca (PARANHOS, 1987; SEGATO et al., 2006).

Figura 1. Épocas das operações agrícolas para cana-de-açúcar para a região Centro-Sul.

Fonte: Elaborado pela autora a partir de MARCHIORI (2004).

O canavial permite de três a seis colheitas consecutivas, podendo esse valor aumentar de acordo com fatores como variedade, condições de cultivo, água disponível durante seu desenvolvimento e clima. Além disso, para manter a produtividade ciclo após ciclo, investimentos consideráveis devem ser realizados com relação a insumos e tratos culturais (EMBRAPA, 2015; ALFONSI et al., 1987).

Robotham e Chappell (2002) consideram que a colheita e o plantio estão relacionados. Para que a colheita mecanizada seja bem sucedida, esta é dependente de um plantio de qualidade, sem que ocorram falhas no estande. O rendimento da máquina deve ser otimizado e deve existir paralelismo entre sulcos e suavidade do microrelevo do solo, de modo a proporcionar menores perdas quantitativas no processo. Deste modo, no plantio de cana-de-açúcar, independentemente do método empregado, deverão ser cumpridas as necessidades da cultura tal como o ambiente de implantação (BEAUCLAIR & SCARPARI, 2006).

No processo de produção da cana, a colheita destaca-se pelos altos custos envolvidos e dificuldades operacionais. Pearce (2006) já relatava que a incorporação da mecanização na colheita de cana-de-açúcar era meta entre as usinas e produtores e que se encontrava em rápida expansão. Diferente de países como a Austrália onde a colheita é totalmente mecanizada (RENOUF et al., 2010), no Brasil a mecanização tem sido mais lenta. Fatores ambientais e de disponibilidade de mão-de-obra, entretanto, provocaram uma aceleração nesse processo. Costa Neto (2006) já advertia que a mecanização da colheita de cana-de-açúcar era inevitável, pois uma colhedora equivale

a 100 cortadores, podendo chegar ao rendimento de 15 a 20 t h⁻¹, comparada a 5 ou 6 t dia⁻¹ por pessoa. Com relação aos fatores ambientais, as pressões por órgãos governamentais e da sociedade pela eliminação das queimas (RIPOLI & RIPOLI, 2004; SALVI et al., 2007) fizeram com que a Lei Estadual da Queima (n.11.241/02, 2002) fosse promulgada em 2002. Desde então tem ocorrido um processo progressivo de mecanização do corte da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. A lei estabelece um cronograma gradativo de eliminação da queima como método de despalha e determina que tal prática deva ser totalmente abolida no estado até o ano de 2021 para áreas mecanizáveis com declividades de até 12% e 2031 para as não-mecanizáveis, com declividades superiores a 12% (SÃO PAULO, 2003).

Em 2007, um acordo entre o Governo do Estado de São Paulo e produtores, chamado "Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético", impulsionou a lei de 2002, antecipando as datas para abolição da queima da cana. Assim, apesar não ter força de lei e não ser obrigatório, o setor se dedicou a atender as metas definidas pelo Protocolo, as quais foram superadas na safra 2013/2014: 83,7%, ante os 72,6% da safra 2012/2013. Esse percentual considera tanto as áreas mecanizáveis das indústrias, quanto de seus fornecedores. Quando considerado apenas os canaviais controlados por usinas no estado de São Paulo, praticamente 100% já realizam a colheita de forma mecanizada. Áreas colhidas com queima caíram de 27,4%, na safra 2012/2013, para 16,3% na safra 2013/2014 (UNICA, 2014), enquanto que para a safra 2016/2017, a queima foi autorizada apenas para 2,5% do total da área cultivada no estado (TOMAZELA, 2017).

As colhedoras hoje utilizadas são originárias de projetos desenvolvidos na Austrália, com os próprios produtores liderando essas inovações (KEER & BLYTH, 1993). No começo da década de 1970, essas colhedoras foram introduzidas no Brasil e desde então os fabricantes vem aperfeiçoando o projeto de seus produtos, de modo a desenvolver colhedoras cada vez mais eficientes e robustas (RIPOLI, 1981; NEVES, 2003).

Pereira e Torrezan (2006) relatavam que dentre os sistemas mecanizados de colheita, as colhedoras de cana picada se destacam entre as mais comumente utilizadas. Magalhães & Braunbeck (1998) já relatavam sobre o crescente interesse nas colhedoras de cana picada, sobretudo em locais onde o relevo permitia a atividade e onde ocorria escassez de mão-de-obra, já que essas máquinas cortam, picam, limpam e carregam a cana-de-açúcar em operações interligadas. Esse tipo de colhedora pica os colmos em rebolos de 15 a 40 cm de comprimento, os quais são descarregados em unidades de transporte, conhecidos como transbordos. Essas unidades são carretas tracionadas que acompanham continuamente as colhedoras no campo e possuem mecanismos de auto descarregamento com acionamento hidráulico com capacidade de carga entre 4 a 12 toneladas por unidade (RIPOLI & RIPOLI, 2004). Atualmente, existem transbordos com capacidade de carga que chegam a 22 toneladas (Figura 2).

Figura 2. Exemplo de modelos de transbordos existentes no mercado (a) dois eixos; (b) três eixos, conhecidos como tridem; e (c) quatro eixos, com capacidade para 22 toneladas.

Fonte: Adaptado de TMA, 2017; ANTONIOSI, 2017; e TESTON, 2017.

2.3. Mecanização e controle de tráfego

O processo de colheita é o principal componente do custo operacional de produção, correspondendo a cerca de 40% dos desembolsos na produção da matéria-prima e esta, por sua vez, corresponde a 60% do custo de produção do açúcar e etanol (PECEGE, 2012; CONSECANA, 2006).

O modo como a colheita da cana-de-açúcar é realizado pode influenciar em toda a produção e longevidade da cultura, nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, além da influência no ambiente e na saúde pública (SOUZA et al., 2006). O sistema de colheita por cana queimada provoca grandes impactos ambientais, por exemplo a eliminação da biomassa presente na superfície e a elevação da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, contribuindo assim para o aumento do efeito estufa e para a diminuição da matéria orgânica no solo (SOUZA et al., 2005). Ademais, o solo permanece exposto por um período relativamente longo, o que estimula o processo erosivo e resulta na degradação da qualidade do solo. Estudos realizados por Tim (2002) demonstram que na colheita de cana-de-açúcar sem que ocorra a queima dos resíduos culturais, ocorre melhoria das condições físicas do solo, como aumento da macroporosidade e da estabilidade dos agregados, redução na resistência à penetração, aumento na permeabilidade, bem como redução da amplitude térmica e manutenção da umidade do solo, de modo que todo esse apanhado tem por consequência o aumento do potencial produtivo da cultura.

Conforme Farina e Zylbersztajn (1998), o solo na cultura da cana-de-açúcar pode sofrer sérios problemas de compactação, já que a adoção do sistema mecanizado para a colheita, utilizando colhedoras autopropelidas, intensifica o tráfego de máquinas. O uso inadequado dessas máquinas pesadas causa efeitos prejudiciais que podem ser sentidos ao longo de todo o ciclo da cultura, se estendendo por cinco anos ou mais (FREITAS, 1987; ROQUE et al., 2010).

Na prática, o uso intensivo de maquinários, vem tornando frequente os problemas relacionados à compactação em solos agrícolas (CAMARGO & ALLEONI, 1997). Para Salvi et al. (2007), na colheita mecanizada de cana-de-açúcar existem peculiaridades com relação às interações solo-planta-máquina, o que resulta em perdas no campo, redução da longevidade e da qualidade da matéria-prima. Com a intensificação da mecanização e o aumento do peso dos equipamentos que trafegam nas lavouras, observou-se aumento intenso no uso do solo, o que pode ocasionar alterações significativas das propriedades físicas do solo (STRECK et al., 2004).

Estudos realizados por Hadas (1987) constataram que o tráfego de máquinas pesadas sobre o solo promove a redução na infiltração de água, condutividade hidráulica, porosidade e aeração, tendo como consequência a elevação de sua densidade e da resistência oferecida ao desenvolvimento dos sistemas radiculares, resultando em baixa produtividade agrícola nesses solos compactados. De acordo com Magalhães (1990), a cana-de-açúcar é a cultura na qual o solo está sujeito aos mais graves índices de compactação.

Para Mialhe (2000), o tráfego de veículos de carga e máquinas nos canaviais representa uma das mais drásticas agressões ao leito radicular da cultura. Tentativas para a redução do tráfego de veículos em terrenos agrícolas têm sido uma preocupação frequente dos agricultores. É explícito o efeito prejudicial da compactação sobre o desenvolvimento da planta cultivada, à sua produtividade e consequentemente a redução da renda bruta das lavouras.

A intensificação do tráfego das colhedoras de cana-de-açúcar e dos sistemas de carregamento em áreas que não tiveram uma sistematização adequada faz com que aumente o tráfego inadvertido sobre as fileiras de cana-de-açúcar, resultando em perda de vigor, falhas, bem como redução no desenvolvimento e população das plantas nas safras subsequentes devido a lesões e abalos causados nas soqueiras (BENEDINI & CONDE, 2008). Segundo Michelazzo e Braunbeck (2007) o crescente aumento da largura dos pneus e das colhedoras com capacidade de corte de apenas uma fileira, fazem com que 50% da área da lavoura sejam trafegadas mais de 20 vezes a cada ciclo de produção, resultando assim em menor longevidade do canavial e aumento nos índices de danos à soqueira.

A intensidade do número de passadas também desempenha papel importante na compactação do solo, pois as deformações projetadas no solo podem aumentar conforme as vezes que ocorre a passagem do rodado no mesmo traçado. Resultados experimentais mostraram que um elevado número de passadas na mesma linha de tração utilizando um trator leve, pode causar danos ainda maiores do que um número menor de passagens com um trator mais pesado. No entanto, a primeira passada de uma roda é conhecida por causar grande parte da compactação total do solo (BAKKER & DAVIS, 1995; HAMSA & ANDERSON, 2005).

No contexto da agricultura mecanizada, uma estratégia que possibilita a harmonização entre rodados e plantas é o tráfego controlado. Esta surge como uma alternativa para o cultivo de cana-de-açúcar, pois minimiza os efeitos prejudiciais da mecanização agrícola. A principal peculiaridade dessa técnica é a distinção permanente das zonas de tráfego daquelas em que há crescimento das plantas, com isso, uma área menor será submetida ao tráfego intenso (TAYLOR, 1983; LAGUË et al., 2003; TREIN et al., 2005).

Os maiores benefícios de um sistema de controle de tráfego são obtidos quando todas as máquinas, incluindo as colhedoras, são adaptadas à mesma zona de tráfego (KINGWELL & FUCHSBICHLER, 2011;

MASEK, 2014). Sendo assim, obtém-se a vantagem da qual as linhas de tráfego estejam propositalmente compactadas aumentando a eficiência da tração dos pneus, de modo que a área de produção seja usada exclusivamente para o cultivo, sem que ocorra compactação associada ao tráfego, fornecendo melhores condições do solo para o crescimento das raízes (BRAUNACK & MCGARRY, 2006; VERMEULEN & MOSQUERA, 2009).

Segundo Reeder e Smith (2000) para os veículos convencionais faz-se necessária a padronização das bitolas (espaçamento entre os pneus), com o intuito de todos os veículos que serão utilizados na área tenham os valores iguais de bitola ou múltiplos, o que ocasiona diminuição no número de linhas de tráfego, aumentando o percentual de área para produção. Esta é uma prática recente no Brasil, mas bastante difundida na Austrália, que tem como objetivo reduzir o impacto da compactação do solo sobre a produtividade das culturas.

Os benefícios resultantes de menor compactação podem atingir também a produtividade e o ganho econômico do produtor. Pesquisas realizadas na Austrália detectaram aumento de 16% na produtividade e aumento de 30% nos lucros pelo uso do sistema de tráfego controlado quando comparado com o sistema convencional na produção de grãos de sorgo, trigo e milho (TULLBERG, 1997; ACIAR, 1998). A utilização do controle de tráfego proporciona melhorias na estrutura física do solo e na diminuição no consumo de combustível, dado que maior área de solo não sofrerá os danos da compactação e apresentará menor resistência ao rompimento do solo na passagem de equipamentos (ROQUE et al., 2010).

Estudos desenvolvidos com o controle de tráfego em tratores convencionais apontam para o aumento na produtividade e redução de intervenções profundas no solo como a subsolagem (WILLIFORD, 1980; COLWICK et al., 1981). Em avaliações realizadas por Braunack et al. (2006) sobre o efeito da posição do tráfego na colheita de cana-de-açúcar, verificou-se redução da compactação e aumento da produtividade da cultura nas áreas onde foi utilizado o controle de tráfego. Para Oliveira et al. (2008) que mensuraram a compactação das fileiras e entrelinhas de cana-de-açúcar em áreas de segundo corte, as áreas que foram submetidas às técnicas de controle de tráfego obtiveram diferenças significativas quando comparada as linhas com as entrelinhas, o que confirmou a eficiência de utilização do método. Segundo Raper e Reeves (2007), o controle de tráfego se torna mais complexo de acordo com o aumento de operações requeridas dentro de um sistema produtivo e também na variação da largura de máquinas e implementos utilizados.

2.4. GNSS e sistemas de direção automática

Além da necessidade de ajuste das bitolas são imprescindíveis ferramentas que assegurem que os rodados trafeguem na área determinada, auxiliando para que as operações realizadas em campo sejam rigorosamente paralelas, sem que haja a dependência exclusiva das habilidades de operadores (MOLIN et al., 2011). Equipamentos e recursos de auxílio ao operador para percorrer percursos pré-determinados ou paralelos tem evoluído sensivelmente.

O estudo da orientação automática para tratores agrícolas tem uma longa história (WILLRODT, 1924; GERRISH & SURBROOK, 1984; O'CONNOR et al., 1996; REID & SEARCY, 1987; ZHANG et al., 1999). Nos últimos 20 anos, têm sido disponibilizadas tecnologias inovadoras para navegação e posicionamento. Sem dúvida o surgimento dos GNSS significou grandes avanços nesse sentido (OLIVEIRA et al., 2011).

O equipamento conhecido como barra de luzes marcou o início da incorporação do direcionamento em veículos agrícolas com sinal GNSS (LOWENBERG-DeBOER, 2004; BAIO & ANTUNIASSI, 2008). Este consiste em um conjunto de sinais luminosos posicionados à frente do operador da máquina ou veículo, conectados a um processador que recebe a informação de posicionamento de um receptor GNSS. Entretanto, a tecnologia evoluiu

para a automatização da barra de luzes, surgindo assim os sistemas onde o direcionamento do veículo é realizado por um motor auxiliar ligado à direção ou por ação direta no sistema hidrostático de direcionamento, controlado pelas informações de trajetória geradas por um receptor GNSS (MOLIN et al., 2011).

De acordo com Oliveira e Molin (2011), existem disponíveis no mercado dois tipos de sistemas de direcionamento automático. O sistema com atuador de volante que pode ser motor elétrico atuando na coluna de direção ou por atrito diretamente no volante. O sistema integrado controla diretamente o direcionamento do rodado do veículo por meio de um conjunto de componentes eletrônicos e hidráulicos integrados ao seu sistema de direção. Observa-se que o sistema integrado é, a priori, mais acurado que o sistema com atuador de volante, já que o tempo de resposta é menor e a atuação é diretamente no comando da direção, sem interação entre componentes e o volante.

Os sistemas de orientação executam um papel essencial no desenvolvimento da agricultura mecanizada. No Brasil, a aviação foi precursora na utilização de GNSS para aplicações agrícolas, utilizando as barras de luzes na substituição dos sistemas de orientação visual com bandeiras (MOLIN, 1998). O passo seguinte no processo evolutivo das tecnologias de GNSS foram os sistemas de direcionamento automático, também conhecidos como piloto automático.

Para os fabricantes de maquinários agrícolas, a rápida adoção dos sistemas automáticos de orientação nos últimos anos, apesar do custo de implantação, pode ser explicada por fatores, como aumento da produtividade no campo e da capacidade operacional, em especial em condições de baixa visibilidade, redução do uso de insumos e diminuição da fadiga do operador, o que asseguraria um retorno rápido do investimento (GAN-MOR & CLARK, 2001; SILVA et al., 2007; EDAN et al., 2009).

Vários autores (SHOCKLEY & DILLON, 2008; BATTE & EHSANI, 2006; GRIFFIN et al., 2005) relatam que a utilização do sistema de direcionamento automático reduz substancialmente as sobreposições e falhas de aplicação, havendo a possibilidade de elevação da velocidade operacional, além de auxiliar para o aumento no tempo disponível para a operação e na flexibilidade de turnos, resultando em redução dos custos nas operações.

Para a escolha adequada de um sistema de direcionamento para cada operação agrícola ou que atenda a todas as condições operacionais e necessidades da cultura, são necessários conhecimentos relacionados às diferentes opções de GNSS, tipos de correção diferencial e sistemas de orientação (MORATELLI & BAILO, 2006).

A correção diferencial pode ser realizada após a coleta de dados ou em tempo real. Para Krueger (2004), os métodos de posicionamento diferencial subdividem-se em DGPS (Differential Global Positioning System), Wide Area DGPS e RTK (Real Time Kinematic)

No sistema de DGPS calcula-se correções diferenciais para o código C/A (Course Aquisition) ou com o código suavizado pela portadora (MACHADO, 2008). A acurácia obtida para as correções do código C/A podem ser de 1 a 5 m, com a S/A (disponibilidade seletiva) desativada (HOFMANN et al., 1994).

Para Balastreire e Baio (2002) o posicionamento relativo com DGPS, para as condições daquela época, poderia ser substituído por algum sistema que utiliza um algoritmo para a melhoria da precisão do posicionamento, por exemplo, o algoritmo e-Dif®, que corrige o posicionamento horizontal sem utilização de nenhum tipo de sinal diferencial, alcançando coordenadas tão precisas quanto as obtidas pela utilização do DGPS. No entanto, estes algoritmos não permitem posicionamento acurado e, sim, preciso (HEMISPHERE, 2010).

O Wide Area DGPS ou Satellite-based Augmentation System (SBAS) atua com um conjunto de estações de referência fixadas em diversas regiões. São sistemas que utilizam correções para cada satélite, provenientes de observações de uma rede continental de estações de referência. O sinal é distribuído via satélite de comunicação

geoestacionário, exclusivo para este fim. Existem sistemas privados, com sinal pago e os sinais públicos mais notáveis são o Wide Area Augmentation System (WAAS) proveniente dos Estados Unidos e o Euro Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) da Europa, sendo que alguns desses satélites que fazem parte do sistema cobrem o território brasileiro, porém com baixa acurácia (SEGANTINE, 2005; MONICO, 2007).

Segundo Baio (2007), algumas aplicações agrícolas exigem acurácia tão elevada que alguns sistemas de correções diferenciais não conseguem atender, como na sulcação ou mesmo no plantio mecanizado da cana-de-açúcar, de modo que se faz necessária a correção RTK nestas aplicações. O sistema de correção diferencial RTK é o mais preciso e exato disponível para uso na agricultura, com precisão na ordem de 0,025 m e com repetibilidade da posição fornecida ano após ano (TREVISAN et al., 2014). A acurácia desse tipo de sistema é obtida por meio de um par de receptores, dos quais um deles (base) fica estacionado sobre um ponto de coordenadas conhecidas e calcula o erro entre a posição fornecida pelos satélites e a posição real. Esse erro é usado para calcular um sinal de correção que é enviado por uma conexão de rádio para o outro receptor (rover) que está na máquina, corrigindo instantaneamente a posição deste (HARBUCK, 2006; LIMA, 2006). Apesar de ter alta precisão e repetibilidade, o sistema RTK apresenta uma degradação da acurácia do sinal na ordem de 1 mm km⁻¹ entre a base e o rover, o que restringe a sua operação a um raio de aproximadamente 20 km. Também é comum que ocorra a perda de sinal em distâncias menores com a presença de obstáculos ou regiões de elevado declive devido à potência de alcance do sinal do rádio (TREVISAN et al., 2014).

Baio (2007) ainda relata que o setor canavieiro está investindo cada vez mais na tecnologia de sistemas de direcionamento automático (piloto automático). Para Groover e Grisso (2009) os sistemas de auto direcionamento, tem se tornado uma área de estudos cada vez mais ativa no que se diz respeito a automação na agricultura, e isso pode ser explicado por fatores como a diminuição da necessidade de ajustes contínuos realizados pelo operador no direcionamento do veículo, além de ter como grande benefício a redução de erros entre passadas. Batte e Ehsani (2006) mostram que a redução dos custos operacionais pela utilização desta tecnologia pode ser substancial. Shockley e Dillon (2008) relatam que o piloto automático reduz sobreposições e falhas na aplicação, pode elevar a velocidade operacional, possibilita maior acurácia na aplicação de insumos e eleva o tempo disponível para a operação. Outros estudos já foram realizados para a avaliação do uso de sistemas de direcionamento automático em operações agrícolas utilizando os mesmos sinais e obtiveram erros médios em relação à linha referência variando de 0,02 m a 0,10 m (THUILOT, 2002; STOLL & KUTZBACH, 2000; CORDESSES et al., 2000).

O custo elevado da implantação desses sistemas pode ser justificado pelos ganhos em capacidade operacional, precisão e acurácia dos percursos, especialmente sob condições visuais precárias e aumento da produtividade do canavial, o que pode acarretar um rápido retorno do investimento (GAN-MOR & CLARK, 2001). Observa-se que apesar dessas tecnologias estarem disponíveis, o setor canavieiro é carente em informações que quantifiquem os seus reais benefícios.

2.5. Avaliação dos erros de paralelismo

É importante qualificar tais equipamentos e para tanto é necessário medir o erro de paralelismo de cada combinação desses sistemas e conhecer o nível de desempenho fornecido, com o objetivo de melhor adequar os equipamentos ao que o usuário necessita, auxiliando para o uso racional da tecnologia, com otimização da relação entre custo e benefício. De acordo com Molin e Carreira (2006), o paralelismo entre as linhas garante, dentre outros,

minimização de desperdícios e máxima qualidade na aplicação, bem como a execução de operações noturnas. Vários autores já utilizaram diferentes metodologias para medir esses erros de paralelismo (MOLIN et al., 2002; ANTUNIASI & BAIO, 2004; EHSANI et al., 2002; GAN-MOR et al., 2007) e, a princípio, fizeram uso de marcações físicas que pudessem gravar os desvios de paralelismo ao longo da trajetória. Contudo, para condições reais de tráfego agrícola tais métodos tornaram-se complexos e passíveis de erro. Em seguida, passou-se a fazer o registro de coordenadas ao longo da trajetória, tendo como referência um GNSS com sistema de correção RTK, com maior acurácia que o sinal do sistema sendo avaliado (MOLIN et al., 2011).

Han et al. (2002) avaliaram o comportamento de receptores de GPS com as antenas estabelecidas sobre a cabine de um veículo agrícola que se deslocava em linha reta a diferentes velocidades utilizando um receptor de GPS RTK como referência para medir as distâncias entre a reta do percurso virtual e a reta da regressão dos pontos fornecidos pelos receptores. Stombaugh et al. (2002) e Weltzien e Noak (2003) desenvolveram e estudaram as interações de uma estrutura giratória para a realização de ensaios cinemáticos para receptores de GPS com uso de correção RTK. Ambos salientam que uma das vantagens de se utilizar uma estrutura dessas é que permite maior repetibilidade nos ensaios do que com um veículo e mencionam como desvantagem o fato de ser mais difícil reproduzir as condições reais do campo com esse tipo de arranjo.

Taylor et al. (2004) estudaram vários receptores em um percurso linear utilizando um veículo montado sobre um trecho de ferrovia que se deslocava em sentidos opostos alternados e o posicionamento do trilho foi determinado com um GPS RTK. Stombaugh et al. (2005) desenvolveram um percurso no qual um pequeno veículo automotriz montado sobre monotrilhos puxa um ou mais carros de instrumentos com receptores de GNSS. O percurso foi configurado para simular os percursos das máquinas agrícolas no campo, incluindo manobras de cabeceira de lavoura a quais estes estão sujeitos. O trajeto do trilho foi determinado com um GPS RTK e o desvio padrão entre erro transversal de deslocamento e o carro foram menores que 5 mm.

A caracterização do desempenho de sistemas de orientação em faixas paralelas utilizando barra de luzes ou mesmo sistema de direcionamento automático oferece menor dificuldade por ser sempre referente a uma única direção. São medidos então os desvios laterais em relação a um percurso e para tanto é necessário apenas conhecer a linha ideal e marcar a linha do percurso real, mensurando os desvios por perpendiculares à primeira (MOLIN, 1998; MOLIN & RUIZ, 1999; MOLIN et al., 2002; BAIO, 2005).

Algumas unidades produtoras de cana-de-açúcar já vêm utilizando equipamentos de direção automática de atuador hidráulico com sinal de correção RTK nas colhedoras. Nos tratores que tracionam as carretas de transbordo, a utilização de sistemas de direcionamento ainda é limitada (SALVI et al., 2014). Os mesmos autores observaram que a utilização de direcionamento automático com atuador hidráulico e sinal RTK na colhedora obteve em 80% do tempo erros inferiores a 0,04 m, enquanto que no direcionamento manual, essa frequência diminuiu para 19%. Por sua vez, Baio e Moratelli (2011) compararam sistemas de direção nas colhedoras e observaram que o sistema de direção automática utilizando GNSS com correção diferencial do tipo RTK resultou em erros de alinhamento entre 0,032 e 0,034 m com 95% de probabilidade, enquanto que o direcionamento manual obteve erros entre 0,164 e 0,176 m em 95% das observações. Segundo os mesmos autores, essa irregularidade do espaçamento observada na colheita, também é obtida na operação de plantio mecanizado ou sulcação, o que gera uma série de dificuldades nas operações subsequentes, as quais prejudicam todo o processo produtivo do canavial.

Os sistemas de direcionamento automático, usualmente, somente direcionam o trator. Ao se tratar de veículos rebocados, mantê-los na trajetória correta não é simples, já que o único recurso sob controle é o ângulo de

esterçamento do rodado do trator. Em trajetos curvos, a carreta desvia em relação à trajetória do trator, o que aumenta com a inclinação do terreno, sofrendo desvios laterais (BACKMAN et al., 2010).

A ocorrência de desvios laterais é prejudicial para a maioria das operações em campo. Molin et al. (2011) desenvolveram um método utilizando planilha eletrônica que retrata os desvios de dados registrados por um receptor GNSS acoplado a um veículo e o método limitou-se a padrões retos de orientação. Contudo, muitos dos padrões de trabalho da máquina e veículos são curvos.

A partir do desenvolvimento e evolução dos sistemas de orientação para direcionamento, pilotos automáticos e robótica, maior esforço foi direcionado em relação aos trabalhos sobre percurso pré planejados (KEICHER & SEUFERT, 2000; CARIU et al., 2010).

A aquisição automatizada de percursos para o tráfego de máquinas e veículos sobre talhões agrícolas ("path planning") tem sido objeto de muitos trabalhos que visam à otimização de tempo produtivo (JIN & TANG, 2010; HAMEED et al., 2010), controle de tráfego para redução da compactação de solo (BOCHTIS et al., 2012), otimizações combinadas de manobras e abastecimento (SPEKKEN & BRUIN, 2013), cobertura otimizada de área pelos equipamentos agrícolas (PALMER et al., 2003; BRUIN et al., 2009) e minimização de perdas de solo no caso de terrenos inclinados (SPEKKEN et al., 2016).

A norma ISO 12188-1: 2010 e a equivalente norma ASABE/ISO 12188-2: 2012 contemplam a quantificação da acurácia da orientação de sistemas autônomos. Dentro do ambiente agrícola, máquinas e veículos de campo normalmente são conduzidos ao longo de uma linha reta. Neste contexto, desvios perpendiculares à direção de deslocamento são críticos. Um cálculo padrão para determinar o desvio perpendicular e caracterizar a acurácia de um sistema de direcionamento é o erro transversal à trajetória (cross-track error - XTE) que é calculado como o desvio horizontal do percurso previsto (BORHAUG & PETERSEN, 2005). Esses erros podem ser utilizados para estimar as estatísticas de erro de posição 2D ou realizar comparações (SHARP & YU, 2012).

A medição de erro de trajetória transversal requer uma linha de referência conhecida que descreve o trajeto pretendido, e isto nem sempre é possível em um ambiente agrícola. A norma ASABE/ISO 12188-2: 2012 baseia-se no erro transversal à trajetória e define XTE como o "desvio lateral do Ponto Representativo no Veículo (RVP) do percurso determinado a partir de percursos anteriores realizados pelo RVP quando guiado ao longo do mesmo trajeto" (ASABE/ISO, 2012) (Figura 3). A norma apresenta procedimentos para que seja efetuado o teste para sistemas de posicionamento e orientação em situações de percurso retilíneo e em nível. O teste demanda o deslocamento de forma autônoma, para frente e para trás, a partir do uso de uma linha de referência A-B. Durante o deslocamento ao longo do percurso determinado, medições da localização do veículo são tomadas a uma taxa de amostragem de pelo menos 10 Hz. As diferenças entre o deslocamento e o percurso determinado são usados para definir o XTE, usado para relatar a acurácia do percurso (ROUNSAVILLE et al., 2016).

1. Percurso teórico ou planejado
2. Sensores ou marcadores permanentes
3. Passada anterior do veículo
4. Passada atual do veículo
5. Posições relativas obtidas por sensores de posição
6. Desvio entre duas passadas (XTE relativo)

Figura 3. Elementos de uma mensuração de erro transversal (XTE).

Fonte: ASABE/ISO, 2012.

À medida que a grande maioria dos estudos dessa natureza visou percursos retilíneos em terrenos planos, um menor esforço foi direcionado para percursos curvos e que levassem em consideração o declive do terreno (OKSANEN & VISALA, 2009; JIN & TANG, 2011). Porém, a criação de percursos em declive enfrenta as limitações de conservação de solo devido à perpendicularidade ao declive e trafegabilidade ao longo de todo talhão. A produção de cana-de-açúcar é comumente feita em terrenos inclinados e os trajetos pré-planejados devem considerar a perpendicularidade em relação à inclinação, já que dificilmente estão em linha reta (SPEKKEN et al., 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização dos experimentos

Para atender o objetivo proposto e considerando as disponibilidades de infraestrutura das parcerias, foram desenvolvidos três experimentos, conforme esquema apresentado na Figura 4:

Figura 4. Fluxograma das variáveis estudadas para avaliação do deslocamento lateral do conjunto composto por um trator e duas carretas de transbordo.

Sendo assim, o primeiro experimento foi realizado propondo avaliar o direcionamento manual em função do relevo e a influência do tipo de percurso no deslocamento do conjunto. Já o segundo experimento, avaliou o efeito dos tipos de direcionamento em relevo plano e percurso retilíneo. Enquanto o terceiro experimento avaliou o efeito dos tipos de direcionamento em relevo inclinado e percurso retilíneo.

Cada experimento foi conduzido no intuito de quantificar o desvio lateral de um conjunto trator - transbordos durante a colheita de cana-de-açúcar em diferentes situações. Em todos os casos foi utilizado um conjunto trator mais duas carretas de transbordo.

O estudo foi conduzido em áreas de produção de uma usina de cana-de-açúcar, localizada no oeste do estado de São Paulo. Escolheu-se áreas de primeiro corte, sem influência de tráfego anterior que pudesse, de alguma forma, afetar o percurso a ser avaliado e contemplaram declividades e percursos retilíneos e curvos. As áreas tinham suas linhas de plantio previamente projetadas a partir do levantamento topográfico e planialtimétrico do terreno, sendo que, após o plantio, os dados coletados em campo (linhas realizadas) foram processados e retornaram para

serem usados na colheita. As colhedoras utilizadas estavam com o sistema de direcionamento automático ativado. Além disso, foram mantidos os mesmos operadores para o trator que tracionava os transbordos durante todo o teste.

O experimento 1 foi conduzido em área com 49,89 ha, composta por três talhões (A 1.1, A 1.2, A 1.3), com produtividade para primeiro corte de 132 t ha^{-1} , entre 14 a 19 de março. O experimento 2 foi conduzido em uma área com 58,15 ha, composta por três talhões (A 2.1, A 2.2, A 2.3), com produtividade para primeiro corte de 121 t ha^{-1} , entre os dias 12 a 15 de julho. O experimento 3 foi conduzido em área com 23,51 ha, composta por três talhões (A 3.1, A 3.2, A 3.3), com produtividade para primeiro corte de 109 t ha^{-1} , entre os dias 26 a 31 de agosto (Figura 5). Em todas as áreas, os talhões foram divididos de acordo com a inclinação do terreno e tipo do trajeto do projeto de linhas (Figura 6). O solo das áreas dos experimentos 1 e 3 é classificado como Latossolo Roxo Eutrófico, já no experimento 2 é classificado como Latossolo Roxo Distrófico (SiBCS/EMBRAPA).

Com relação à declividade média do terreno, estas foram definidas de acordo com as classes propostas pela EMBRAPA (1999), a qual classifica em: plano (0-3%), suave ondulado (3-8%), moderadamente ondulado (8-13%) e ondulado (13-20%). De acordo com Veiga Filho et al. (2004) e Braunbeck & Magalhães (2006) a declividade do terreno é um fator limitante para a mecanização das áreas, já que declividades superiores a 12% limitam o deslocamento das máquinas agrícolas dentro das áreas de produção.

Figura 5. Localização geográfica das áreas de estudo com contornos em vermelho.

Em todas as áreas, o plantio foi realizado de forma mecanizada com o uso de uma plantadora de cana picada modelo PCP 6000 (DMB, Sertãozinho, Brasil). O plantio foi realizado em linhas simples, com espaçamento de 1,50 m. (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização das áreas de estudo.

	Experimento 1			Experimento 2			Experimento 3		
	A 1.1	A 1.2	A 1.3	A 2.1	A 2.2	A 2.3	A 3.1	A 3.2	A 3.3
Área (ha)	12,05	21,89	15,95	29,16	13,36	11,91	6,59	6,80	10,12
Percurso	Reto	Reto	Curvo	Reto	Reto	Reto	Reto	Reto	Reto
Declividade média do terreno (%)	2	9	9	1	2	2	5	7	8
Direcionamento automático no trator	Não			Sim			Sim

Figura 6. Percurso pré-planejado em escritório de cada umas das áreas estudadas A1 (a), A2 (b) e A3 (c).

3.2. Caracterização do conjunto

Para coleta de dados utilizou-se um trator modelo 6180J 4x2 TDA (John Deere, Montenegro, Brasil) e com potência nominal de 132 kW. O ajuste de bitolas foi efetuado através de um alargador de bitola dianteira e traseira que fornece distância de 3,0 m entre os centros do rodado. O trator dispunha de um sistema de direcionamento automático modelo AutoPilot (Trimble, Sunnyvale, EUA) com um receptor GNSS AgGPS 262 e um controlador modelo AgGPS NavController II (Trimble, Sunnyvale, EUA), com sistema de correção tipo RTK. A

antena do receptor GNSS foi instalada sobre a cabine do trator, alinhada com o eixo traseiro, a uma altura de 3,03 m em relação à superfície do solo.

O trator foi utilizado para tracionar duas carretas de transbordos de três eixos modelo TAC 14000 (Civemasa, Matão, Brasil) com capacidade de carga de 14 t cada, sendo o primeiro autoesterçante. Para o registro dos dados da trajetória realizada por cada um dos transbordos, os mesmos foram instrumentados com receptores GNSS com correção de sinal RTK e um computador para registro dos dados. A torre utilizada como base dos sinais se encontrava a um raio de 2 km de distância de cada uma das áreas e todos os coletores de dados utilizaram o sinal derivado desta. Os receptores GNSS foram instalados na parte superior traseira de cada um dos transbordos, a uma altura de 3,46 m da superfície de solo (Figura 7). A antena de rádio utilizada para comunicação entre a base e o rover foi instalada próxima ao monitor de registro dos dados. Os monitores utilizados foram: a) FMX® (Trimble, Sunnyvale, EUA) no primeiro transbordo; b) X30® (Topcon, Tóquio, Japão) no segundo transbordo. Com relação à agressividade e sensibilidade do sistema de direcionamento automático, todas foram mantidas com as configurações padrão vindas de fábrica. Uma bateria foi instalada à frente do primeiro transbordo para manter a alimentação contínua dos equipamentos e evitar que estes sofressem oscilações de energia durante a coleta de dados. Essa mesma bateria também forneceu energia para o monitor que estava instalado na cabine do trator. Desta forma, todo o sistema de alimentação elétrica dos equipamentos operou de maneira independente do trator.

Figura 7. Representação gráfica do conjunto trator e carretas de transbordo utilizado para os experimentos.

Para evitar danos nos equipamentos utilizados para a coleta de dados, foram adaptadas proteções internas e externas para cada uma das partes (Figura 8). Para proteção contra o pó e temperaturas excessivas, foram utilizadas estruturas metálicas onde os equipamentos foram instalados, as quais foram revestidas com um material absorvente para proteção. As aberturas laterais serviram tanto para ventilação como para que os cabos de conexão do sistema fossem desde o monitor até as antenas. As antenas de GNSS foram fixadas a estruturas de aço, que foram soldadas na parte superior de cada um dos transbordos, a uma altura que ficasse o mais livre possível de interferências (Figura 9). Foi utilizado um material absorvente de choques mecânicos (espumas de proteção) para protegê-las contra choques laterais devido principalmente à movimentação do elevador e queda acidental de rebolos de cana, que não interferia na recepção do sinal. As antenas de rádio foram instaladas ao lado das caixas de proteção das telas.

Figura 8. Proteção utilizada para os monitores posicionados na parte traseira das carretas de transbordo.

Figura 9. Disposição das antenas de GNSS no conjunto.

Além da coleta dos dados do conjunto trator e carretas de transbordo, as colhedoras também tiveram os seus dados de posicionamento coletados a fim de observar eventuais influências de seus percursos em relação aos do conjunto de transporte, já que qualquer alteração no percurso realizado pela colhedora, induz o operador do trator a seguir o mesmo.

3.3. Aquisição e processamento dos dados

Nesta unidade de produção de cana-de-açúcar, máquinas e veículos são divididos por frentes de colheita, as quais são compostas por seis colhedoras e 10 conjuntos trator e carretas de transbordo (1,7 conjunto de trator e carretas para cada colhedora). A velocidade média do conjunto (colhedora mais carreta de transbordo) para a operação foi de $1,25 \text{ m s}^{-1}$ ($4,5 \text{ km h}^{-1}$). Para não prejudicar o rendimento operacional da colheita, o trator instrumentado não ficou vinculado a apenas uma colhedora, permitindo que fossem coletadas linhas dentro de toda a

extensão da área, aumentando a disponibilidade de dados. Sendo assim, a coleta de dados foi contínua e executada pelos próprios computadores dos sistemas de direção automática (X30®, Topcon e FMX®, Trimble), ambos com software próprio para aquisição de dados na frequência de 0,5 Hz.

Com relação à colhedora, a aquisição de dados foi realizada pelo monitor do sistema de direcionamento (FMX®, Trimble), utilizando o próprio software disponível no sistema na mesma frequência do conjunto.

Para os atuais modelos de colhedoras, que realizam a colheita de uma única fileira, disponíveis no mercado, a margem de erro entre os elementos rodantes do conjunto e a soqueira de cana-de-açúcar é de apenas alguns centímetros para que seja evitado o pisoteio. De acordo com Mialhe (1996), o tráfego de máquinas entre as fileiras da cultura, deve atender a um "afastamento de segurança", que seria um "afastamento lateral" de ambos os lados do eixo central da fileira, de modo que a passagem dos rodados não prejudique nem a parte aérea da planta como o sistema radicular.

Essa acurácia do posicionamento é necessária durante toda a jornada de trabalho, ou seja, durante 24 horas por dia, já que na época de colheita, as frentes não param, e se dividem em turnos de 8 horas, normalmente. No caso deste trabalho, todas as colhedoras foram equipadas com sistema de direcionamento automático para que os erros que eventualmente pudessem ocorrer nas colhedoras não interferissem no deslocamento dos transbordos, e consequentemente na mensuração dos erros derivados do conjunto.

A exportação dos dados, bem como organização e análises foram realizadas nos programas AutoCAD (Autodesk, San Rafael, EUA) e QGIS (Open Source Geospatial Foundation, Beaverton, EUA). O organograma apresentado na Figura 10 indica as etapas desde a coleta até a análise descritiva dos dados.

Figura 10. Organograma da organização das etapas do processamento dos dados.

Os dados advindos do campo necessitaram de um pré-tratamento para remoção dos percursos em que o transbordo não estava acompanhando a colhedora, já que a gravação desses dados é contínua, ou seja, são registradas tanto as linhas de deslocamento como as manobras realizadas na área (1). Após a remoção desse excesso de dados (2) e a exportação dos dados de percurso em formato Shapefile (.shp) (3), as coordenadas foram convertidas para sistema métrico Universal Transversa de Mercator (UTM) na plataforma do QGIS (4) e posteriormente as linhas foram convertidas em pontos (5) para que o arquivo ficasse apto a ser inserido no programa de paralelismo (6). Os arquivos foram comparados aos pares: trator com a linha de referência (linha advinda do pós processamento do plantio), trator com a carreta de transbordo 1, e trator com a carreta de transbordo 2. Após a saída dos dados do programa (7), estes foram ordenados em planilhas (8) e foi realizada a análise dos pontos extraídos a espacialização destes para observações (9) e, então, foi realizada a análise descritiva e estatística dos dados (10).

Os erros entre as passadas foram avaliados pela diferença da distância ortogonal entre os pontos de posição das antenas, no centro do trator e de cada carreta e a linha referência planejada, utilizando o algoritmo desenvolvido por Spekken et al. (2014). Este é a base para a criação de um modelo utilizado em pós-processamento, que compara o deslocamento entre duas sequências de segmentos de linha (conhecidas também como polilinhas). Deste modo, um grupo de polilinhas é utilizado como referência absoluta e esta pode ser derivada tanto de um modelo projetado previamente (percurso pré-planejado) ou advindo de uma medida de campo precisa o suficiente, adquirida com base em sinal GNSS RTK, por exemplo. O outro grupo é o dos percursos realizados pelo equipamento durante a colheita ao longo das linhas, que serão sujeitas a avaliação de posicionamento. Ambas as polilinhas são sequências de pontos obtidas em coordenadas métricas (UTM). A distância ponto a ponto é obtida através do Teorema de Pitágoras e a distância entre ponto e linha é obtida por álgebra Euclidiana (Figura 11).

Figura 11. Procedimento utilizado para recuperar a distância entre a linha de referência e o ponto P do percurso.

Fonte: Spekken et al. (2014).

O modelo então, passa ao longo dos pontos obtidos pelo percurso realizado recuperando as coordenadas do ponto. Este ponto terá sua distância obtida de todos os pontos do grupo da referência absoluta (distância ponto-a-ponto) e de todos os segmentos de linha, pares sequenciados de pontos, do mesmo grupo (distância ponto-a-linha). A distância mínima obtida de um destes dois pares de distâncias determina o desvio do ponto do percurso realizado para com a referência (MOLIN et al., 2011; SPPEKEN et al., 2014).

Os erros de percurso de cada rodado do conjunto foram obtidos e a partir desses erros definiu-se a modelagem geométrica (deslocamento de cada eixo do conjunto articulado) que, de acordo com os resultados obtidos em relação aos percursos estudados, permitiu entender os desalinhamentos como função da posição do eixo no conjunto, do percurso e condições de inclinação do terreno. Os desvios ϵ em relação à trajetória são

representados na Figura 12, onde, por exemplo, ϵ_1 é o desvio sofrido pelo último eixo da primeira carreta e ϵ_2 é o desvio sofrido pelo último eixo da segunda carreta.

Figura 12. Representação gráfica da posição relativa dos eixos em relação à referência (desvios) em percurso reto (a) e percurso curvo (b).

A trajetória de um sistema de auto direcionamento é avaliada por critérios como o estabelecido pela norma ASABE/ISO 12188-2: 2012. Esta estipula procedimentos para que seja efetuado o teste para sistemas de posicionamento e orientação na agricultura em situações de percurso retilíneo e em nível.

Para o cálculo do erro transversal à trajetória (XTE), as amostras de localização que representam o percurso do veículo, devem ser representadas num sistema de coordenadas cartesianas (X,Y). Embora alguns equipamentos que gravam a localização de gravação possam fornecer diretamente as coordenadas em sistema cartesiano, outros (como o usado nesta avaliação, por exemplo) fornecem saída sob a forma de coordenadas de latitude e longitude. A norma ISO 12188-1: 2010 (ISO, 2010) fornece uma metodologia para transformação desses dados, como descrito pelas equações 1 e 2. Neste trabalho, no entanto, assim como explicado no organograma da Figura 14, a conversão das coordenadas de latitude e longitude foram transformadas para o sistema de coordenadas cartesianas utilizando o software QGIS (Open Source Geospatial Foundation, Beaverton, EUA).

$$F_{lon} = \frac{\pi}{180^\circ} \left(\frac{a^2}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} + h \right) \cos \varphi \quad \text{eq. (1)}$$

$$F_{lat} = \frac{\pi}{180^\circ} \left(\frac{a^2 b^2}{(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} + h \right) \quad \text{eq. (2)}$$

F_{lat} e F_{long} - são fatores de conversão específicos de localização usados para converter os componentes de latitude e longitude de um registro de dados de navegação em coordenadas cartesianas expressas em metros

As equações correspondentes ao caso de um percurso retilíneo desejado, podem ser obtidas deixando R_1 aproximar-se do infinito com $\sigma=1$. Enquanto que para descartar atribuições circulares sem sentido, o raio R_1 deve satisfazer a desigualdade $R_1^2 > L_2^2 - c^2$.

3.4. Análise dos dados

A partir do momento que os dados referentes aos erros foram disponibilizados, estes foram processados e analisados por estatística descritiva, obtendo-se o erro médio, mediana e o desvio padrão (σ) para todos os componentes do conjunto, ou seja, colhedora, trator e em cada uma das carretas de transbordo.

Considerando-se que a linha de cana no momento do corte tenha aproximadamente 0,40 m de largura ocupada pelos perfilhos, Ripoli e Ripoli (2009) consideraram que uma distância mínima de 0,25 m entre a extremidade do rodado mais próximo à linha de cana e o centro desta, o "afastamento de segurança" que deve ser respeitado será de 0,15 m (BELARDO et al., 2015).

Nas operações os transbordos tinham o rodado com 3,50 m de largura (extremidade dos pneus) para o plantio com 1,5 m de largura de entrelinhas com uma linha sob o centro do conjunto, de maneira que em condições ideais, havia um espaço de 0,25 m entre o rodado e a linha de cana.

Deste modo, utilizando as dimensões dos elementos do conjunto e a distância de desenvolvimento dos perfilhos, encontram-se valores para a margem de erro aceitável para cada parte do conjunto. Para a colhedora, a margem é de 0,12 m enquanto que para as carretas de transbordo, essa margem fica em 0,22 m, quando o plantio é efetuado no espaçamento de 1,50 m (MONACO JÚNIOR, 2011). Sendo assim, qualquer desvio de trajetória acima desses valores já estará causando danos à soqueira.

Com relação aos valores de 2σ que indicam 95% de probabilidade de ocorrência, considerando os valores propostos por Ripoli e Ripoli (2009) e Belardo et al. (2015), o "afastamento de segurança" imposto pela usina na qual foram realizados os experimentos é de 0,10 m. Salienta-se o fato que as citações se referem à sobreposição na linha de cana (dano direto), porém quanto mais próximo da linha, maior é o dano devido a compactação na região de maior enraizamento (dano indireto).

Além disso, foi utilizado o levantamento topográfico das áreas dos experimentos, a fim de obter os valores da declividade do terreno, tanto na média para a área como em situações pontuais. A Figura 14 apresenta o mapa de isolinhas das áreas do Experimento 3. Foram criadas linhas que seccionavam a cada 100 m de distância cada uma das áreas. Deste modo, cada linha vermelha na figura representa um valor de declividade (Tabela 2).

Figura 14. Mapa de declividade pontual em cada uma das áreas do Experimento 3 mostrando as isolinhas de cotas verticais a cada 1 m com perpendiculares a cada 100 m.

Tabela 2. Declividade do terreno em cada uma das linhas referentes as áreas do Experimento 3.

Experimento 3												
	A 3.1			A 3.2			A 3.3					
Divisões	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4	5	6
Declividade do terreno (%)	7	5	5	5	7	8	10	9	9	8	4	3

Dentro de cada uma das áreas, foram escolhidas as linhas que tivessem o maior e menor valor de declividade e que fossem mais representativas dentro da área (distância entre as bordaduras da área). Deste modo, foram criadas faixas de 20 m (Figura 15) e realizada a análise estatística descritiva dos erros para cada uma dessas faixas, buscando observar o efeito da declividade na qual o conjunto foi submetido.

Figura 15. Faixa de abrangência das linhas escolhidas, de menor e maior declividade do terreno, dentro das áreas amostradas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Linhas de percurso

A Figura 16 apresenta os dados brutos coletados dos percursos dentro das áreas do Experimento 1. Os dados foram processados, e retirados os percursos no entorno do limite das áreas, o que contemplou também a retirada das manobras realizadas nos carregadores. A Figura 17 mostra o percurso do conjunto com o contorno das áreas (a) e posteriormente utilizou-se o contorno como base para recortar os dados e retirar o que não fazia parte dos percursos internos de coleta, ou seja, os dados que seriam analisados (b).

Figura 16. Dados brutos coletados do caminhamento realizado pelo conjunto.

Figura 17. Antes e depois da retirada dos dados de percurso externo ao limite do talhão

4.2. Impacto do relevo no direcionamento manual em função dos tipos de percurso

O Experimento 1 levou em consideração a utilização apenas do direcionamento manual, tendo como base os relevos plano e inclinado, e percursos retilíneos e em curva. A Tabela 3 mostra os erros encontrados para cada

uma das áreas: terreno plano (inclinação média de 2%) com percurso retilíneo (A 1.1), terreno declivoso (inclinação média de 9%) com percurso retilíneo (A 1.2) e terreno declivoso (inclinação média de 9%) e percurso em curva (A 1.3). Os dados dispostos na forma de gráficos de frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada uma das situações são apresentados na Figura 18.

Tabela 3. Erros entre passadas do trator e de cada carreta transbordo no seu terceiro eixo para cada uma das áreas estudadas.

A 1.1 (terreno plano e percurso reto)			
	Trator	Transbordo 1	Transbordo2
N	817	817	817
Erro mínimo (m)	0,001	0,001	0,001
Erro máximo (m)	0,177	0,484	0,590
Média (m)	0,083	0,109	0,129
CV (%)	114,4	122,0	126,3
σ (m)	0,095	0,133	0,163
2σ (m)	0,190	0,266	0,326
A 1.2 (terreno declivoso e percurso reto)			
N	1257	1257	1257
Erro mínimo (m)	0,002	0,001	0,002
Erro máximo (m)	0,699	0,997	1,330
Média (m)	0,426	0,473	0,521
CV (%)	90,8	99,5	113,0
σ (m)	0,387	0,471	0,589
2σ (m)	0,774	0,942	1,178
A 1.3 (terreno declivoso e percurso curvo)			
N	2013	2013	2013
Erro mínimo (m)	0,054	0,001	0,001
Erro máximo (m)	1,49	1,483	1,496
Média (m)	0,447	0,533	0,549
CV (%)	102,6	106,0	114,2
σ (m)	0,459	0,565	0,627
2σ (m)	0,918	1,130	1,254

N: Número de pontos; CV (%): Coeficiente de variação; σ : Desvio padrão; 2σ : 95% de probabilidade de erro

Considerando valores propostos por Ripoli e Ripoli (2009) e Belardo et al. (2015), o "afastamento de segurança" imposto pela usina na qual foram realizados os experimentos é de 0,10 m. Sendo assim, qualquer desvio de trajetória que seja acima desses valores já estará causando danos à soqueira. Os erros de alinhamento observados no eixo dianteiro do trator quando comparados com a trajetória projetada em A 1.1, estão dentro do aceitável em terreno plano para os valores médios dos erros, no entanto, quando observado o valor para 2σ , este está 0,09 m acima do aceitável.

Figura 18. Frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada parte do conjunto trator e carreta de transbordo para a terreno plano e percurso reto (A 1.1), terreno declivoso e percurso reto (A 1.2) e terreno declivoso e percurso curvo (A 1.3).

Observa-se que os valores dos erros do trator passam a se acentuar conforme a mudança de relevo (A 1.2) e de percurso (A 1.3), chegando a aumentos de 7,75 e 9,19 vezes acima do aceitável para as áreas, respectivamente. Em relação aos erros dos transbordos, verifica-se que em todos cenários os valores estão acima do aceitável. Além disso, estes valores também se acentuam conforme se altere o tipo de percurso e relevo.

Observa-se também que os valores do eixo 3 na carreta 2 são sempre superiores em relação aos valores encontrados no eixo 3 da carreta 1. Em A 1.3, com terreno inclinado e trajetória curva, os valores de erros no terceiro eixo da última carreta de transbordo são da ordem de 1,155 m acima do aceitável, praticamente sobre a linha de cana adjacente. Para a área de relevo plano e percurso reto, esse valor é de 0,226 m, já sobre a soqueira de cana.

No intuito de avaliar o efeito da inclinação nos desalinhamentos do conjunto, faixas foram criadas dentro da área e selecionadas as de maior e menor declividade pontual. Os valores encontrados são apresentados nas Tabelas 4 a 6, para cada uma das faixas de abrangência.

Tabela 4. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 1.1.

A 1.1 (inclinação 2%)			
Direcionamento manual			
	Trator	Transbordo 1	Trasbordo 2
N	120	120	120
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,314	0,571	0,702
Média (m)	0,089	0,123	0,150
CV (%)	128,1	141,9	158,3
σ (m)	0,114	0,175	0,238
2σ (m)	0,228	0,349	0,475
A 1.1 (inclinação 3%)			
N	189	189	189
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,326	0,475	0,751
Média (m)	0,12	0,138	0,166
CV (%)	105,8	138,4	160,5
σ (m)	0,127	0,191	0,267
2σ (m)	0,254	0,382	0,533

Tabela 5. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 1.2.

A 1.2 (inclinação 4%)			
Direcionamento manual			
	Trator	Transbordo 1	Trasbordo 2
N	104	104	104
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,252	0,458	0,702
Média (m)	0,092	0,135	0,168
CV (%)	135,3	173,3	163,4
σ (m)	0,125	0,234	0,275
2σ (m)	0,249	0,468	0,549
A 1.2 (inclinação 9%)			
N	94	94	94
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,685	1,197	1,376
Média (m)	0,381	0,503	0,574
CV (%)	91,7	108,3	103,7
σ (m)	0,350	0,545	0,596
2σ (m)	0,699	1,089	1,191

Tabela 6. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 1.3.

A 1.3 (inclinação 5%)			
Direcionamento manual			
	Trator	Transbordo 1	Trasbordo 2
N	43	43	43
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,281	0,515	0,703
Média (m)	0,087	0,129	0,176
CV (%)	139,7	148,4	160,2
σ (m)	0,122	0,192	0,282
2σ (m)	0,243	0,383	0,564
A 1.3 (inclinação 10%)			
N	76	76	76
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,985	1,429	1,453
Média (m)	0,262	0,409	0,560
CV (%)	120,3	132,0	103,4
σ (m)	0,315	0,540	0,579
2σ (m)	0,630	1,080	1,158

Os valores dos erros mostram que o relevo é um fator de forte influência para o deslocamento do conjunto no sentido da inclinação. Constatou-se que além da declividade do terreno ser um fator relevante, o tipo de percurso também é um causador de desalinhamento para o conjunto.

A Figura 19 apresenta a espacialização dos dados dos erros de desalinhamento do último transbordo do conjunto. Observou-se que os maiores desvios ocorreram em terreno inclinado e nesse caso os erros são maiores em percursos curvos, pois as carretas de transbordo têm a tendência de diminuir o raio de curvatura.

Figura 19. Mapa de espacialização dos erros de desalinhamento para o segundo transbordo no Experimento 1.

Estudo realizado por Backman et al. (2010) mostra que em percursos curvos as carretas tendem a sofrer desvios em relação à trajetória do trator, aumentando com a inclinação do terreno. Braunbeck e Oliveira (2006) abordaram esse fato mostrando que os veículos de pneus retratam uma tendência de deslocamento lateral, no sentido da declividade do terreno.

Dentre todos os fatores que afetam os erros de percursos, dois se destacaram: relevo e tipo de percurso. Estes são de extrema importância e devem ser levados em consideração para cálculos de trajetória, e posteriormente para elaboração de percursos pré-programados de direcionamento automático, em controle de tráfego e na logística interna em áreas agrícolas.

Quando realizado o comparativo do direcionamento automático em relação ao manual em relevo plano e percurso reto, observa-se que a utilização do direcionamento automático auxilia para a diminuição do desalinhamento. Enquanto que, analisando o efeito da inclinação para cada um dos direcionamentos, quando é utilizado o sistema de direcionamento automático para todos os cenários, a inclinação, mesmo que pequena (de 2%), surte efeito para o direcionamento automático. Já no direcionamento manual, tal inclinação não surtiu efeito nesses dois casos. Estudos realizados por Braunbeck e Oliveira (2006) mostram a influência da inclinação no chão em pneus de veículos com direção manual e retratam uma tendência de deslocamento lateral para a inclinação do terreno, o que torna necessário corrigir continuamente a trajetória pela direção.

Em terrenos inclinados, com percursos curvos, existe outro fator que desempenha importante papel na linha de percurso. Nas curvas, para acompanhá-las, os transbordos e mesmo o trator tendem a fazê-las em um ângulo mais fechado ou aberto dependendo se esta é feita no sentido da maior ou menor inclinação. Nessas situações, o erro aumenta consideravelmente, pois soma-se mais um fator influenciando juntamente à inclinação. É uma situação na qual o direcionamento automático perde muito sua eficácia, pois não consegue corrigir os erros que são inerentes ao tipo de percurso do conjunto articulado. Abu-Hamdeh e Al-Jalil (2004) realizaram simulações computacionais para a estabilidade e o controle de um trator-trailer em diferentes condições operacionais e concluíram que é a força de tração que orienta o conjunto quando este está em leve declive (3,33% de declividade) enquanto que em encostas íngremes, ele se move na direção da inclinação pela ação de seu próprio peso.

4.3. Comparativo do direcionamento automático em relação ao manual em relevo plano

O Experimento 2 levou em consideração a comparação entre o direcionamento manual e o direcionamento automático, tendo como base o relevo plano, a fim de mostrar os desvios sofridos pelo conjunto em ambos os direcionamentos sem que o relevo sofresse alterações bruscas de declividade. A 0 mostra a estatística descritiva dos erros encontrados para cada uma das áreas dentro do Experimento 2: terreno com inclinação média de 1% (A 2.1), terreno com inclinação média de 2% (A 2.2) e terreno com inclinação média de 2% (A 2.3).

Tabela 7. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo nas áreas estudadas em cada um dos tipos de direcionamento.

A 2.1 (inclinação média 1%)						
	Direcionamento automático			Direcionamento manual		
	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2
N	2311	2311	2311	2570	2570	2570
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,148	0,223	0,331	0,256	0,377	0,634
Média (m)	0,019	0,086	0,108	0,113	0,133	0,159
CV (%)	163,1	115,1	123,1	98,2	142,1	153,4
σ (m)	0,031	0,099	0,133	0,111	0,189	0,244
2σ (m)	0,062	0,198	0,266	0,222	0,378	0,488
A 2.2 (inclinação média 2%)						
N	1304	1304	1304	1755	1755	1755
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,185	0,273	0,400	0,285	0,416	0,705
Média (m)	0,026	0,092	0,116	0,127	0,147	0,151
CV (%)	169,2	130,4	122,4	125,1	129,2	162,9
σ (m)	0,044	0,120	0,142	0,159	0,190	0,246
2σ (m)	0,088	0,240	0,284	0,319	0,380	0,492
A 2.3 (inclinação média 2%)						
N	980	980	980	836	836	836
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,000
Erro máximo (m)	0,132	0,202	0,379	0,394	0,508	0,765
Média (m)	0,016	0,069	0,105	0,075	0,139	0,174
CV (%)	156,2	118,8	133,3	170,6	139,5	139,6
σ (m)	0,025	0,082	0,140	0,128	0,194	0,243
2σ (m)	0,050	0,164	0,280	0,256	0,388	0,486

N: Número de pontos; CV (%): Coeficiente de variação; σ : Desvio padrão; 2σ : 95% de probabilidade de erro

Quando observado os valores para o trator utilizando o sistema de direcionamento automático, estes estão bem abaixo do limite aceito para os 2σ e próximo ao valor que o fabricante indica. Enquanto que quando submetido ao direcionamento manual, os valores aumentam consideravelmente e chegam a três vezes acima do aceitável.

Para os transbordos, mesmo quando utilizado o sistema de direcionamento automático, os valores estão acima de 0,10 m. No entanto, observa-se que os erros tanto para o primeiro como para o segundo transbordo se mantêm próximos para todas as áreas do Experimento 1, ficando em média 2,5 vezes para o sistema de direcionamento e quatro vezes para o manual.

A Figura 20 apresentam a frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada uma das áreas de acordo com o sistema de direcionamento utilizado. Observa-se que para a A 2.2 com direcionamento automático acionado, a curva de frequência de ambos os transbordos permanece muito próximas, idem para a A 2.1. Também se

observa que os valores se estagnam rapidamente para os três casos, e que a maioria dos erros (aproximadamente 90%) estão entre os 0,00 a 0,10 m para trator. Já para o direcionamento manual, esse valor passa a ser de 0,30 m.

Figura 20. Frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada parte do conjunto trator e carreta transbordo para cada uma das declividades estudadas (A 2.1, A 2.2 e A 2.3) em ambos os direcionamentos.

Como realizado no Experimento 1, faixas foram criadas dentro da área, buscando a maior e menor declividade dentro dela. As Tabelas 8 a 10 apresentam os valores dos erros entre passadas do conjunto para as diferentes inclinações e análise descritiva destas. Nessa área, os valores de inclinação não ultrapassam 2%.

Tabela 8. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 2.1.

A 2.1 (inclinação 1%)						
	Direcionamento automático			Direcionamento manual		
	Trator	Transbordo 1	Trasbordo 2	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2
N	110	110	110	142	142	142
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,127	0,183	0,325	0,245	0,490	0,667
Média (m)	0,012	0,061	0,081	0,097	0,119	0,138
CV (%)	200,1	131,1	137,9	110,0	143,1	176,2
σ (m)	0,024	0,080	0,112	0,106	0,170	0,242
2σ (m)	0,049	0,161	0,224	0,213	0,340	0,485
A 2.1 (inclinação 2%)						
N	344	344	344	433	433	433
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,150	0,199	0,348	0,377	0,639	0,731
Média (m)	0,021	0,085	0,107	0,104	0,126	0,141
CV (%)	149,0	116,7	123,7	125,9	153,3	188,5
σ (m)	0,031	0,099	0,133	0,131	0,193	0,265
2σ (m)	0,063	0,198	0,265	0,262	0,387	0,530

Tabela 9. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 2.2.

A 2.2 (inclinação 1%)						
	Direcionamento automático			Direcionamento manual		
	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2
N	181	181	181	101	101	101
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,127	0,222	0,260	0,236	0,464	0,653
Média (m)	0,018	0,066	0,080	0,088	0,098	0,119
CV (%)	202,8	144,8	139,4	103,6	167,8	179,6
σ (m)	0,036	0,095	0,112	0,091	0,165	0,214
2σ (m)	0,073	0,190	0,223	0,182	0,330	0,427
A 2.2 (inclinação 2%)						
N	184	184	184	85	85	85
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,140	0,260	0,280	0,392	0,635	0,715
Média (m)	0,022	0,093	0,109	0,109	0,126	0,174
CV (%)	189,2	124,3	123,8	120,6	136,2	143,8
σ (m)	0,041	0,115	0,135	0,132	0,172	0,250
2σ (m)	0,082	0,231	0,269	0,264	0,344	0,501

Tabela 10. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 2.3.

A 2.3 (inclinação 1%)						
	Direcionamento automático			Direcionamento manual		
	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2
N	61	61	61	93	93	93
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,006	0,000
Erro máximo (m)	0,145	0,229	0,360	0,211	0,467	0,588
Média (m)	0,016	0,089	0,097	0,073	0,121	0,140
CV (%)	239,6	120,8	143,8	122,2	148,9	188,4
σ (m)	0,037	0,108	0,140	0,090	0,180	0,263
2σ (m)	0,074	0,215	0,279	0,179	0,360	0,526
A 2.3 (inclinação 2%)						
N	54	54	54	55	55	55
Erro mínimo (m)	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,132	0,202	0,280	0,173	0,438	0,659
Média (m)	0,015	0,062	0,076	0,054	0,118	0,135
CV (%)	203,5	141,1	137,0	148,8	134,6	146,0
σ (m)	0,031	0,088	0,104	0,080	0,159	0,197
2σ (m)	0,063	0,175	0,208	0,159	0,318	0,394

As análises apresentam os erros médios e 2σ de cada uma das faixas de abrangência. Observa-se que, em direcionamento automático, os erros de direcionamento do trator estão dentro do limite aceito. Quando em direcionamento manual, esses valores aumentam, mesmo com o percurso retilíneo e com baixa inclinação. Constatou-se que com pequenas inclinações laterais o acionamento do sistema de direcionamento automático surte efeito no mesmo no último transbordo. No entanto, quando o direcionamento passa a ser manual, esses erros aumentam em até cinco vezes acima do aceito. Em relevo inclinado e percurso reto, observou-se que para todas as áreas a utilização do direcionamento automático minimiza os desalinhamentos em todas as partes do conjunto (Figura 21).

Figura 21. Espacialização dos erros de desalinhamento para o direcionamento automático (a) e manual (b) no segundo transbordo para o Experimento 2.

Um fato um tanto inesperado são os desalinhamentos em percursos retos e em relevo plano. Isso provavelmente se deve a irregularidades do microrelevo (sulcos, linhas de cana e pequenas ondulações no terreno) que interferem na trajetória, causando alterações no percurso. Nessas situações, os operadores não efetuam correções no direcionamento das máquinas, pois estes apenas seguem marcações no solo efetuadas pela passagem anterior; além disso, são situações pontuais não percebidas pelo operador, porém são relevantes. A correção automática é feita a partir da trajetória pré-determinada e não em relação ao tipo do relevo e busca seguir o mais fielmente as linhas pré-planejadas.

4.4. Comparativo do direcionamento automático em relação ao manual em relevo inclinado

O Experimento 3 considerou a comparação entre o direcionamento manual e o automático, porém neste caso, os relevos estudados eram declivosos, tendo como intuito mostrar os desvios sofridos pelo conjunto em ambos os direcionamentos, quando ocorre alterações na declividade do terreno. Os resultados da estatística descritiva, apresentados na Tabela 11, mostram os erros entre passadas para cada componente do conjunto (trator, carreta de transbordo 1 e carreta de transbordo 2) referente às três áreas experimentais para os valores encontrados com e sem o sistema de direção automática.

Tabela 11. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo nas áreas estudadas em cada um dos tipos de direcionamento.

A 3.1 (inclinação média 5%)						
	Direcionamento automático			Direcionamento manual		
	Trator	Transbordo 1	Trasbordo 2	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2
N	523	523	523	503	503	503
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
Erro máximo (m)	0,154	0,249	0,537	0,320	0,899	0,980
Média (m)	0,022	0,058	0,094	0,090	0,113	0,164
CV (%)	140,9	137,9	130,8	140,0	111,2	164,6
σ (m)	0,031	0,080	0,123	0,126	0,148	0,270
2σ (m)	0,062	0,160	0,246	0,252	0,296	0,540
A 3.2 (inclinação média 7%)						
N	456	456	456	436	436	436
Erro mínimo (m)	0,000	0,001	0,000	0,000	0,047	0,000
Erro máximo (m)	0,230	0,269	0,407	0,422	0,867	1,485
Média (m)	0,024	0,097	0,103	0,116	0,168	0,200
CV (%)	133,3	121,6	132,0	118,9	99,4	138,5
σ (m)	0,032	0,118	0,136	0,138	0,167	0,277
2σ (m)	0,064	0,236	0,272	0,276	0,334	0,555
A 3.3 (inclinação média 8%)						
N	1491	1491	1491	1055	1055	1055
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,002	0,000	0,003	0,000
Erro máximo (m)	0,240	0,481	0,575	0,347	1,287	1,460
Média (m)	0,023	0,098	0,147	0,146	0,229	0,243
CV (%)	182,6	131,7	123,8	119,8	100,0	127,1
σ (m)	0,042	0,170	0,182	0,175	0,229	0,309
2σ (m)	0,084	0,341	0,364	0,358	0,458	0,618

N: Número de pontos; CV (%): Coeficiente de variação; σ : Desvio padrão; 2σ : 95% de probabilidade de erro

Os erros de alinhamento observados no trator com o uso do sistema de direção automática quando comparados às trajetórias projetadas estão dentro do intervalo aceitável para as três áreas. No entanto, ao observar os valores dos erros de percurso com o direcionamento manual, estes chegam a até 0,15 m acima do intervalo aceito. Entretanto, quando observados os valores obtidos para A 3.2 e A 3.3 sem o uso de direcionamento automático, com uma ligeira diferença de inclinação lateral, os erros aumentaram 0,10 m. A Figura 22 apresentam os gráficos de frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada uma das áreas separando de acordo com o sistema de direcionamento utilizando.

Figura 22. Frequência acumulada (probabilidade) dos erros para cada parte do conjunto trator e carreta transbordo para cada uma das declividades estudadas (A 3.1, A 3.2 e A 3.3) em ambos os direcionamentos.

Quanto aos erros dos transbordos, verifica-se que em todos os terrenos os valores estão acima do aceitável. Além disso, os valores do terceiro eixo no segundo transbordo são sempre maiores em relação aos valores encontrados no terceiro eixo do transbordo 1, indicando o efeito do desalinhamento lateral causado pela inclinação.

Assim como nos demais experimentos, foram criadas faixas de declividade e realizada a estatística descritiva de cada uma, a fim de obter os valores de 2σ pontualmente dentro da faixa de menor e maior declividade da área. As Tabelas de 12 a 14 mostram os valores obtidos dentro da faixa de abrangência para cada uma das diferentes inclinações de maior e menor declividade dentro das áreas estudadas.

Tabela 12. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 3.1.

A 3.1 (inclinação 5%)						
	Direcionamento automático			Direcionamento manual		
	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2
N	122	122	122	36	36	36
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,195	0,301	0,494	0,346	0,569	0,669
Média (m)	0,015	0,080	0,102	0,080	0,135	0,174
CV (%)	185,1	152,4	165,9	155,4	147,5	158,0
σ (m)	0,028	0,121	0,168	0,125	0,199	0,276
2σ (m)	0,056	0,243	0,337	0,250	0,399	0,551
A 3.1 (inclinação 7%)						
N	41	41	41	35	35	35
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008
Erro máximo (m)	0,266	0,525	0,889	0,469	0,724	0,784
Média (m)	0,029	0,125	0,141	0,165	0,186	0,297
CV (%)	217,5	179,9	175,0	143,1	190,7	127,3
σ (m)	0,063	0,224	0,246	0,236	0,355	0,379
2σ (m)	0,125	0,448	0,492	0,471	0,710	0,757

Tabela 13. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 3.2.

A 3.2 (inclinação 5%)						
	Direcionamento automático			Direcionamento manual		
	Trator	Transbordo 1	Trasbordo 2	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2
N	56	56	56	41	41	41
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003
Erro máximo (m)	0,178	0,350	0,414	0,243	0,601	0,807
Média (m)	0,018	0,101	0,132	0,091	0,141	0,156
CV (%)	194,8	142,5	144,5	124,7	160,8	173,7
σ (m)	0,035	0,143	0,191	0,114	0,227	0,271
2σ (m)	0,069	0,287	0,382	0,228	0,454	0,543
A 3.2 (inclinação 8%)						
N	50	50	50	48	48	48
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,246	0,460	0,599	0,393	0,541	0,838
Média (m)	0,046	0,129	0,161	0,121	0,258	0,278
CV (%)	186,9	131,11	133,9	141,2	114,1	142,0
σ (m)	0,086	0,169	0,215	0,171	0,294	0,395
2σ (m)	0,172	0,337	0,431	0,342	0,588	0,789

Tabela 14. Erros entre passadas para cada parte do conjunto trator e carretas de transbordo para as diferentes inclinações dentro de cada uma das faixas de abrangência na área A 3.3.

A 3.3 (inclinação 4%)						
	Direcionamento automático			Direcionamento manual		
	Trator	Transbordo 1	Trasbordo 2	Trator	Transbordo 1	Transbordo 2
N	73	73	73	50	50	50
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,209	0,292	0,352	0,260	0,315	0,597
Média (m)	0,026	0,073	0,111	0,094	0,151	0,170
CV (%)	196,0	156,6	123,8	130,3	115,5	163,3
σ (m)	0,029	0,114	0,137	0,122	0,174	0,278
2σ (m)	0,580	0,229	0,274	0,245	0,348	0,555
A 3.3 (inclinação 9%)						
N	123	80	80	76	76	76
Erro mínimo (m)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Erro máximo (m)	0,553	0,704	0,910	0,963	1,398	1,423
Média (m)	0,052	0,189	0,207	0,216	0,358	0,426
CV (%)	333,4	176,6	212,8	140,2	146,4	134,0
σ (m)	0,101	0,333	0,441	0,303	0,524	0,570
2σ (m)	0,202	0,667	0,882	0,606	1,048	1,141

Quando observados os menores valores de declividade do terreno encontrados para as áreas, o direcionamento automático mostrou-se útil, já que conseguiu manter o trator dentro do erro esperado. No entanto, à medida que a inclinação lateral se acentua, mesmo quando o sistema de direcionamento automático acionado, os valores de erro de percurso estão acima do aceitável. Para a área A 3.3, na faixa que tem 9% de inclinação, os valores passam a ficar quatro vezes acima do aceito para o trator.

Os mapas da espacialização dos dados de erros de desalinhamento mostram os valores encontrados para o terceiro eixo do último transbordo nas situações estudadas de direcionamento automático e manual (Figura 23).

Figura 23. Espacialização dos erros de desalinhamento para o direcionamento automático (a) e manual (b) no segundo transbordo para o Experimento 3.

Para o direcionamento manual, em todas as inclinações estudadas, o conjunto inteiro sofre desalinhamento, tendo sempre o último transbordo, os piores valores, chegando a passar em cima da linha adjacente que estão colhendo. Da mesma forma, pode-se considerar que o direcionamento automático perde a importância, pois mesmo que este esteja acionado, desvios no trajeto podem ocorrer para o trator. Para os transbordos, em especial no último, é evidente que o sistema de direcionamento automático não consegue controlar os desvios sofridos.

À medida que são correlacionados os efeitos da inclinação para cada um dos direcionamentos, em todas as comparações que tinham áreas acima de 7% de declividade do terreno, os resultados indicam que a inclinação transversal ao percurso foi um elemento tão atuante que o uso do direcionamento automático não teve efeito. Isso indica a necessidade de se buscar alternativas tecnológicas que superem tais problemas.

Observa-se que, para minimizar os erros sofridos pelo conjunto trator-transbordo, além do uso da orientação automática no veículo de tração são necessários atuadores nos rodados ou no cabeçalho dos transbordos. Tais soluções têm sido estudadas e propostas, como é o caso de Thanpattranon et al. (2016), que propõe o uso de uma barra de engate deslizante para controlar a posição do veículo rebocado. Neste caso os resultados foram

satisfatórios para a correção da rota em diferentes aplicativos em testes controlados, porém com o uso de uma carreta só.

Vários autores (ASTOLFI et al., 2004; BACKMAN et al., 2010; KAYACAN et al., 2014) propõe soluções a partir a automatização total do conjunto, embasado na utilização de percursos pré-programados que definem a rota e os ângulos de esterçamento de todas as partes do conjunto. Porém, ainda são poucos os que testam condições mais complexas, como o caso de duas carretas rebocadas ou mesmo que os fazem ao nível de campo, já que a maioria dos trabalhos são testes em condições controladas.

Outras soluções encontradas são a utilização de veículo de transbordo montado no chassi de caminhão, que já passaram a ser adquiridos por algumas unidades produtoras. Estudos realizados por Banchi et al. (2012), analisando a operação de transbordo de cana picada, comparando as composições trator e transbordos e caminhão transbordo, observaram que economicamente o trator apresenta vantagens em relação ao caminhão, devido a logística de remanejamento destes. Além disso, modificações para ajustes de bitolas também são necessárias para a utilização de caminhões, o que acaba por encarecer a utilização destes e sem as quais torna-se inviável a prática do controle de tráfego.

Tais soluções necessitam de adequação e de estudos detalhados da dinâmica dos conjuntos, como aqueles utilizados neste estudo, além, evidentemente, de avaliações relacionadas ao custo que tais soluções podem representar, bem como dos benefícios que podem oferecer.

5. CONCLUSÕES

Nas condições desse estudo quanto aos erros de desalinhamento, observou-se que a inclinação lateral aos percursos exerce forte influência, mesmo com variações sutis na inclinação. Da mesma forma, o tipo de percurso, reto ou curvo, afeta sensivelmente os valores dos desalinhamentos, crescentes entre os corpos do conjunto. A utilização de direcionamento automático no trator mostrou-se favorável em situações de percurso reto e com declividades de até 7%. Para inclinações laterais maiores, o sistema perde a sua eficácia. Como alternativa, sugere-se avaliar sistemas com atuadores nos rodados ou no cabeçalho dos transbordos.

REFERÊNCIAS

- AUSTRALIAN CENTER FOR INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH (ACIAR). **Conservation tillage and controlled traffic**: project 9209:. Canberra, 1998. n. 10, 29 p.
- ALFONSI, R. R.; PEDRO, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar**: cultivo e utilização. São Paulo: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 42-87.
- ANTUNIASSI, U. R.; BAIO, F. H. R. Orientação de máquinas agrícolas por uma barra de luz (Outback S) utilizando algoritmo para correção do erro GPS. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão (CONBAP), 1., 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 2004.
- ANTONIOSI. **Visão Geral: ATA 14000 TriAxis**. Disponível em: <
http://www.antoniosi.com.br/website/produtos_show.php?galeria=178&prod=3>. Acesso em: 20 fev. 2017.
- AQUINO, A. F.; BIDÔ, É. S.; GALVÃO, M. L. M.; OLIVEIRA, V. N. O etanol da cana de açúcar: possibilidades energéticas da região de Ceará-Mirim-RN. **Revista Holos**, 2014. v. 1, ano. 30, p. 105-125.
- ASABE/ISO. 12188-2: **Tractors and machinery for agriculture and forestry - Test procedures for positioning and guidance systems in agriculture**. Part 2: Testing of satellitebased auto-guidance systems during straight and level travel. St. Joseph, ASABE, MI. 2012.
- ASTOLFI, A.; BOLZERN, P.; LOCATELLI, A. Path-tracking of a tractor-trailer vehicle along rectilinear and circular paths: a lyapunov-based approach. **IEEE Transactions On Robotics And Automation**, 2004. v. 20, n. 1, p. 154-160.
- BACKMAN, J.; OKSANEN, T.; VISALA, A. Nonlinear model predictive trajectory control in tractor-trailer system for parallel guidance in agricultural field operations. In: **Proceedings of the agricontrol**, Kyoto, Japan, 2010.
- BAIO, F. H. R. Aplicação de AP no plantio. In T. C. C. Ripoli, M. L. C. Ripoli, D. V. Casagrandi, & B. y. Ide (Eds.). **Plantio de cana-de-açúcar**: estado da arte. Piracicaba, 2007. v. 2. p. 92-101
- BAIO, F. H. R. **Metodologia para ensaio de sistemas de direcionamento via satélite em percursos retos e curvos**. 2005. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2005.
- BAIO, F. H. R.; ANTUNIASSI, U. R. Ensaio comparativo da acurácia de um sistema de direcionamento via satélite e por cabo de aço na orientação de máquinas agrícolas. **Energia na Agricultura**, Botucatu, 2008. v. 23, p. 60-73.
- BAIO, F. H. R.; MORATELLI, R. F. Avaliação da acurácia no direcionamento com piloto automático e contraste da capacidade de campo operacional no plantio mecanizado de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola** (Impresso), 2011. v. 31, p. 367-375
- BALASTREIRE, L. A.; BAIO, F. H. R. Avaliação do desempenho de um GPS com algoritmo otimizado sem sinal de correção para a agricultura de precisão. In: BALASTREIRE, L. A. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1998-2001**. Piracicaba: L.A. Balastreire, 2002. p.285-288.
- BAKKER, D. M.; DAVIS, R. J. Soil deformation observations in a Vertisol under field traffic. **Australian Journal of Soil Research**. Australia, 1995. v. 33, p. 817-832.
- BANCHI, A. D.; LOPES, J. R.; XAVIER, C. E. O.; MARTINS, J. M. S. Análise da operação de transbordo de cana picada, **Revista AgriMotor**, 2012, p. 6-9.

- 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**, Amsterdam, 2006. v. 53, p. 28-44.
- BEAUCLAIR, E. G. F.; SCARPARI, M. S. Noções Fitotécnicas. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. (Org.). **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Livrocere, 2006. v. 1, p. 80-91.
- BENEDINI, M. S.; CONDE, A. J. Espaçamento ideal de plantio para a colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **Copiana**, Guariba, 2008. n. 52, p. 26-28.
- BELARDO, G. C.; ROSA, J. H. M.; MAGALHÃES, P. S. G. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar: Evolução da colheita mecanizada na cultura de cana-de-açúcar. In: BELARDO, G. C.; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos agrícolas e mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal, São Paulo: SBEA, 2015. v. 1, p. 341-342.
- BELINASSO, I. F.; MORDES, E. E.; DONIZETE, J. L.; SILVA, P. C.; STRINI JÚNIOR, A. E. A compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar. In: Seminário de Tecnologia Agronômica, 6., 1994, Piracicaba. **Anais...** São Paulo: COOPERSUCAR, 1994. p. 37-66.
- BOCHTIS, D. D.; SORENSEN, C. G.; VOUGIOUKAS, S. G. Path planning for in-field navigation-aiding of service units. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 80-90, 2010.
- BORHAUG, E.; PETERSEN, K. Cross-track control for underactuated autonomous vehicles. In: 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. **Proceedings...** Piscataway, NJ: IEEE, p. 602-608. 2005.
- BRAUNACK, M. V.; ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, 2006. v. 89, p. 103-121.
- BRAUNACK, M. V.; MCGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil and Tillage Research**, 2006. v. 89, p. 86-102.
- BRAUNBECK O. A.; MAGALHÃES, P. S. G. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 300-308, jan./abr. 2006. Disponível em: <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/Auxilio_Mecanico_Colheita_Cana.pdf>. Acesso em: 20 fev 2017.
- BRUIN, S. de; LERINK, P.; KLOMPE, A.; WAL, T. van der; HEIJTING, S. Spatial optimisation of cropped swaths and field margins using GIS. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2009. v. 68, n. 2, p. 185-190.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1997, 132 p.
- CARIOU, C.; LENAIN, R.; THUÏLOT, B.; MARTINET, P. **Autonomous maneuver of a farm vehicle with a trailed equipment: Motion planner and lateral-longitudinal controllers**. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). INSPEC Accession No. 11430926, 3819-3824, 2010.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **PIB São Paulo**. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-de-sao-paulo.aspx>. Acesso em: 20 jan 2017.
- COLWICK, R. F.; BAKER, G. L.; SMITH, L. A. **Effects of controlled traffic on residual effects of subsoiling**. St. Joseph: ASAE, 1981. 16 p. (ASAE Paper, 811016).
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar. Terceiro levantamento safra 2016/17**, Brasília, 2016.

- CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CONSECANA). **Manual de instruções**. Piracicaba, 2006. 112 p.
- COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (COPERSUCAR). **Recomendação de adubação para a cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1988, 7 p.
- CORDESSES, L.; CARIOU, C.; BERDUCAT, M. Combine harvester control using Real Time Kinematic GPS. **Precision Agriculture**, The Netherlands, 2000. v. 2, p. 147-161.
- COSTA NETO, J. D. A cana em tempo bom. **Revista CREA-PR**, Curitiba, n.41, p.16-19, out. 2006.
- DE BRUIN, S.; LERINK, P.; KLOMPE, A.; VAN DER WAL, T.; HEIJTING, S. Spatial optimization of cropped swaths and field margins using GIS. **Computers and Eletronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 68, n. 2, p. 185-190, 2009.
- DIAS NETO, A. F. **Aprimoramento de um mecanismo dosador de rebolos de cana-de-açúcar para plantio mecanizado**. 2000. Dissertação (Dissertação em Mecanização Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- DeSANTIS, R. Path tracking for a tractor-trailer-like robot. **The International Journal of Robot Research**, v. 13, n. 6, p. 533-544, 1994.
- EMBRAPA. **Árvore do conhecimento - Cana-de-açúcar: Rotação e reforma**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_75_22122006154841.html>. Acesso em: 20 julho 2015.
- EMBRAPA. **Balanco energético da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e redução na emissão de gases de efeito estufa (GEEs)**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-produtos-processos-e-servicos/-/produto-servico/874/balanco-energetico-da-producao-de-etanol-a-partir-de-cana-de-acucar-e-reducao-na-emissao-de-gases-de-efeito-estufa-gees>. Acesso em: 20 jan 2016.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 1. ed. – Rio de Janeiro : EMBRAPA-SPI, 1999. 306 p.
- EASTERLY, D. R.; ADAMCHUK, V. I.; KOCHER, M. F.; HOY, R. M. Using a vision sensor system for performance testing of satellite-based tractor auto-guidance. **Computers and Eletronics in Agriculture**, Amsterdam, 2010. v. 72, p. 107-118.
- EDAN, Y.; HAN, S.; KONDO, N. **Automation in Agriculture**. In: Nof, S.Y. (Ed.), Springer Handbook of Automation. Springer, Berlin Heidelberg, 2009. p. 1095-1128.
- EHSANI, M. R.; SULLIVAN, M.; WALKER, J. T. **A method of evaluating different guidance systems**. Chicago: ASAE, 2002. (Paper No. 02-1155).
- FARINA, E.; ZYLBERSZTAJN, D. (Coord.). **Competitividade no agribusiness brasileiro**. São Paulo: PENSA; FIA; USP, FEA; IPEA, 1998. 73 p.
- FIGUEIRA, S. R. **Os programas de álcool como combustíveis nos EUA, no Japão e na União Européia e as possibilidades de exportação do Brasil**. 2005. 245 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Countries by commodities production**. Disponível em: http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 20 jan 2017.
- FREITAS, G. R. Preparo do solo. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 271-283.

- GAN-MOR, S.; CLARK, R. L. DGPS-based automatic guidance-implementation and economical analysis. In: ASABE Annual International Meeting, 2001. Sacramento. **Proceedings...** Sacramento: ASABE, 2001. p. 1-13.
- GAN-MOR, S.; CLARK, R.L.; UPCHURCH, B.L. Implement lateral position accuracy under RTK-GPS tractor guidance. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, 2007. v. 59, p. 31-38.
- GERRISH, J. B.; SURBROOK, T. C. Mobile robots in agriculture. In: **Proceedings in 1st International Conference on Robotics and Intelligent Machines in Agriculture**. St. Joseph, ASAE, 1984. p. 30-41.
- GRIFFIN, T.; LAMBERT, D.; LOWENBERG-DeBOER, J. Economics of lightbar and auto-guidance GPS navigation technologies. **Precision Agriculture**, 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/James_Lowenberg-DeBoer/publication/228737923_Economics_of_lightbar_and_auto-guidance_GPS_navigation_technologies/links/0fcfd50db451dce1a5000000.pdf>. Acesso em: 28 julho 2015.
- GROOVER, G.; GRISSO, R. **Investing in GPS guidance systems?** Virginia Cooperative Extension, Virginia Polytechnic Institute and State University, Publication 448-076. 2009.
- HADAS, A. Controlled traffic in Israel. **Acta Horticulture**, The Hague, 1987. n. 210, p. 43-67.
- HAMEED, I. A.; BOCHTIS, D. D.; SORENSEN, C. G.; NOREMARK, M. Automated generation of guidance lines for operational field planning. **Biosystems Engineering**, 2010. v. 107, n. 4, p. 294-306.
- HAMZA, M. A., ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, 2005. v. 82, n. 2, p. 121-145.
- HAN, S.; HNOH, H.K ; ZHANG, Q.; SHIN, B.S. **Dynamic Performance Evaluation of DGPS Receivers for Parallel Tracking**. St. Joseph, USA. 2002. (ASAE Paper, 023107).
- HARBUCK, T. L.; FULTON, J. P.; MCDONALD, T. P.; BRODBECK, C. J. **Evaluation of GPS autoguidance systems over varying time periods**. St. Joseph: ASABE, 2006. Disponível em: <<http://www.asabe.org>> Acesso em: 20 fev 2017.
- HEMISPHERE. **e-Dif**. Disponível em: <http://www.canalgeomatics.com/product_details.php?product_id=149>. Acesso em: 5 out. 2016.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, J.; COLLINS, J. **GPS: Teory and prattice** 3rd. edition. New York:s. 1; v. 1. 1994.
- HOLLAND, J. K; ERICKSON, B.; WIDMAR, D. A. **Precision agricultural services dealership survey results**. West Lafayette: Purdue University, Dept. of Agricultural Economics, 2013. 68 p.
- HUMBERT, R. P. **The growing of sugarcane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. 779 p.
- ISO. 12188-1: **Tractors and machinery for agriculture and forestry - Test procedures for positioning and guidance systems in agriculture**. Part 1: Dynamic testing of satellitebased positioning devices. Geneva, Switzerland: ISO. 2010.
- JIN, J.; TANG, L. Coverage path planning on three - dimensional terrain for arable farming. **Journal of Field Robotics**, 2011. v. 28, n. 3, p. 424-440.
- JIN, J.; TANG, L. Optimal path planning for arable farming. In: ASABE Annual International Meeting, 2006, Portland. **Proceedings...** St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, p. 304-312. 2006.
- JIN, J.; TANG, L. Optimal coverage path planning for arable farming on 2D surfaces. **Transactions of the ASABE**, 2010. v. 53, n. 1, p. 283.
- KAYACAN, E.; KAYACAN, E.; RAMON, H.; SAYES, W. Distributed nonlinear model predictive control of an autonomous tractor-trailer system. **Mechatronics**, 2014. v. 24, p. 926-933.

- KEER, B.; BLYTH, K. **They're all half crazy-100 years of mechanical cane harvesting**. Brisbane: Canegrowers, 1993.
- KEICHER, R.; SEUFERT, H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, 2000. v. 25, n. 1-2, p. 169-194.
- KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: an Australian appraisal. **Agricultural Systems**, 2011. v. 104, p. 513-521.
- KRUEGER, C. P. **Módulo II: Normas técnicas, geodésia e posicionamento por satélite**. Curitiba: Departamento Editorial, 2004. 111 p.
- LAGUË, C.; AGNEW, J.; KHELIFI, M. Theoretical evaluation on the feasibility of controlled-traffic farming (CTF) using wide-span implement carriers (WSIC) for Canadian agriculture. In: ANUAL MEETING OF THE CSAE/SCGR, 2003, Montréal. **Proceedings...** Montréal: CSAE/SCGR, 2003. (CSAE. Paper, 03-233).
- LIMA, T. C. B.; UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L.; NUNES, E. F. Equipamento microprocessado para geração de sinal de correção diferencial, em tempo real, para GPS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, 2006. v. 26, n. 2, p. 537-545.
- LOWENBERG-DeBOER, J. GPS based guidance systems for agriculture. **SSMC Newsletter**, West Lafayette, 16 Dec. 1999. Disponível em: <<http://www.purdue.edu/ssmc>>. Acesso em: 20 fev 2017.
- MACHADO, T. M. **Avaliação de desempenho de receptores de GPS em modo estático e cinemático**. 2008. 115 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- MAGALHÃES, P. S. G. Manejo do solo e seus efeitos sobre a compactação. In: SILVEIRA, G. M. da, coord. Cielo de Estudos sobre Mecanização Agrícola, n. 4, Jundiá, 1990. **Anais...** Campinas, Fundação Cargill, 1990, p. 157-167.
- MAGALHÃES, P. S. G.; BALDO, R. F. G.; CERRI, D. G. P. Sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo transbordo. **Engenharia Agrícola**, 2008. v. 28, n. 2, p. 274-282.
- MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A colheita de cana-de-açúcar: atualidade e perspectiva. In: Congreso de Ingeniería Rural y Mecanización Agraria em el Ambito Latinoamericano. **Anais...** La Plata: Argentina, 1998. p. 262-271.
- MASEK, J.; KROULIK, M.; CHYBA, J.; NOVAK, P.; KUMHALA, F. **Traffic intensity in fields and technical possibilities for reduction of machinery passes**. In: 21nd Annual International Scientific Conference, 2014, Latvia University of Agriculture, Jelgava, Latvia. Disponível em: http://tf.llu.lv/conference/proceedings2014/Papers/37_Masek_J.pdf. Acesso em: 16 abr 2016.
- MARCHIORI, L. F. S. **Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. 2004. 275 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- MIALHE, L. G. **Máquinas Agrícolas - Ensaios & Certificação**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários “Luiz de Queiroz”, 1996. 723 p.
- MIALHE, L. G. **Revisão sobre o tráfego no canavial e suas consequências**. In: Seminário Internacional de Mecanização e Produção de Cana-de-açúcar, 2000, Ribeirão Preto. Ribeirão Preto: IDEA, 2000. p. 22-45.
- MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. **Tráfego controlado na mecanização da cana-de-açúcar**. V Workshop Internacional Brasil-Japão em Biocombustível, Meio Ambiente e Novos Produtos da Biomassa, 2007, Campinas: Unicamp, 2007.

- MOLIN, J. P. Orientação de aeronave agrícola por DGPS comparada com sistemas convencional por bandeiras. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, 1998. v. 18, n. 2, p. 62-70.
- MOLIN, J. P.; CARREIRA, P. T. Metodologia para ensaios cinemáticos de receptores de GNSS utilizando um GPS RTK como referência. **Revista Brasileira de Agroinformática**, 2008. v. 8, n. 1, p.53-62. Disponível em: <<http://www.sbiagro.org.br/pdf/revista/rbiagro-v8n1-artigo4.pdf>>. Acesso em: 06 agosto 2015.
- MOLIN, J. P.; CERRI, D. G. P.; BAIO, F. H. R.; TORREZAN, H. F.; ESQUERDO, J. C.D.M.; RÍPOLI, M. L. C. Evaluation of a light bar for parallel swathing under different forward speeds. In: World Congress In Agriculture And Natural Resources, 2002, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** p. 190-195.
- MOLIN, J. P.; POVH, F. P.; PAULA, V. R.; SALVI, J. V. Método de avaliação de equipamentos para direcionamento de veículos agrícolas e efeito de sinais de GNSS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 121-129, jan./fev. 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v31n1/v31n1a12.pdf>>. Acesso em: 20 julho 2015.
- MOLIN, J. P.; RUIZ, E. S. R. **Accuracy of DGPS for Ground Application in Parallel Swaths**. St. Joseph, USA. 1999. (ASAE Paper, 991043)
- MONACO JUNIOR, L.C. Plantio espaçamento alternado. In: Seminário de Mecanização e Produção de Cana-de-Açúcar, 13., 2011, Ribeirão Preto, **Anais...** Ribeirão Preto, 2011.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: UNESP, 2007. 476 p.
- MORATELLI, R. F., BAIO, F. H. R. Contraste de custos das operações mecanizadas na cana-de-açúcar por um sistema de autodirecionamento via satélite versus um sistema tradicional de demarcação. In: Encontro de iniciação científica da UFMS, X, 2006, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2006.
- NEVES, J. L. M. **Avaliação de perdas invisíveis em colhedoras em cana-de-açúcar picada e alternativas para sua redução**. 2003, 233 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2003.
- O'CONNOR, M.; BELL, T. ; ELKAIM, G.; PARKINSON, B. **Automatic steering of farm vehicles using GPS**. Paper presented at the 3rd International Conference on Precision Agriculture. Minneapolis, Minn.: University of Minnesota, Precision Agriculture Center, 1996.
- OKSANEN, T.; VISALA, A. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines. **Journal of Field Robotics, Hoboken**, v. 26, n. 2, p. 651-668, 2009.
- OLIVEIRA, A. S.; COELHO, M. F.; FAULIN, M. S. A. R.; SALVI, J. V.; MOLIN, J. P. **Controle de tráfego em cana-de-açúcar mecanizada**. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 3., 2008, Piracicaba. Piracicaba: ESALQ, 2008. p. 382-392.
- OLIVEIRA, T. C. A; MOLIN, J. P. Uso de piloto automático na implantação de pomares de citros. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 334-342, mar./abr. 2011.
- PALMER, R. J.; WILD, D.; RUNTZ, K. Improving the efficiency of field operations. **Biosystems Engineering**, 2003. v. 84, n. 3, p. 283-288.
- PARANHOS, S. B. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987.
- PAULA, V. R. de; MOLIN, J. P. Assessing damage caused by accidental vehicle traffic on sugarcane ratoon. **Engineering in Agriculture**, 2013. v. 29, f. 2, p. 161-169.
- PEARCE, J. Evolução constante. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, 2006. n. 51, p. 12-13.

- PEREIRA, L. L.; TORREZAN, H. F. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NOBREGA, J. C. M. de. **Atualização em produção de cana de açúcar**. Piracicaba: CP 2m, 2006. p.333-344.
- PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM ECONOMIA E GESTÃO DE EMPRESAS (PECEGE). **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: Acompanhamento da safra 2012/2013 na região Centro-Sul**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2012. 47p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA.
- PROTOCOLO AGROAMBIENTAL DO SETOR SUCROENERGÉTICO. Governo do Estado de São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/>>. Acesso em: 25 jan. 2017.
- RAPER, R. L.; REEVES, D. W. In-row subsoiling and controlled traffic effects on Coastal plain soils. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, 2007. v. 50, n. 4, p. 1109-1115.
- REEDER, R.; SMITH, J. Controlled traffic. In: REEDER, R. C. (Ed.). **Conservation tillage systems and management**. Ames: Midwest Plan Service, p. 77-82, 2000.
- REID, J. F.; SEARCY, S. W. Automatic tractor guidance with computer vision. **SAE Technical Paper Series**, n. 871639. Warrendale, Pa.: SAE, 1987.
- RENOUF, M. A.; WEGENER, M. K.; PAGAN, R. J. Life cycle assessment of Australian sugarcane production with a focus on sugarcane growing. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2010. v. 15, n. 9, p. 927-937.
- RIPOLI, T. C. Considerações sobre a colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista de Mecanização Rural**, 1981. v. 1, n. 4, p. 31-35.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Ed. Autor, 2004. 309 p.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2009. p. 333.
- ROBOTHAM, B. G.; CHAPPELL, W. G. **High quality planting billets-whole-stalk planter billets compared to billets from modified and unmodified harvester**. In: Proceedings of Australian Society Sugar Cane Technologists, Bundaberg, 2002. v. 24, p. 1-10.
- ROQUE, A. A. de O.; SOUZA, Z. M. de; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. de. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, 2010. v. 45, n. 7, p. 744-750.
- ROUNSAVILLE, J.; DVORAK, J.; STOMBAUGH, T. Methods for calculating relative cross-track error for ASABE/ISO Standard 12188-2 from discrete measurements. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 2016. v. 59, n. 6, p. 1609-1616.
- SALVI, J. V.; MATOS, M. A.; MILAN, M. Avaliação do desempenho de dispositivo de corte de base de colhedora de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, 2007. v. 27, n. 1, p. 201-209.
- SALVI, J. V.; MOLIN, J. P.; CASARIN JÚNIOR, R. D.; SANTOS, G. N. dos; SPEKKEN, M. **Avaliação dos erros de paralelismo de um conjunto colhedora e trator-transbordo de cana de açúcar**. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão 2014, 2014, São Pedro.

- SÃO PAULO. Lei n. 11.241, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima de palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado**, São Paulo, 20 set. 2002. Seção 1, p. 2-3.
- SÃO PAULO (Estado). Decreto n. 47.700, de 11 de março de 2003. Regulamenta a Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Diário Oficial do Estado**, 12 mar. 2003.
- SEGANTINE, P. C. L. **GPS: Sistema de Posicionamento Global**. São Carlos: Suprema, 2005, 381 p.
- SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006, p. 19-36.
- SHARP, I.; YU, K. Positional accuracy measurement and error modeling for mobile tracking. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, 2012. v. 11, n. 6, p. 1021-1032. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TMC.2011.119>. Acesso em: 20 fev. 2017.
- SHOCKLEY, J.M.; DILLON, C.R. Cost savings for multiple inputs with swath control and auto guidance technologies. In: International Conference On Precision Agriculture, 9., 2008, Denver. **Proceedings...** Denver: Colorado State University, 2008.
- SILVA, C. B.; OLIVEIRA, T. C. A. de; MOLIN, J. P.; SHIROTA, R. Sistemas de Piloto Automático: Aspectos Técnicos e Econômicos. In: Simposio Internacional de Agricultura de Precisão, 4., 2007, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007.
- SPEKKEN, M.; DE BRUIN, S. Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 2, p. 224-244, 2013.
- SPEKKEN, M.; DE BRUIN, S.; MOLIN, J. P.; SPAROVEK, G. Planning machine paths and row crop patterns on steep surfaces to minimize soil erosion. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2016. v. 124, p. 194-210.
- SPEKKEN, M.; SALVI, J. V.; MOLIN, J. P. A method to evaluate paralelism for machine logged positions. In: International Conference on Robotics and Associated High-technologies and Equipament for Agriculture and Forestry (RHEA), 2., 2014, Madri. **Anais...** Madri: 2014. p. 227-237.
- SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; PRADO, R. M.; BENTO, M. J. C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, 2006. v. 34, p. 31-38.
- SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2005. v. 40, p. 271-278.
- STOLL, A.; KUTZBACH, H. D. Guidance of a forage harvester with GPS. **Precision Agriculture**, The Netherlands, 2000. v. 2, p. 281-291.
- STOMBAUGH, T.; COLE, J.; SHEARER, S.; KOOSTRA, B. A test facility for evaluating dynamic GPS accuracy. In: European Conference On Precision Agriculture, 2005, Berlin. **Proceedings...** Berlin: Wageningen Academic Publishers. 2005.
- STOMBAUGH, T.; SEARER, S. **Elements of a Dynamic Test Standard**. St. Joseph, USA. 2002. (ASAE Paper, 021150).
- STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 4, n. 3, p. 775-760, mai./jun. 2004.

- TANGNIN, R.; MATTES, D. Conversão dos biomas remanescentes em agrocombustíveis e alimentos: queimas ou comer?. **Revista de Gestão Integrada em Saúde e Trabalho e Meio Ambiente**, v. 3, n. 2, p. 01-32 abr./ago. 2008.
- TAYLOR, J. H. Benefits of permanent traffic lanes in a controlled traffic crop production system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, 1983. v. 3, n. 4, p. 385-395.
- TAYLOR, R. K.; SCHROCK, M. D.; BLOOMFIELD, G.; BORA, J.; BROCKMEIER, G.; BURTON, W.; CARLSON, B.; GATTIS, J.; GROENING, R.; KOPRIVA, J.; OLEEN, N.; NEY, J.; SIMMELINK, C.; VONDRACEK, J. Dynamic testing of GPS receivers. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 2004. v. 47, n. 4, p. 1017-1025.
- TESTON. **Gigante 22.000 BR**. Disponível em: <<http://teston.com.br/gigante-2200-br/>>. Acesso em: 20 fev. 2017.
- THANPATTRANON, P.; AHAMED, T.; TAKIGAWA, T. Navigation of autonomous tractor for orchards and plantations using a laser range finder: Automatic control of trailer position with tractor. **Biosystems Engineering**, 2016, v. 14, p. 90-103.
- THUILOT, B. Automatic guidance of a farm tractor relying on single CP-DGPS. **Autonomous Robots**, Amsterdam, 2002. v. 13, p. 53-71.
- TIM, L. C. **Efeito do manejo da palha da cultura da cana-de-açúcar nas propriedades físico-hídricas de um solo**. 2002, 127 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- TMA. **Transbordo VTT 13.000**. Disponível em: <http://www.tmamaquinas.com.br/transbordo_vtt_13.000.php>. Acesso em: 20 fev. 2017.
- TOMAZELA, J. M. Mecanização da colheita de cana: máquinas esvaziam a capital dos boias-frias. **O Estado de São Paulo**, 2017. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/mecanizacao-colheita-cana-de-acucar-maquinas-esvaziam-capital-boias-frias-220517/>. Acesso em: 10 jun. 2017.
- TREIN, C.R.; LEVIEN, R.; SOUZA, L.F.C. Tráfego controlado: pneus e compactação. **Cultivar Máquinas**, 2005. v. 41, p. 22-25.
- TREVISAN, R. G.; EITELWEIN, M. T.; VILANOVA JR., N. S.; SALVI, J. V.; PASSALAQUA, B. P.; MOLIN, J. P. **Avaliação da precisão dos sinais RTK e RTX em ensaio estático e cinemático**. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão 2014, 2014, São Pedro.
- TRIMBLE. **Descrição o piloto automático hidráulico com correção RTK**. Disponível em: <<http://www.geoagri.com.br/produtos?cod=24&cat=9>>. Acesso em: 20 fev. 2017.
- TULLBERG, J.N. Tractor-based systems for traffic control in Australia. **Landwards**, 1997. v. 52, p. 12-15.
- UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA (UDOP). **Área plantada, área colhida e produção por ano da safra e produto. Ano da Safra - Safra 2015**. Disponível em: <http://www.udop.com.br/download/estatistica/area_cultivada/2015_area_plantada_colhida_centro_sul.pdf>. Acesso em: 13 junho 2015.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **São Paulo fecha safra 2013/2014 com colheita mecanizada em 83% dos canaviais**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/6551584920310621254/sao-paulo-fecha-safra-2013-por-cento2F2014-com-colheita-mecanizada-em-83-por-cento-dos-canaviais/>>. Acesso em: 25 jan 2017.

- VEIGA, C. F. M.; VIEIRA, J. R.; MORGADO, I. F. **Diagnóstico da cadeia produtiva de cana-de-açúcar do estado de Rio de Janeiro**. 2006. Rio de Janeiro: FAPPERJ, 2006. 107 p. (Relatório de Pesquisa).
- VEIGA FILHO, A. de A.; SANTOS, Z. A. P. de S.; VEIGA, J. E. R.; OTANI, M. N.; YOSHII, R. J. Análise da mecanização do corte da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 24, n. 10, out. 1994.
- VERMEULEN, G.D.; MOSQUERA, J. Soil, crop and emission responses to seasonal-controlled traffic in organic vegetable farming on loam soil. **Soil and Tillage Research**, 2009. v. 102, p. 126-134.
- ZHANG, Q.; REID J. F.; NOGUCHI, N. Automated guidance control for agricultural tractor using redundant sensors. SAE 1999 Trans., J. **Commercial Vehicles**, 1999. v. 108, n. 2, p. 27–31.
- WELTZIEN, C.; NOACK, P. GPS receiver accuracy test – dynamic and static for best comparison of results. In: European Conference On Precision Agriculture, 2003, Berlin. **Proceedings...** Berlin: Wageningen Academic Publishers. 2003.
- WILLIFORD, J. R. A controlled-traffic system for cotton production. **Trasactions of the ASAE**, St. Joseph, 1980. v. 23, n. 1, p. 65-70.
- WILLRODT, J. Automatic tractor control. **U.S. Patent** N°. 1506706. 1924.

APÊNDICES

APÊNDICE A.

Figura 24. Mapa de declividade pontual em cada uma das áreas do Experimento 1 mostrando as isolinhas de cotas verticais a cada 1 m com perpendiculares a cada 100 m.

Tabela 15. Declividade do terreno em cada uma das linhas referentes as áreas do Experimento 1.

Experimento 1																			
	A 1.1				A 1.2					A 1.3									
Divisões	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Declividade do terreno (%)	2	2	2	3	8	9	5	4	3	7	6	5	5	5	7	10	8	8	6

Figura 25. Faixa de abrangência dos pontos escolhidos de menor e maior declividade do terreno dentro das áreas amostradas.

Figura 26. Mapa de declividade pontual em cada uma das áreas do Experimento 2 mostrando as isolinhas de cotas verticais a cada 1 m com perpendiculares a cada 100 m.

Tabela 16. Declividade do terreno em cada uma das linhas referentes as áreas do Experimento 2.

Experimento 2														
	A 2.1					A 2.2					A 2.3			
Divisões	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	2	3	4	5
Declividade do terreno (%)	2	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2

Figura 27. Faixa de abrangência dos pontos escolhidos de menor e maior declividade do terreno dentro das áreas amostradas.