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

Sistema de mensuração baseado em tecnologia LiDAR para a estimativa de
parâmetros de produção de cana-de-açúcar

Tatiana Fernanda Canata

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

Piracicaba
2017

Tatiana Fernanda Canata
Engenheira de Biosistemas

**Sistema de mensuração baseado em tecnologia LiDAR para a estimativa de parâmetros
de produção 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
2017

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

Canata, Tatiana Fernanda

Sistema de mensuração baseado em tecnologia LiDAR para a estimativa de parâmetros de produção de cana-de-açúcar / Tatiana Fernanda Canata. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

67 p.

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

1. Agricultura de precisão 2. Instrumentação 3. Monitoramento de produtividade 4. Sensor a laser I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico à minha avó e madrinha, Maria Aparecida

AGRADECIMENTOS

À Deus pelas inúmeras bênçãos derramadas em minha vida.

À minha família pela dedicação em minha educação e pelo apoio incondicional, por abrirem mão de seus sonhos para que eu pudesse realizar o meu. Que a alegria pela realização desse etapa permaneça em nosso lar.

Ao Prof. Dr. José Paulo Molin pela orientação, pelas oportunidades e pelo inefável conhecimento compartilhado.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) pelo ensino categorizado.

Aos alunos de graduação do gMAP (Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão) e aos alunos de pós-graduação do LAP (Laboratório de Agricultura de Precisão) pela convivência e pelo auxílio no desenvolvimento desse trabalho.

Aos pesquisadores e aos funcionários do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) pelo suporte e pela disponibilidade das áreas experimentais alocadas na Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) em Piracicaba, SP.

Aos membros do Grupo TopoGeo (Grupo de Pesquisa e Extensão em Topografia e Geoprocessamento) da ESALQ pelo suporte nas atividades de campo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ pelo apoio nas atividades de campo.

Aos professores da FZEA/USP (Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos) e a empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A pelo empréstimo de equipamentos.

Aos funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas da ESALQ pelo suporte acadêmico.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos.

EPÍGRAFE

“... Continuamos seguindo em frente, abrindo novas portas e fazendo coisas novas, porque somos curiosos e a curiosidade continua nos conduzindo por novos caminhos”.

Walt Disney

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. AGRICULTURA DE PRECISÃO	15
2.2. SENSORIAMENTO REMOTO	17
2.3. CONCEITO E APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA LiDAR.....	18
2.4. CANA-DE-AÇÚCAR E PARÂMETROS DE PRODUÇÃO	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. O SISTEMA DE MENSURAÇÃO	23
3.2. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS	25
3.3. INFLUÊNCIA DA VIBRAÇÃO NO CONJUNTO DE DADOS LiDAR	29
3.4. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO	30
3.5. ÁREA EXPERIMENTAL PARA OS ESTUDOS COM CANA-DE-AÇÚCAR	32
3.6. MEDIDAS DE BIOMETRIA	35
3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE CAMPO.....	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO SISTEMA DE MENSURAÇÃO.....	37
4.2. GERAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS.....	38
4.3. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE VIBRAÇÃO NO CONJUNTO DE DADOS.....	43
4.4. RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE PRODUÇÃO E O CONJUNTO DE DADOS LiDAR	45
5. CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS	55
APÊNDICES	63

RESUMO

Sistema de mensuração baseado em tecnologia LiDAR para a estimativa de parâmetros de produção de cana-de-açúcar

A participação econômica da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é expressiva no agronegócio brasileiro, especialmente no estado de São Paulo. O monitoramento de produtividade para essa cultura é escasso de soluções consolidadas no nível de pesquisa e comercialmente. Tal monitoramento auxilia na identificação das variabilidades espacial e temporal, além de fornecer subsídio ao gerenciamento agrícola. Como uma alternativa os sensores a laser, abrangidos pela tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), têm sido utilizados por meio de plataformas aéreas ou terrestres para a estimativa de produtividade de culturas de grãos como milho e trigo, e para o monitoramento de florestas de modo não invasivo. O objetivo deste estudo é a investigação de aplicação do sensor a laser para a cana-de-açúcar em período pré-colheita a partir do desenvolvimento de um sistema de mensuração. O sistema é composto por um sensor a laser, receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*), uma unidade inercial e um computador portátil. O sensor a laser emite feixes de luz (905 nm) na forma de um único pulso em um plano 2D, a partir desses feixes os valores de distância entre o sensor e o dossel de plantas são calculados durante a trajetória do veículo agrícola. O receptor GNSS com sinal RTK (*Real Time Kinematic*) foi sincronizado ao sensor a laser para a obtenção da nuvem de pontos, a qual é caracterizada pela alocação de cada ponto impactado pelo feixe de luz nas respectivas coordenadas geográficas. A unidade inercial fornece informações relacionadas à influência da vibração a partir dos dados de oscilação na transversal (*roll*), lateral (*pitch*) e longitudinal (*yaw*). Os equipamentos foram instalados em um suporte de estrutura metálica no trator agrícola e conectados ao computador por meio de protocolos de comunicação. O desenvolvimento do sistema de mensuração envolve a avaliação de sua acurácia utilizando objetos de dimensões pré-estabelecidas e a sua aplicação em áreas experimentais de cana-de-açúcar. São abrangidos dois períodos de estudo, sendo um em 2015 para a área I (0,77 ha) e o segundo em 2016 utilizando as áreas I e II (0,56 ha). A aquisição de dados ocorreu cerca de 10 dias antes da colheita e, em paralelo, foram realizadas as medidas de biometria das plantas. Em 2015 a produtividade foi estimada pela biometria e em 2016 ocorreu a pesagem do material para cada parcela das áreas I e II. Os resultados referentes à avaliação da acurácia do sistema de mensuração demonstraram erros de até 13,0%, o qual não compromete o seu desempenho. A partir dos procedimentos de aquisição e processamento de dados foi possível gerar a nuvem de pontos, realizar a filtragem de dados e extrair as medidas de alturas máxima, média e mediana da vegetação. A influência da vibração no conjunto de dados foi considerada mais expressiva para as condições da área I. A correlação entre o diâmetro de colmos e a produtividade estimada pela biometria na área I em 2015 foi de 0,80. Enquanto que, a correlação entre o diâmetro de colmos e a altura de vegetação indicada pelo sistema de mensuração foi moderada ($r=-0,53$). Em 2016, para a mesma área, a correlação entre as medidas de altura média e mediana de vegetação obtidas pelo sistema e a produtividade foi de 0,64. Para as condições da área II não foram verificadas correlações entre as medidas de biometria e as alturas de vegetação. O sistema de mensuração utilizando uma plataforma terrestre apresentou desempenho satisfatório em relação à capacidade de detecção da distribuição de plantas de cana-de-açúcar e condizente com as condições das áreas em ambos os períodos de estudo, porém a sua aplicação em áreas com pouca variabilidade espacial apresentou baixa capacidade preditiva de produção de biomassa de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Instrumentação; Monitoramento de produtividade; Sensor a laser

ABSTRACT

Measurement system based on LiDAR technology for estimation of the production parameters for sugarcane

The economic participation of sugarcane (*Saccharum* spp.) is significant in Brazilian agribusiness, especially in the state of São Paulo. The yield monitoring for this crop is scarce of solutions consolidated at the research and commercial levels. Such monitoring assists for identification of spatial and temporal variability, as well as providing support to the agricultural management. As an alternative laser sensors, covered by LiDAR (Light Detection and Ranging) technology, have been used by aerial or terrestrial platforms for estimating grain crops yield such as corn and wheat, and for noninvasive forest monitoring. The objective of this study is to investigate the laser sensor applications for sugarcane in the pre-harvest period from development of a measurement system. The measurement system consists of a laser sensor, a Global Navigation Satellite System (GNSS) receiver, an inertial unit and a computer. The laser sensor emits light beams (905 nm) in the form of a single pulse in a 2D plane, from these beams the distance values between sensor and canopy were calculated during the trajectory of the agricultural vehicle. The GNSS receiver with RTK (Real Time Kinematic) signal was synchronized to the laser sensor to obtain the point cloud, which is characterized by the allocation of each point impacted by the light beam in the respective geographical coordinates. The inertial unit provides information related to the data influence of the vibration from oscillation in the transversal (roll), lateral (pitch) and longitudinal (yaw). The equipment were installed in a support of metallic structure in the agricultural tractor and connected to the computer through communication protocols. The development of the measurement system involves evaluation of its accuracy using objects of pre-established dimensions and its application in experimental areas of sugarcane. Two periods are covered by this study, one in 2015 for area I (0.77 ha) and the second in 2016 using areas I and II (0.56 ha). The data acquisition occurred about 10 days before sugarcane harvest and, in parallel, the biometrics measurements were carried out. In 2015 sugarcane yield was estimated by biometry and in 2016 material was weighed for each plot of areas I and II. The results regarding evaluation of the measurement system accuracy showed errors up to 13.0%, which does not compromise its performance. From the data acquisition and processing procedures, it was possible the point cloud generation, data filtering performing and extraction of some measurements as maximum, average and median heights of vegetation. The influence of the vibration on data set was considered more expressive for area I conditions. The correlation between stem diameter and yield estimated by biometry in area I in 2015 was 0.80. Meanwhile, the correlation between stem diameter and vegetation height indicated by the measurement system was moderate ($r=-0.53$). In 2016, for the same area, the correlation between measurements of average and median heights of vegetation obtained by the system and sugarcane yield was 0.64. For area II conditions no correlations were verified between biometrics measurements and vegetation height. The measurement system using a terrestrial platform presented a satisfactory performance in relation to the capacity of detection of sugarcane plants distribution and consistent with areas conditions for both periods of study, however its application in areas with low spatial variability presented reduced predictive capacity of biomass production of sugarcane.

Keywords: Precision agriculture; Instrumentation; Yield monitoring; Laser sensor

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Princípios de cálculo da distância para os sensores a laser: triangulação (A); tempo de voo (B). Adaptado de Ehlert et al. (2009).	18
Figura 2. Figueira (<i>Ficus benjamina</i>) (A); nuvem de pontos (B) (SANZ-CORTIELLA et al., 2011b).	19
Figura 3. Aquisição de dados LiDAR (A); nuvem de pontos (B) (SELBECK et al., 2010).	20
Figura 4. Equipamentos utilizados durante a aquisição de dados em campo.	24
Figura 5. Estrutura tipo viga em balanço acoplada rigidamente à lateral do trator.	25
Figura 6. Carreador entre as parcelas de cana-de-açúcar na área I (A); equipamentos alocados na estrutura acoplada ao trator (B); aquisição de dados (C); componentes utilizados para a aquisição de dados (D).	25
Figura 7. Configuração de posicionamento do sistema de mensuração. Adaptado de Selbeck et al., 2010.	26
Figura 8. Rotina de programação para a aquisição de dados do sistema de mensuração.	27
Figura 9. Dados brutos provenientes do sistema de mensuração.	27
Figura 10. Rotina de programação para o processamento de dados brutos.	28
Figura 11. Objetos 2D e 3D: quadrado (I); círculo (II); triângulo isósceles (III); cilindro (IV); tronco de cone (V)..	31
Figura 12. Sistema de mensuração acoplado ao veículo agrícola (COLAÇO et al., 2015) (A); objeto 3D (B).	31
Figura 13. Vista superior da área experimental I (a); disposição das parcelas (b).	32
Figura 14. Vista superior da área experimental II (a); disposição das parcelas (b).	33
Figura 15. Precipitação mensal acumulada e temperatura do ar média mensal para os anos 2015/16 em Piracicaba, SP. Posto Meteorológico da ESALQ/USP.	33
Figura 16. Velocidade média mensal do vento para os anos 2015/16 em Piracicaba, SP. Posto Meteorológico da ESALQ/USP.	34
Figura 17. Vista superior parcial da área experimental I (A); área II total (B). Grupo de Pesquisa e Extensão em Topografia e Geoprocessamento (TOPOGEO) - ESALQ/USP.	35
Figura 18. Nuvem de pontos referente aos objetos 2D: quadrado (A); triângulo (B); círculo (C).	37
Figura 19. Nuvem de pontos referente aos objetos 3D: cilindro I (A); cilindro II (B); tronco de cone (C).	37
Figura 20. Nuvem de pontos referente à área experimental I (2015) (a); histograma correspondente (b).	40
Figura 21. Nuvem de pontos parcela número 7 da área I (2015) (a); historgama correspondente (b)	40
Figura 22. Nuvem de pontos referente à área experimental I (2016) (a); histograma correspondente (b).	41
Figura 23. Nuvem de pontos referente à área experimental II (2016) (a); histograma correspondente (b).	41
Figura 24. Nuvem de pontos referente aos valores P99: área I (2015) parcela 1 (a); área II (2016) parcela 1 (b)	42
Figura 25. Nuvem de pontos representando as fileiras de plantas da área I (2015) parcela 1.	43
Figura 26. Densidade espectral de potência: área experimental I (A); área experimental II (B).	44
Figura 27. Altura de colmos e a altura máxima de vegetação indicada pelo sistema para as parcelas da área I: 2015 (A); 2016 (B).	49
Figura 28. Altura de colmos e a altura máxima de vegetação indicada pelo sistema para as parcelas da área II.	49
Figura 29. Modelos de regressão entre a produtividade e as alturas de vegetação indicadas pelo sistema na área I: altura máxima – modelo linear (A); altura média – modelo de potência (B).	50
Figura 30. Modelos de regressão entre a produtividade e as alturas indicadas pelo sistema na área II (2016): altura máxima – modelo polinomial (A); altura média – modelo polinomial (B).	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações técnicas do sensor a laser LMS200 (Sick AG, Walldkirch, Alemanha).	23
Tabela 2. Descrição técnica do sensor de orientação estático IG-30A (SBG Systems, França).	24
Tabela 3. Objetos utilizados para a caracterização do sistema de mensuração.....	30
Tabela 4. Erro percentual entre as medidas reais dos objetos e a estimada pelo sistema de mensuração.	38
Tabela 5. Estatística descritiva de dados processados do sistema de mensuração para a área I (2015 e 2016). .	39
Tabela 6. Estatística descritiva de dados processados do sistema de mensuração referente à área II (2016).	39
Tabela 7. Estatística descritiva de dados do sensor de orientação estático para as áreas I e II (2016).	44
Tabela 8. Estatística descritiva dos dados de biometria para a área experimental I (2015 e 2016).	45
Tabela 9. Correlações entre as medidas de biometria e os dados do sistema de mensuração para a área I (2015 e 2016).	46
Tabela 10. Estatística descritiva dos dados de biometria para a área experimental II (2016).	47
Tabela 11. Correlações entre as medidas de biometria e os dados do sistema de mensuração para a área II (2016).	48

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é cultivada predominantemente em regiões de clima tropical e é definida como uma gramínea da família Poácea de metabolismo fotossintético C4. O comportamento semi-perene da cana-de-açúcar é caracterizado pela possibilidade de diversos ciclos de produção da planta. O ciclo fenológico da cultura é composto pelas fases de brotação, perfilhamento, crescimento e maturação e geralmente a reforma do canavial é realizada a cada cinco cortes consecutivos (SCARPARI e BEAUCLAIR, 2010).

O setor sucroenergético é estimulado pela demanda mundial de biocombustíveis, necessidade de redução nas emissões de carbono e pela competitividade financeira do produto como fonte única ou complementar aos combustíveis fósseis. O Brasil é responsável por 54,57% da capacidade mundial de cogeração de energia elétrica a partir do bagaço de cana, com produção anual de 10.680 MW (NOVACANA, 2015). A energia renovável compõe 41,20% do total da matriz energética brasileira, dos quais 16,90% são oriundos da biomassa de cana-de-açúcar (BEN, 2016).

A área cultivada de cana-de-açúcar na safra 2016/2017 brasileira foi de 9,05 milhões ha e as principais unidades produtoras são alocadas nas regiões Centro-Sul do país (89,50% da área total). A produtividade média para a referida safra foi de 72,62 t ha⁻¹ com produção acumulada de 27,80 bilhões de litros etanol e 38,69 milhões de toneladas de açúcar (CONAB, 2017). O país é o principal produtor mundial de açúcar seguido pela Índia (FAO, 2013). A dimensão desses números ressalta a importância da cana-de-açúcar para o agronegócio brasileiro e os desafios de cultivo da cultura em relação ao suprimento de alimentos e de energia mundialmente, além da diversidade de subprodutos gerados como o bio-plástico e o etanol de segunda geração que contribuem para os avanços de pesquisas e inovação no setor sucroenergético.

Segundo Marin et al. (2016) o potencial de expansão da área plantada de cana-de-açúcar no Brasil é da ordem de 13,0 % considerando o cenário de demanda de 851,0 milhões de toneladas de matéria-prima em 2024. Esse cenário é construído considerando o balanço mundial de produção e consumo de alimentos e o crescimento econômico de cada país.

Por outro lado, as principais tecnologias com potencial de contribuição para o incremento de produtividade da cana-de-açúcar, em áreas já ocupadas, são associadas ao melhoramento genético, gerenciamento agrícola, técnicas de plantio e de colheita (GREGO et al., 2014). Para a aplicação dessas tecnologias deve-se considerar que há diversidade nos ambientes de produção de cana-de-açúcar quanto a disponibilidade hídrica, as características do solo, as condições climáticas e a demanda localizada de nutrientes.

Para as condições brasileiras de produção agrícola há alta suscetibilidade a erosão do solo na etapa de plantio e as áreas são predominantemente de superfície irregular, influenciando no custo de mecanização e no rendimento da cultura. As técnicas de Agricultura de Precisão (AP), como o controle de tráfego de veículos (PAULA e MOLIN, 2013), são essenciais para a aplicação de soluções que visem a redução de custos associados as operações de máquinas, a sobreposição de insumos e as perdas de solo (SPEKKEN et al., 2015).

O conceito de AP envolve principalmente a variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção e da produtividade. A variabilidade espacial é constatada pela análise de diferentes camadas de informação (fertilidade do solo, produtividade, clima, pragas, doenças, etc.) de forma georreferenciada. A variabilidade temporal é identificada por meio de dados históricos de tais camadas. Através da identificação de variabilidade pode-se modular a aplicação localizada de insumos e promover a gestão da lavoura de acordo com a identificação das demandas de solo e de plantas (BLACKMORE e LARSCHIED, 1997).

Os métodos tradicionais de amostragem de dados para a caracterização das lavouras agrícolas carecem de maior confiabilidade como forma de desenvolvimento de diagnósticos mais acurados. Como uma alternativa, o uso de sensores e a eletrônica embarcada em equipamentos agrícolas provê uma maior capacidade de aquisição de dados de modo automatizado e padronizado, oferecendo maior suporte ao gerenciamento da lavoura (INAMASU et al., 2014).

O processo de detecção da variabilidade espacial deve ter um ponto de partida e o mapa de produtividade é a informação mais completa para essa finalidade. A variabilidade expressa na colheita representa a própria resposta da cultura e carece de uma interpretação sistêmica do conjunto de informações para que se elabore a gestão da lavoura de forma diferenciada (MOLIN, 2002).

Os dados contidos nos mapas de produtividade devem ser ajustados devido aos erros associados a fatores, como o tipo de monitor de colheita, a sistematização do talhão, dentre outros. Para o cultivo de grãos, os algoritmos desenvolvidos para a redução de erros eliminam parâmetros discrepantes associados a calibração de massa, a largura de plataforma e o tempo de enchimento da colhedora (GIMENEZ e MOLIN, 2004).

Os sistemas de monitoramento de produtividade para a cana-de-açúcar são desenvolvidos para a mensuração de fluxo contínuo de massa nas colhedoras. Os principais parâmetros que influenciam na acurácia desses sistemas são a frequência de coleta de dados, o efeito das variedades de cultivares, a maturação das plantas, a taxa de alimentação da colhedora e o espaçamento entre as fileiras de plantas (MAILANDER, 2010).

Diversos dispositivos foram propostos e avaliados para a finalidade de monitoramento da produtividade de cana nos níveis de pesquisa e comercialmente (MAGALHÃES e CERRI, 2007; MOLIN e MENEGATTI, 2004; PRICE et al., 2007). Cada um desses dispositivos apresentam vantagens e limitações operacionais distintas, além disso seus princípios de mensuração, diretos ou indiretos, auxiliam na elaboração de uma potencial solução ao monitoramento de produtividade de cana-de-açúcar.

A principal fonte de informação para a predição de produtividade em escalas comerciais de cana-de-açúcar atualmente é por meio de biometria (densidade de perfilhos, altura e diâmetro de colmos, etc.) delimitando uma área amostral, a qual compromete a representabilidade da lavoura, ou pelos dados históricos de produção. Poucos estudos desenvolvem o tema de monitoramento de produtividade dessa cultura na escala de lavoura. Tal monitoramento pode fornecer subsídio ao planejamento de operações, como o subsistema de corte, carregamento e transporte (CCT) e a alocação de seus recursos, ajustes nas variáveis relacionadas à velocidade operacional e à taxa de alimentação das colhedoras durante a colheita de modo automatizado.

O desenvolvimento de inovações tecnológicas para o setor agrícola tem considerado a necessidade de integração de dados (solo, clima, vegetação e máquinas) como forma de agregar maior confiabilidade e valor ao processo de produção e a alocação de recursos a partir da projeção do potencial produtivo das culturas. Para a cana-de-açúcar as técnicas de sensoriamento remoto tem sido empregadas para essa finalidade baseando-se, principalmente, em imagens de satélite (FERNANDES et al., 2011).

Como alternativa ao incremento de resolução espacial e temporal de aquisição de dados de forma automatizada, as plataformas terrestres com sensores embarcados são empregadas para o levantamento de dados com alto nível de detalhamento do objeto-alvo em tempo real. Os primeiros protótipos dessas plataformas são relatados na Horticultura/Fructicultura de Precisão, envolvendo sensores de varredura ultrassônico e a laser, sendo esse último inserido na tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*), para a verificação da variabilidade espacial de sanidade e rendimento de pomares comerciais.

A tecnologia LiDAR, originada na década de 1960, é uma forma de detecção remota e não destrutiva para a obtenção de distâncias entre o sensor e o objeto (ROSS, 2013). A distância é obtida por meio da medição do intervalo de tempo entre a emissão do pulso a laser e a recepção do sinal refletido, a partir da distância pode-se extrair parâmetros geométricos do objeto-alvo. Para as aplicações agrícolas, tais parâmetros são associados às variações de produtividade na lavoura.

Os principais trabalhos científicos envolvendo LiDAR em ambiente agrícola são focados para a caracterização de culturas perenes e a principal vantagem da tecnologia é o potencial de mapeamento da variabilidade espacial do dossel de plantas com alta resolução e repetibilidade. Não há relatos na literatura quanto ao desempenho dessa tecnologia no ambiente de produção de cana-de-açúcar visando o monitoramento da lavoura.

A hipótese abordada no presente estudo é que a tecnologia LiDAR pode permitir a obtenção de parâmetros geométricos da cultura da cana-de-açúcar, especialmente da altura de vegetação, os quais permitiriam inferir sobre a produtividade. O objetivo é o desenvolvimento de um procedimento para a obtenção de dados com a tecnologia LiDAR para a determinação de parâmetros culturais em lavoura de cana-de-açúcar e avaliar o seu potencial para a estimativa de produtividade pontual da cultura na fase de pré-colheita.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Agricultura de precisão

O monitoramento da variabilidade espacial e temporal de cultivos agrícolas é um dos principais requisitos para a aplicação dos conceitos de AP, a qual é definida como um sistema de gerenciamento da produção agrícola visando a otimização da lavoura através da gestão da variabilidade e de seus fatores associados (MOLIN et al., 2015).

A determinação dos fatores que delimitam o potencial de produção de cultivos agrícolas é um dos principais desafios ao gerenciamento agrícola, sendo que cada fator tem uma escala e frequência amostral apropriada (INAMASU et al., 2014). O desenvolvimento de métodos para o processamento e a análise de dados oriundos de diversas fontes de informações com alta resolução espacial e temporal tem propiciado avanços nas tecnologias de AP. De acordo com Silva et al. (2011), a adoção dos recursos de AP no estado de São Paulo para as lavouras comerciais de cana-de-açúcar concentra-se predominantemente no emprego de sistemas de direção autônomo para as operações de plantio e aplicação de insumo.

A gestão localizada da cultura de cana-de-açúcar tem se limitado as variáveis relacionadas a fertilidade do solo e a avaliação da genética de variedades (OLIVEIRA et al., 2007). Porém, pouco se investiga sobre o potencial de produção da cultura, a presença de falhas no plantio (MOLIN e VEIGA, 2016) e a logística de colhedoras e transbordos que representam impacto significativo nos custos de produção de matéria-prima, estimados em cerca de 40,0% em relação ao custo total (MILAN e ROSA, 2015).

A decisão de investimento em AP pelos produtores de cana-de-açúcar é associada a percepção das tecnologias empregadas em outros sistemas de produção agrícola. Entretanto, a característica verticalmente integrada da indústria açucareira quanto a qualidade de matéria-prima (brix, pol, etc.) apresenta oportunidades para a elaboração de estratégias que considerem a AP como uma ferramenta de otimização de produção de açúcar e um método de gestão agrônômica da cultura (BRAMLEY, 2009).

A mecanização no cultivo de cana-de-açúcar se destaca pela manutenção da competitividade no setor agroindustrial. A recente adoção de colheita mecanizada de cana possibilita determinados planejamentos operacionais que influenciam na tomada de decisão acerca da qualidade de matéria-prima industrializável. Ramos et al. (2015) constataram danos de até 34,0% nos rebolos de cana colhidos a medida em que se aumenta a rotação no motor da colhedora, o efeito no processamento industrial dos colmos corresponde à menor qualidade da matéria-prima (deterioração, impurezas e perdas). Uma das medidas para amenizar tais perdas seria a regulação dos mecanismos de limpeza e de corte das colhedoras em função das condições operacionais (MA et al., 2014).

De acordo com Grego et al. (2014) a AP é compatível ao ambiente de produção de cana-de-açúcar, porém sua aplicação ainda é incipiente aos produtores. A adoção da AP pode ser fortemente favorecida com o uso de geotecnologias para a obtenção de respostas cada vez mais rápidas e precisas diante dos desafios de expansão e tecnificação do setor. Essa adoção visa suprir as demandas interna e externa de etanol, energia e açúcar por meio da otimização da produção de acordo com a variabilidade espacial da lavoura.

Diferentemente do que ocorre para a cultura de grãos, o monitoramento da produtividade de cana-de-açúcar no Brasil ainda é um desafio quanto a disponibilidade de ferramentas aplicáveis ao gerenciamento agrícola das unidades produtoras. Tal monitoramento demanda alguns dispositivos, como sensores de fluxo de massa alocados nas colhedoras e receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*), além disso são essenciais os procedimentos para a aquisição de dados e uma adequada calibração do sistema (BRAMLEY e JENSEN, 2013).

No Brasil os primeiros estudos acerca do monitoramento de produtividade para a cana-de-açúcar foram conduzidos por Pierossi e Hassuani (1997) em condições de colheita de cana picada. Cox et al. (1997) desenvolveram pioneiramente os sistemas de instrumentação para colheita de cana-de-açúcar na Austrália. O sistema baseia-se na determinação da pressão hidráulica dos rolos alimentadores, na variação do fluxo hidráulico e na velocidade operacional da colhedora. Devido ao desgaste dos componentes hidráulicos e a mudança de viscosidade do fluido em função da temperatura, o sistema proposto não evoluiu no desempenho.

Os princípios desenvolvidos para a mensuração de produtividade em cana-de-açúcar são categorizados em dispositivos diretos (aferição de peso por células de carga) ou indiretos (pressão da base de corte, potência do elevador e sensores óticos). Benjamin et al. (2001) instalaram uma célula de carga na base do elevador da colhedora e obtiveram alta capacidade de predição de produtividade ($R^2=0,97$). Price et al. (2011) desenvolveram um sistema de monitoramento de produtividade por meio de três sensores óticos ativos instalados na base do elevador da colhedora, os resultados indicaram alta relação ($R^2=0,98$) entre as leituras do sensor e a produtividade real. Cox et al. (1996) verificaram uma relação linear entre a potência consumida nos sistemas de corte e transporte da colhedora e o fluxo de massa no sistema de alimentação.

Mais recentemente, Magalhães e Cerri (2007) desenvolveram um sistema de aquisição de dados utilizando um sensor de fluxo de massa no elevador da colhedora para a implementação dos conceitos de AP. Rodrigues Junior et al. (2012) verificaram que o funcionamento desse sistema necessita de ajustes acerca do erro sistemático de estimativa de produtividade através de fatores de correção entre o peso aferido na carga de transbordo e o estimado pelo monitor de produtividade.

Bramley (2009) descreve que a adoção bem sucedida do monitoramento de produtividade de cana-de-açúcar depende de melhorias significativas nos sistemas de mensuração. Tal monitoramento requer o georreferenciamento dos dados de produção com precisão de DGPS (*Differential Global Positioning System*) em 0,10 m ou superior, a calibração do monitor de produtividade considerando uma base de eventos por colheita e o registro de dados em intervalos menores ou iguais a três segundos. O processamento dos dados de produtividade envolve a remoção de valores nulos e discrepantes com base na velocidade de deslocamento da colhedora. Apesar dos esforços para o desenvolvimento de monitores de produtividade, o emprego desses em lavouras comerciais não tem evoluído no mercado por escassa validação/confiabilidade das metodologias propostas e pelas limitações de conhecimento para a transformação desses dados em informações úteis ao gerenciamento agrícola.

A predição de produtividade de cana-de-açúcar também tem sido desenvolvida baseando-se em imagens de satélite envolvendo determinadas bandas do espectro a fim de disponibilizar informações complementares para a gestão da colheita em escala regional (MOREL et al., 2014). Porém, poucos trabalhos desenvolvem tal aplicação na escala de talhão ou de lavoura.

Portz et al. (2012) verificaram que a altura de plantas de cana-de-açúcar indicada por sensores de ultrassom na fase de desenvolvimento das plantas, é associada à densidade de biomassa presente nos colmos de plantas, mas o desempenho operacional desse tipo de mensuração limita o seu emprego em larga escala. Como alternativa aos sensores de ultrassom tem-se os sensores a laser que compõe uma das técnicas de sensoriamento remoto baseado na tecnologia LiDAR.

2.2. Sensoriamento remoto

A definição de sensoriamento remoto é associada ao conjunto de técnicas para o registro da energia refletida (radiação eletromagnética) pelo objeto-alvo sem que haja contato físico com o mesmo. A determinação do tipo de sensor para o monitoramento de lavouras depende da faixa do espectro eletromagnético contida no mesmo, tendo em vista que há um comportamento diferenciado da refletância em função da arquitetura da vegetação, de propriedades químicas e fisiológicas das folhas e de parâmetros agronômicos (AMARAL, 2014; DEERY et al., 2014).

A espectroscopia é uma das técnicas de sensoriamento remoto mais utilizada no nível de pesquisa agrícola e mesmo comercialmente. Essa técnica é baseada na captação da luz refletida pelo objeto-alvo em diferentes comprimentos de onda contidos no espectro eletromagnético visível (400-700 nm). A radiação refletida pelas plantas é inversamente relacionada à radiação absorvida pelos pigmentos de plantas e varia de acordo com o comprimento de onda da radiação incidente (COHEN et al., 2005).

Os meios de captação de energia eletromagnética envolvem sensores terrestres (sensoriamento proximal) ou sensores embarcados em satélites e aeronaves (sensoriamento remoto), ambos podem ser classificados como sensores óticos ativos (fonte de luz própria) ou passivos. Para as aplicações agrícolas, os objetos-alvos mais comuns são o solo e as plantas. Os sensores de infravermelho são uma forma de identificar a radiação refletida pelas plantas em função da temperatura de vegetação e por meio de algoritmos pós-processamento determinam o nível de estresse hídrico da lavoura, auxiliando, por exemplo, no planejamento e no dimensionamento de sistemas de irrigação (GREGORY et al., 2016).

As informações provenientes das técnicas de sensoriamento permitem a identificação de variabilidade espacial e de doenças existentes nas lavouras. O emprego de sensores, denominados como sensores de dossel de plantas, é baseado nas alterações de propriedades espectrais da vegetação que ocorrem, por exemplo, devido a disponibilidade de nitrogênio na cultura, impactando no desenvolvimento vegetativo e no teor de clorofila das folhas (TARPLEY et al., 2000).

O monitoramento de biomassa em lavouras comerciais de grãos, sobretudo na Europa e nos Estados Unidos, tem sido desenvolvido de forma promissora por meio de sensores óticos ativos que envolvem comprimentos de onda do espectro entre o visível e o infravermelho próximo (700-1300 nm). Tais sensores permitem a caracterização do comportamento espectral da vegetação por meio de cálculos de índices de vegetação.

A aplicação prática dos índices de vegetação é relacionada às informações agronômicas, como o estado nutricional e fitossanitário de plantas, a verificação da variabilidade espacial de produtividade e suporte à recomendação de tratamentos localizados, especialmente da fertilidade do solo, com a aplicação de insumos em taxas variáveis.

Portz et al. (2011) obtiveram estimativas de biomassa e de nitrogênio (N) extraído pela cultura de cana-de-açúcar durante o estágio de desenvolvimento das plantas (0,40-0,70 m de altura de colmo) utilizando sensores óticos ativos. Amaral e Molin (2011) verificaram a capacidade de diferenciação de doses de N aplicadas em lavouras de cana-de-açúcar por meio de sensores de dossel capazes de detectar o comprimento de onda na região do infravermelho próximo (780 nm), indicando que a partir da resposta espectral da vegetação é possível recomendar a adubação nitrogenada em taxa variável para a cultura da cana-de-açúcar.

Apesar do desempenho satisfatório dos sensores de dossel verifica-se uma maior tendência de saturação do sinal em condições de estágio final de produção para as culturas gramíneas e, conseqüentemente, uma relação não linear entre o índice de vegetação e a biomassa de plantas (POVH et al., 2008).

Outras técnicas de sensoriamento remoto são mais recentes no ambiente agrícola e proporcionam maior abrangência das ferramentas de AP (MULLA, 2013). Os sensores de varredura para a mensuração de parâmetros geométricos (altura, volume, etc.) da cultura são associados às variações de produtividade e de incidência de pragas/doenças nas lavouras.

Os dispositivos eletrônicos para essa finalidade são os sensores ultrassônicos, sensores a laser e sensores de radar (KOPPE et al., 2013). Os sensores a laser e de radar foram inicialmente introduzidos em estudos do setor florestal por meio de plataformas aéreas para o levantamento de dados de superfície do terreno e estimativa de biomassa de florestas implantadas, como as de eucaliptos (RICHARDSON et al., 2009; ZAMAN et al., 2011).

2.3. Conceito e aplicações da tecnologia LiDAR

A tecnologia LiDAR foi desenvolvida inicialmente para as aplicações na indústria automotiva envolvendo robótica, instrumentação e automação de processos. Nas aplicações agrícolas o seu uso é recente e focado no desenvolvimento de métodos para a aquisição e o processamento de dados referentes a geometria das plantas, entretanto tais métodos carecem de adaptação aos diferentes cenários do ambiente de produção agrícola (EDAN et al., 2009).

O funcionamento dos sensores a laser envolve um feixe de luz (600-1000 nm) emitido em determinados ângulos e direcionados ao objeto-alvo utilizando espelhos rotativos internos ao equipamento com uma rotação pré-estabelecida. O intervalo de tempo de retorno (Δt) do feixe de luz ao equipamento determina a distância entre o objeto e o sensor de forma instantânea. Os princípios de cálculo da distância são por triangulação ou por tempo de voo (Figura 1), sendo o primeiro indicado para distâncias inferiores a 3,0 m.

Figura 1. Princípios de cálculo da distância para os sensores a laser: triangulação (A); tempo de voo (B). Adaptado de Ehlert et al. (2009).

Na agricultura os sensores a laser são embarcados em plataformas terrestres ou aéreas para a quantificação de biomassa de plantas (ANDÚJAR et al., 2016; LI et al., 2014; SELBECK et al., 2010), elaboração de modelos tridimensionais de dossel de culturas (COLAÇO et al., 2015; SILVA et al., 2016), mensuração de deriva em pulverização de pesticidas (GREGORIO et al., 2016), aplicação localizada de insumos (GIL et al., 2014) e detecção de obstáculos para veículos autônomos (PERIU et al., 2013), dentre outros.

Polat e Uysal (2015) desenvolveram algoritmos específicos para a geração de modelos digitais de terreno com alto nível de resolução a partir de sensores a laser com diversas possibilidades de aplicações, como a análise de

conservação do solo, o planejamento de drenagem e o estudo de microrelevo nas lavouras, o qual é associado à disponibilidade de água e ao teor de nutrientes no solo.

Apesar da diversidade de aplicações dos sensores a laser, as técnicas de fotogrametria e estereoscopia são alternativas de menor custo para as finalidades semelhantes às descritas para a tecnologia LiDAR, porém a capacidade de aquisição de dados e o nível de resolução espacial dessas técnicas é relativamente menor quando comparado ao desempenho de sensores a laser (SANZ-CORTIELLA et al., 2011a).

A tecnologia LiDAR aplicada a plantas permite a geração de um conjunto de pontos associado a um sistema de coordenadas, sendo denominado nuvem de pontos para a constituição do modelo tridimensional (3D) da vegetação (Figura 2). Os algoritmos de processamento são aplicados à nuvem de pontos para a obtenção de parâmetros geométricos de plantas, como o índice de área foliar (ARNÓ et al., 2013; ROSELL e SANZ, 2012).

Figura 2. Figueira (*Ficus benjamina*) (A); nuvem de pontos (B) (SANZ-CORTIELLA et al., 2011b).

As informações acerca da geometria (altura, volume) e a estrutura (índice de área foliar, porosidade) de culturas agrícolas são associadas as variações de produtividade na lavoura. Em áreas contínuas, considerando as aplicações de AP, a visualização da nuvem de pontos possibilita o acompanhamento da situação atual da lavoura com a estimativa de biomassa, o que permite, dentre outros, gerar parâmetros usuais para a implementação de melhorias na logística da colheita de cana-de-açúcar. Tendo em vista que os métodos de estimativa de produtividade a partir de medidas manuais são pouco usuais para o propósito de gestão das lavouras e impraticáveis em larga escala, por isso o desenvolvimento de ferramentas computacionais para o conjunto de dados LiDAR é essencial para a extração de informações ao gerenciamento agrícola (ESCOLÀ et al., 2016).

Colaço (2016) empregou a tecnologia LiDAR para a avaliação de aspectos produtivos de pomares de laranja a partir de parâmetros geométricos extraídos por meio de sensor a laser visando o diagnóstico e as recomendações localizadas de insumos utilizando os modelos tridimensionais de copas.

No cultivo de grãos, Tilly et al. (2014) utilizaram sensores a laser embarcados em plataforma terrestre para a obtenção de modelos de superfície multitemporais para a cultura do arroz. Shi et al. (2015) validaram a tecnologia LiDAR para as medidas de população de plantas de milho e de espaçamento entre fileiras de plantas com erro inferior a 0,02 m. Schirrmann et al. (2016) propuseram a estimativa de biomassa de trigo em período pré-colheita baseando-se na altura de plantas gerada pelo LiDAR e por imagens digitais de modo integrado.

Selbeck et al. (2010) desenvolveram uma estrutura acoplada ao trator agrícola para a aquisição de dados LiDAR em áreas experimentais de milho (Figura 3). A predição de biomassa foi realizada a partir da altura de vegetação por meio de algoritmos de calibração específicos para essa condição.

Figura 3. Aquisição de dados LiDAR (A); nuvem de pontos (B) (SELBECK et al., 2010).

Na agricultura os sistemas instrumentados tem avançado com o uso de aeronaves remotamente pilotadas (ARP) em regiões de acesso limitado através de sensor a laser, câmera digital, unidade inercial e receptor GNSS embarcados. A geração de nuvem de pontos a partir desses sistemas tem contribuído para o monitoramento do sistema produtivo em tempo real (DÍAZ-VARELA et al., 2015; JOZKOW et al., 2016). Souza et al. (2017) utilizaram uma ARP com câmera RGB para o levantamento da nuvem de pontos de cana-de-açúcar, sendo possível a elaboração de modelos digitais de superfície (DMS) e de terreno (DTM) para a extração de altura de vegetação. Porém, a principal limitação de ARP é o alto custo associado aos dispositivos eletrônicos de menor peso e a necessidade de múltiplos canais de aquisição de dados em diferentes ângulos de posicionamento dos sensores embarcados.

O desenvolvimento de soluções específicas para a cultura da cana-de-açúcar carece de ferramentas com alta resolução espacial, sistemas instrumentados com acurácia e pouco influenciados por condições de campo. Os sensores e a arquitetura do processamento de dados devem ser suficientemente robustos para as aplicações em escalas comerciais (GLENNIE e LICHTI, 2010).

O potencial de aplicação da tecnologia LiDAR para o mapeamento da variabilidade espacial de lavouras de cana-de-açúcar ainda é desconhecido, por isso o entendimento da relação entre os parâmetros geométricos extraídos a partir do sistema de mensuração e as variáveis agrônômicas é crucial para o desenvolvimento de ferramentas alternativas ao suporte na tomada de decisão para os planejamentos operacionais.

2.4. Cana-de-açúcar e parâmetros de produção

A cana-de-açúcar é caracterizada pela eficiência na produção de biomassa e cultivada para a obtenção de colmos que acumulam sacarose na estrutura da vegetação para a produção de açúcar e etanol (DINARDO-MIRANDA et al., 2010). O teor de sacarose (10-15%) nos colmos das plantas diferencia sua capacidade de acúmulo de biomassa e, conseqüentemente, a produtividade da cultura. A principal vantagem fisiológica da cana-de-açúcar

consiste na alta concentração de CO₂ presente na planta, baixa taxa de evapotranspiração e capacidade de fotossíntese a altas temperaturas ($> 35,0^{\circ}\text{C}$) (MAGALHÃES, 1987).

Os sistemas de plantio de cana-de-açúcar são de ciclos de 18 ou 12 meses, sendo determinado de acordo com as condições de temperatura e umidade para o desenvolvimento das gemas de plantas. Há dois períodos de safra de cana-de-açúcar distintos no Brasil, sendo que a região norte-nordeste realiza a colheita no período de novembro a abril e a região centro-sul entre abril e novembro. As condições de produção dependem da precipitação, temperatura do ar e radiação solar. Em alguns casos as perdas de produtividade são de até 70,0% (NOVACANA, 2017), caso não haja condições propícias ao desenvolvimento radicular das plantas. Outras características são essenciais ao desenvolvimento da planta, como o preparo do solo, a adoção de cultivar adequada à região de produção e o espaçamento entre as fileiras de plantas (EMBRAPA, 2000).

Para Marin e Nassif (2013) a expansão do cultivo de cana-de-açúcar depende da regularidade de precipitação pluviométrica nas regiões produtoras, pois os períodos de estiagem limitam o acúmulo de biomassa das plantas em razão da baixa umidade do solo, sobretudo no período de abril a novembro. Essa etapa coincide com a fase final de crescimento vegetativo (maturação) e o início do perfilhamento de plantas dependendo das épocas de colheita nas regiões produtoras.

A arquitetura do dossel de plantas e o formato das folhas são influenciados pelo clima e pelas práticas de gestão da lavoura, além disso as características inerentes a cada genótipo de cana-de-açúcar definem os parâmetros de produção da cultura, como o número, altura e diâmetro de colmos. Tais características impactam na capacidade de fotossíntese das plantas e na expressão de seu potencial produtivo (RODRIGUES, 1995). Batista et al. (2013) desenvolveram modelos de crescimento de cana-de-açúcar relacionados ao acúmulo de matéria seca da parte aérea das plantas durante o período de formação da cultura (45 dias após o plantio), sendo a altura e o diâmetro de colmos as variáveis mais significantes ao ajuste dos modelos.

Os componentes delimitantes da produtividade da cana-de-açúcar são o diâmetro e o comprimento de colmos, e o número de colmos por área, o qual é associado a capacidade de perfilhamento das plantas. Tais componentes são de caráter genético e influenciados pelas condições climáticas, manejo, dentre outros. Por isso, apesar da seleção das variedades de cultivares comerciais com determinado potencial de produção nem sempre é possível atingi-lo devido aos fatores externos à fisiologia da planta (LANDELL e SILVA, 1995).

Silva et al. (2009) avaliaram as influências dos parâmetros de produção, número e diâmetro de colmos, sobre a produtividade de cana-de-açúcar nas fases de primeiro e segundo cortes. Para o primeiro corte de cana os maiores efeitos foram observados pelo número e diâmetro de colmos, e no segundo corte o número de colmos influenciou na produtividade de forma mais significativa. Oliveira et al. (2016) desenvolveram a análise de biometria relacionada a restrição hídrica, para o primeiro e segundo cortes, o diâmetro de colmos tende a ser maior em condições de estresse hídrico e o número de perfilhos aumentam proporcionalmente à reposição hídrica.

Nas escalas comerciais de produção de cana-de-açúcar a biometria é realizada em pontos aleatórios nas regiões pré-estabelecidas da lavoura para a estimativa de produtividade e para o levantamento de informações relacionadas à qualidade da matéria-prima destinada a usina. Porém, a prática de biometria utilizando amostras compromete a representatividade da área total e a detecção de variabilidade espacial e temporal das lavouras.

A altura da vegetação de cana-de-açúcar pode ser um indicador de produtividade, tendo em vista que a identificação de alterações bruscas nessa medida permite investigar os fatores associados aos diferentes níveis de produção. Assim, a aplicação da tecnologia LiDAR utilizando plataforma terrestre nesse ambiente permite o

levantamento de dados com densidade e repetibilidade potenciais para a geração de mapas de produtividade de forma pontual em período pré-colheita.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. O sistema de mensuração

O sistema de mensuração desenvolvido é composto por um sensor a laser, receptor GNSS, computador portátil e um sensor de orientação estático (unidade inercial) a fim de obter dados do dossel de plantas de cana-de-açúcar de modo georreferenciado e verificar a influência da vibração no desempenho da tecnologia LiDAR em condições de campo. A aquisição de dados ocorreu em 2015 e 2016. Os sensores e o receptor GNSS foram sincronizados durante a aquisição de dados por meio de protocolos de comunicação. Devido às diferentes capacidades de frequências de coleta de dados dos equipamentos e das dimensões das áreas houve a interpolação dos dados na rotina de processamento.

Foi utilizado o sensor a laser LMS200 (Sick AG, Alemanha) com varredura bidimensional (2D) e que não necessita de contato direto com o material, baseado no conceito de tempo de voo. O emprego desse sensor não acarreta danos à visão do usuário, pois se insere na classe 3 de segurança-IP65 (EN 50178, 1997). As especificações técnicas do sensor a laser são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações técnicas do sensor a laser LMS200 (Sick AG, Waldkirch, Alemanha).

Especificações	Valores
Comprimento de onda	905,0 nm
Tensão de alimentação	24,0 V
Alcance	8,0-80,0 m
Resolução angular	0,25°; 0,5°; 1,0°
Frequência máxima	75 Hz
Tempo de resposta	53; 26; 13,0 ms
Resolução de medida	± 10,0 mm
Diâmetro do feixe de luz	12,0-47,2 mm
Erro (condições ambientais: T=23,0 °C; refletividade ≥ 10,0 %)	± 15,0 mm para alcance 1,0-8,0 m ± 4,0 cm para alcance 1,0 -20,0 m
Temperatura de operação	0-50,0 °C
Taxa de transmissão de dados	9,6; 19,6; 38,4; 500 kBauds
Peso	4,50 kg
Dimensões (largura x comprimento x altura)	185 mm x 156 mm x 210 mm

O funcionamento desse sensor é composto por um único pulso de feixe de luz emitido no plano 2D (SANZ-CORTIELLA et al., 2011b) com ângulo de varredura configurado em 180° (totalizando 181 ângulos de medição), resolução angular de 1,0°, resolução de distâncias em mm, alcance (largura de leitura) de 8,0 m e frequência de 75 Hz relacionada com a rotação do espelho responsável pela emissão e recepção do feixe de luz por meio de fotodetectores. Tal configuração permitiu que o sensor a laser obtivesse um alcance compatível à largura das parcelas experimentais. A fonte de alimentação do sensor foi composta por duas baterias de 12,0 V associadas em série.

A fim de verificar a influência da vibração no conjunto de dados em condições de campo, na etapa de aquisição de dados em 2016 foi instalado um sensor de orientação estático IG-30A (SBG Systems, França) composto por acelerômetro e magnetômetro alinhado ao sensor a laser e ao receptor GNSS. A descrição técnica do sensor de orientação é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição técnica do sensor de orientação estático IG-30A (SBG Systems, França).

Especificações	Valores
Sensibilidade	360,0°
Tensão de alimentação	3,30-30,0 V
Acurácia	$\pm 0,02^\circ$
Frequência	66 Hz
Temperatura de operação	-40,0 a 85,0 °C
Transmissão de dados serial	9600-230400 bps
Peso	5,0 g
Dimensões (largura x comprimento x altura)	27 mm x 30 mm x 14 mm

O sensor de orientação foi isolado da estrutura metálica a fim de amenizar os efeitos de rotação do motor do trator. A frequência de coleta de dados foi configurada em 66 Hz e os dados brutos correspondem aos ângulos Euler com resolução de $0,05^\circ$. As medidas obtidas por esse sensor permitem verificar as oscilações na transversal (*roll*), lateral (*pitch*) e longitudinal (*yaw*), além da aceleração no eixo z associada ao deslocamento vertical do conjunto de equipamentos.

Um par de receptores GNSS GR3 (Topcon, EUA) foi utilizado com correção diferencial RTK (*Real Time Kinematic*) e sinal L1/L2 com frequência de 10 Hz em conjunto com os demais sensores para o georreferenciamento (projeção WGS 84) das medidas em campo. A base RTK foi instalada à cerca de 1,70 m de altura em relação ao solo e distanciada de 150,0 m do receptor em cada área experimental. A sincronia estabelecida entre o receptor GNSS e o sensor a laser permite o registro de posicionamento de cada ponto atingido pelo feixe de luz. O nível de acurácia do sinal RTK para as condições cinemáticas é da ordem de 0,01-0,02 m (MALDANER et al., 2015).

Lee e Ehsani (2009) ressaltam que sem o uso sincronizado entre o LiDAR e o receptor GNSS qualquer desvio da plataforma terrestre na trajetória gera fontes de erros da ordem de 30,0% nas medidas da nuvem de pontos. Del-Moral-Martinez et al. (2015) descrevem mais detalhes sobre o procedimento de atribuir as coordenadas de GNSS a cada feixe de luz emitido pelo sensor a laser.

A Figura 4 ilustra a montagem dos sensores na estrutura metálica acoplada ao trator para a aquisição de dados em campo. O receptor GNSS e o sensor a laser são distanciados cerca de 0,20 m e tal distância interfere na alocação da nuvem de pontos em relação ao nível do solo.

Figura 4. Equipamentos utilizados durante a aquisição de dados em campo.

3.2. Aquisição e processamento de dados

Os equipamentos (sensor a laser, receptor GNSS e sensor de orientação) foram alocados em suporte de estrutura metálica cerca de 4,0 m acima do solo (2015) e de 5,0 m (2016) devido à margem estabelecida de 1,0 m de distância entre o sensor e o porte de plantas. A plataforma terrestre é um trator agrícola de 63,5 kW (85,0 cv) e devido à necessidade de estabilidade dos equipamentos durante a aquisição de dados uma estrutura tipo viga em balanço foi acoplada rigidamente à lateral do trator (Figura 5).

Figura 5. Estrutura tipo viga em balanço acoplada rigidamente à lateral do trator.

O deslocamento dos sensores ocorreu nos carregadores de 3,0 m de largura entre as parcelas na área I (Figura 6) e de 5,50 m na área II com o sensor a laser focando no dossel de plantas. A velocidade do trator permaneceu constante em $1,0 \text{ m s}^{-1}$ ($3,6 \text{ km h}^{-1}$) durante a aquisição de dados para ambas as áreas e períodos de estudo (2015 e 2016).

Figura 6. Carreador entre as parcelas de cana-de-açúcar na área I (A); equipamentos alocados na estrutura acoplada ao trator (B); aquisição de dados (C); componentes utilizados para a aquisição de dados (D).

Na Figura 7 é ilustrada a configuração de posicionamento do sistema de mensuração, onde os eixos x e y representam, respectivamente, a direção de movimento do trator agrícola e a direção de varredura pelo sensor a laser. A coordenada z é calculada a partir do ângulo de medição (α) do sensor a laser e da distância do sensor em relação ao solo (H).

Figura 7. Configuração de posicionamento do sistema de mensuração. Adaptado de Selbeck et al., 2010.

Os valores de distância fornecidos pelo sensor a laser são na forma de coordenadas polares, os quais foram convertidos em coordenadas cartesianas (X-Y-Z) a partir das equações 1 a 3. Cada ponto ij representa o registro de posicionamento dos pontos atingidos pelo feixe de luz proveniente do sensor a laser.

$$X = d_{ij} \sin(\alpha_{ij}) \quad (1)$$

$$Y = y_{ij} \quad (2)$$

$$Z = H - d_{ij} \cos(\alpha_{ij}) \quad (3)$$

em que: X: coordenada cartesiana do eixo x no ponto ij (m); ij: registro de posicionamento dos pontos atingidos pelo feixe de luz; d_{ij} : distância entre o sensor a laser e o alvo (mm); α_{ij} : ângulo de medição do sensor a laser ($^{\circ}$); Y: coordenada cartesiana do eixo y no ponto ij (m); y_{ij} : direção de varredura pelo sensor a laser; Z: coordenada cartesiana do eixo z no ponto ij (m); H: altura do sensor a laser em relação ao solo (mm).

A partir dessas configurações são registradas múltiplas leituras do dossel de plantas com o trator agrícola em movimento, sendo que cada leitura representa uma sessão longitudinal do dossel de plantas no sentido de deslocamento. A definição do ângulo de leitura em relação ao solo não foi alterada devido a independência dessa variável para o tipo de sensor a laser empregado nesse estudo, como relatado por Ehlert e Heisig (2013).

Para a aquisição de dados do sensor a laser o protocolo de comunicação RS422 foi utilizado com taxa de transmissão a 500 kbps e o receptor GNSS a 115200 bps (RS232) por meio da conexão de conversor Serial-USB ao computador portátil Toughbook CF-19 (Panasonic, EUA) específico para as condições de campo com alta capacidade de processamento (Intel® Core i5TM, 16 GB SDRAM). O computador possui uma rotina de programação para a aquisição de dados desenvolvida em linguagem Java no *software* Processing 2.2.1 (FRY e REAS), sendo necessário indicar a porta de comunicação serial (COM) na qual os equipamentos são conectados e a taxa de

transmissão de dados (Baud Rate) configurada para cada equipamento. A síntese da rotina de aquisição de dados é apresentada na Figura 8.

Figura 8. Rotina de programação para a aquisição de dados do sistema de mensuração.

O sensor de orientação estático foi conectado via USB a um computador portátil com o *software* sbgCenter (SBG Systems, França) instalado, no qual é possível selecionar as variáveis de interesse para a aquisição de dados. Nesse estudo foram selecionadas as variáveis *roll*, *yaw*, *pitch* e a aceleração no eixo z com a taxa de aquisição configurada em 115200 bps.

Os dados brutos obtidos pelo sistema de mensuração são apresentados no formato exemplificado na Figura 9, contendo o georreferenciamento (latitude, longitude e elevação) e os dados de distância entre o sensor a laser e as plantas em cada ângulo de medição.

			...	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	...
Latitude (°)	Longitude (°)	Elevação (m)		mm											
-22.684.232.711.792	-47.645.771.980.286	550.256.469.726.563	...	6134	5997	5948	5555	5482	2937	2968	2998	3140	3444	2085	...
-22.684.232.711.792	-47.645.772.171.021	550.253.112.792.969	...	6142	6005	6041	5585	5460	2953	2974	2996	3038	3608	2389	...
-22.684.232.751.947	-47.645.772.291.485	550.252.842.953.331	...	5735	6000	6140	3238	5450	2935	2958	3025	3016	3100	3211	...
-22.684.232.755.293	-47.645.772.301.523	550.252.820.466.694	...	5214	6039	3391	3224	3259	3077	2933	2954	2920	2906	2911	...
-22.684.232.758.639	-47.645.772.311.562	550.252.797.980.058	...	5171	3462	7199	3045	3278	3243	3231	3068	3223	3208	3113	...
-22.684.232.761.985	-47.645.772.321.601	550.252.775.493.421	...	8139	3416	5213	3043	3273	3252	3243	3029	3202	3212	3220	...
-22.684.232.765.332	-47.645.772.331.639	550.252.753.006.785	...	8110	3418	5210	3051	3277	3249	3240	2994	3212	3212	3212	...
-22.684.232.768.678	-47.645.772.341.678	550.252.730.520.148	...	8121	3415	5212	3048	3206	3266	3233	2986	3217	3210	3205	...
-22.684.232.772.024	-47.645.772.351.717	550.252.708.033.512	...	7551	5549	5219	6276	3042	3237	3195	3006	3183	3206	3175	...
-22.684.232.775.370	-47.645.772.361.755	550.252.685.546.875	...	7283	6281	5232	5501	3049	3096	3086	3029	3122	3173	3142	...
-22.684.232.779.912	-47.645.772.389.003	550.252.750.941.685	...	7263	6348	5284	5428	3039	3057	3069	3037	3102	3136	3126	...
-22.684.232.811.701	-47.645.772.579.738	550.253.208.705.357	...	7274	6387	5298	5408	3041	3044	3064	3058	3084	3125	3102	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Figura 9. Dados brutos provenientes do sistema de mensuração.

O processamento do conjunto de dados brutos foi desenvolvido no *software* RStudio 1.0.136 (R Core Team), sendo necessário indicar na rotina de programação a altura do sensor a laser (H) em relação ao solo. Na Figura 10 é apresentado o fluxograma referente ao processamento de dados provenientes do sensor a laser e do receptor GNSS.

Figura 10. Rotina de programação para o processamento de dados brutos.

Devido às diferentes frequências de coleta de dados dos equipamentos e das dimensões das áreas experimentais o conjunto de dados provenientes do sistema foi interpolado pelo método inverso da distância ao quadrado, o qual é considerado adequado para as aplicações LiDAR (ANDERSON et al., 2005). O resultado do processamento de dados é um único arquivo no formato de texto com a indicação de distância em relação ao alvo (altura de vegetação) e as respectivas coordenadas geográficas. A partir desse arquivo é possível gerar a nuvem de pontos na qual cada ponto impactado pelo feixe de luz possui sua coordenada alocada no sistema de referência de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM).

A nuvem de pontos foi analisada e editada por meio do *software* CloudCompare 2.8 (Girardeau-Montaut) para a identificação do dossel de plantas de cana-de-açúcar e o nível do solo, sendo necessária a filtragem de dados após o processamento de dados devido a presença de ruídos identificados como pontos discrepantes aos perímetros das áreas experimentais e a sobreposição de dados referentes a 4,0 m das parcelas centrais na área I.

A fim de otimizar o tempo de processamento de dados obtidos pelo sistema de mensuração as parcelas de cada área experimental foram individualizadas de modo a obter os valores de totalização a serem avaliados no estudo. Tal processo ocorreu por meio do georreferenciamento do perímetro de cada parcela com o uso do sinal GNSS RTK durante a aquisição de dados.

A partir dos arquivos gerados na etapa de individualização das parcelas experimentais foi calculada a altura média de vegetação ($\bar{H}$) referente a todos os pontos pertencentes a nuvem de pontos em planilha eletrônica, conforme a equação 4.

$$\bar{H} = \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{n} \quad (4)$$

em que: $\bar{H}$: altura média de vegetação (m); z_i : coordenada cartesiana do eixo z no ponto i (m); n: número de pontos pós-processamento.

O coeficiente de variação (CV) foi calculado em planilha eletrônica, conforme a equação 5, para a verificação da variabilidade espacial das alturas indicadas pelo sensor a laser e para as medidas de biometria avaliadas nas áreas experimentais I e II.

$$CV = \frac{100 \times \sigma}{\bar{H}} \quad (5)$$

em que: CV: coeficiente de variação (%); σ : desvio padrão (m); $\bar{H}$: altura média de vegetação (m).

A fim de verificar a distribuição de plantas foi calculado o percentil a 99,0% (P99) que corresponde aos dados de altura de 99,0% dos pontos impactados pelo sensor a laser desconsiderando os valores do nível do solo ($z > 0,30$ m), como proposto por Selbeck et al. (2010). Para isso, uma grade regular de 1,50 m x 1,50 m foi sobreposta à nuvem de pontos para o cálculo dos valores locais de P99. A dimensão da grade se deve à distância de 1,50 m entre as fileiras de plantas de cana-de-açúcar. As métricas LiDAR extraídas neste estudo são a altura média, mediana, máxima e P99 de vegetação.

3.3. Influência da vibração no conjunto de dados LiDAR

As unidades de medição inercial (IMU-*inertial measurement unit*) são utilizadas como dispositivos para amenizar os erros de posicionamento dos feixes de luz impactados pelo sensor a laser. As irregularidades do terreno durante a aquisição de dados em campo podem causar desalinhamentos da ordem de 2,0° sobre o direcionamento do ângulo do feixe de luz (PALLEJÀ et al., 2010; DEL-MORAL-MARTINEZ et al., 2016). Além do desalinhamento, o impacto na estrutura de suporte dos sensores pode ser ocasionado devido a interação pneu-solo e a vibração do motor do trator (DAVID et al., 2016).

Os dados originados pelo sensor de orientação estático foram processados em uma rotina de programação descrita no *software* Matlab 9.1 (MathWorks, EUA) considerando a aceleração na componente vertical ($\ddot{z}$) como a soma entre o dado bruto e a aceleração da gravidade (9,80 m s⁻²).

O grau de influência da aceleração na componente vertical ao sistema de mensuração foi verificado por meio do cálculo da densidade espectral de potência baseando-se na Transformada Discreta de Fourier (HAYES, 2006), conforme a equação 6.

$$S_a(f_i) = \frac{1}{F_s N} \left| \sum_{i=1}^N \ddot{z}_i e^{-j2\pi N f_i i} \right|^2 \quad (6)$$

em que: S_a : densidade espectral de potência (dB); f_i : i° frequência do espectro discreto (Hz); F_s : frequência na qual o sinal foi amostrado (Hz); N : número de pontos amostrados em determinado intervalo de tempo; $\ddot{z}_i$: i° aceleração na componente vertical ($m\ s^{-2}$).

As amplitudes de aceleração na componente vertical (A_z) foram analisadas no domínio do tempo por meio do cálculo da raiz do valor quadrático médio (RMS), conforme a equação 7.

$$A_{z_{RMS}} = \left[\frac{1}{i} \sum_i \ddot{z}_{i1}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

em que: $A_{z_{RMS}}$: valor de RMS referente a aceleração na componente vertical ($m\ s^{-2}$); $\ddot{z}_{i1}$: i° aceleração na direção vertical ($m\ s^{-2}$).

A partir da obtenção de dados de oscilação (*roll*, *pitch* e *yaw*), dos cálculos de densidade espectral de potência e do valor de RMS para a aceleração no eixo z é possível verificar se há influência da vibração no conjunto de dados LiDAR em condições de campo.

3.4. Caracterização do sistema de mensuração

A caracterização do desempenho do sistema de mensuração foi desenvolvida a fim de quantificar o erro intrínseco quanto ao funcionamento sincronizado do sensor a laser e do receptor GNSS por meio de avaliações com objetos 2D e 3D de dimensões pré-estabelecidas (Tabela 3).

Tabela 3. Objetos utilizados para a caracterização do sistema de mensuração.

Objetos 2D	Dimensão A (m)	Dimensão B (m)	Área (m ²)	
Quadrado	1,0	1,0	1,0	
Círculo	1,0	-	0,79	
Triângulo	1,0	0,87	0,44	
Objetos 3D	Dimensão A (m)	Dimensão B (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Cilindro I	0,83	0,20	0,52	0,03
Cilindro II	0,80	0,30	0,75	0,06
Tronco de cone	0,64	0,45	0,77	0,07

O círculo foi construído com diâmetro de 1,0 m e o triângulo é isósceles. O cilindro I apresenta diâmetro de base de 0,20 m e o cilindro II de 0,30 m. O tronco de cone tem diâmetro de corte (base menor) de 0,31 m. A Figura 11 ilustra os objetos 2D e 3D utilizados.

Figura 11. Objetos 2D e 3D: quadrado (I); círculo (II); triângulo isósceles (III); cilindro (IV); tronco de cone (V).

A principal diferença dessa etapa em relação a etapa de campo se refere ao posicionamento do sensor a laser em relação ao alvo e pelo veículo agrícola (Gator XUV 855D, John Deere). Nesse caso, o sensor a laser é posicionado no plano vertical em relação aos objetos 2D e 3D, sendo estes distanciados de 2,0 m em relação ao sistema de mensuração com o deslocamento dos equipamentos a velocidade constante de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ ($3,6 \text{ km h}^{-1}$) em condições de terreno regular (Figura 12). As medições dos objetos 3D foram realizadas nos dois lados dos objetos utilizando o mesmo sistema de georreferenciamento. As configurações e os procedimentos para a aquisição e processamento dos dados são as mesmas descritas previamente (item 3.2).

Figura 12. Sistema de mensuração acoplado ao veículo agrícola (COLAÇO et al., 2015) (A); objeto 3D (B).

A partir da obtenção da nuvem de pontos gerada pelo processamento de dados brutos do sistema de mensuração foi possível extrair algumas informações como a área e o volume de cada objeto utilizando o *software* CloudCompare 2.8 (Girardeau-Montaut, 2014). Foi estabelecido como critério de comparação o erro percentual entre as medidas reais dos objetos e a estimativa das medidas a partir dos dados gerados pelo sistema de mensuração.

3.5. Área experimental para os estudos com cana-de-açúcar

A avaliação do sistema de mensuração foi realizada em duas áreas experimentais planejadas e conduzidas pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) na Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA), Polo Centro Sul, em Piracicaba, SP, nos anos 2015 e 2016. No primeiro ano uma das áreas (área I) foi utilizada a fim de compor a etapa de desenvolvimento da metodologia. No segundo ano foram utilizadas duas áreas experimentais para a aquisição de dados cerca de 10 dias antes da colheita de cana-de-açúcar.

A definição dessas áreas ocorreu devido à presença de carregadores entre as parcelas experimentais, permitindo o tráfego do veículo agrícola com a estrutura porta-sensores acoplada para a aquisição de dados envolvendo todas as fileiras de plantas instaladas nas áreas experimentais.

A área I corresponde a 0,77 ha localizada nas coordenadas geográficas 22°40'27"S e 47°38'14"O e 549,0 m acima do nível do mar. A área II é de 0,56 ha e localizada nas coordenadas geográficas 22°41'02"S e 47°38'44"O e 552,0 m acima do nível do mar. Ambas as áreas apresentam solos classificados como Latossolo Vermelho-Eutrófico de textura muito argilosa (EMBRAPA, 1999) e foram implantadas em 2013, portanto, o período do estudo envolve a cana-de-açúcar de segundo e terceiro cortes de 12 meses de idade em cada ciclo.

A variedade de cana-de-açúcar IAC 95-5094 foi instalada na área I (Figura 13) com delineamento experimental de blocos aleatorizados com diferentes níveis de adubação nitrogenada (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ N) em 16 parcelas experimentais, sendo oito parcelas de dimensões 15,0 m x 30,0 m cada e oito parcelas centrais de 12,0 m x 30,0 m cada. O espaçamento adotado entre as fileiras de plantas é de 1,50 m.

Figura 13. Vista superior da área experimental I (a); disposição das parcelas (b).

Na área II (Figura 14) a variedade IAC 95-5000 foi instalada em delineamento experimental de blocos aleatorizados com os mesmos níveis de adubação e espaçamento descritos para a área I. O experimento envolve 28 parcelas experimentais com dimensões de 7,50 m x 15,0 m cada. O tratamento experimental composto por diferentes doses de nitrogênio não é o enfoque desse estudo, sendo os tratamentos apresentados apenas para a caracterização das áreas experimentais.

Figura 14. Vista superior da área experimental II (a); disposição das parcelas (b).

A classificação climática de Köppen para a região do estudo é definida por Rolim et al. (2007) como AW (clima tropical com estação seca de inverno). A Figura 15 ilustra os dados de precipitação acumulada mensalmente e as médias mensais de temperatura do ar para os anos 2015/16 na região de estudo. Os dados são oriundos do Posto Meteorológico da ESALQ/USP localizada em Piracicaba, SP.

Figura 15. Precipitação mensal acumulada e temperatura do ar média mensal para os anos 2015/16 em Piracicaba, SP. Posto Meteorológico da ESALQ/USP.

A colheita mecanizada de cana-de-açúcar na área I ocorreu no mês de setembro em 2015 e a colheita manual (sem queima) ocorreu em julho de 2016 para ambas as áreas. Durante a segunda etapa do estudo (2016) as áreas experimentais apresentavam tombamento de plantas ocasionado, principalmente, por ventos com velocidades atípicas para a região de Piracicaba, SP. Na Figura 16 observa-se a velocidade média de ventos acima de $1,94 \text{ m s}^{-1}$ ($7,0 \text{ km h}^{-1}$) para o período de aquisição de dados (junho-julho) em 2016. Os dados são oriundos do Posto Meteorológico da ESALQ/USP.

Figura 16. Velocidade média mensal do vento para os anos 2015/16 em Piracicaba, SP. Posto Meteorológico da ESALQ/USP.

O tombamento de plantas nas áreas experimentais I e II (Figura 17) observado em 2016 influencia a aquisição de dados por prejudicar a estrutura da vegetação e, consequentemente, a capacidade do sensor a laser em identificar a distribuição de plantas. Porém, tal condição deve ser considerada para lavouras comerciais de cana-de-açúcar em que a presença de plantas acamadas resulta em limitações operacionais à colheita mecanizada. O tombamento é denominado como o deslocamento superior a $60\text{-}70,0^\circ$ do porte vertical das plantas (AMAYA et al., 2000) devido a alguns fatores, como a altura de colmos, desenvolvimento da vegetação, ação dos ventos e limitações nutricionais nos colmos ou raízes das plantas (SINGH et al., 2000).

Figura 17. Vista superior parcial da área experimental I (A); área II total (B). Grupo de Pesquisa e Extensão em Topografia e Geoprocessamento (TOPOGEO) - ESALQ/USP.

3.6. Medidas de biometria

Para o estabelecimento de comparações entre os parâmetros de produção de cana de cada área experimental e os dados provenientes do sistema de mensuração foram realizadas medidas manuais 15 dias antes da colheita de cana-de-açúcar para a área I em 2015 e 20 dias antes da colheita para as áreas I e II em 2016.

A altura de colmos foi medida por meio de régua topográfica tendo como referência o nível do solo até a inserção da primeira folha completamente expandida (folha +1) (OLIVEIRA et al., 2014; AMARAL, 2014). O diâmetro de colmos foi medido no terço médio da planta por meio de paquímetro digital com a escala em cm. Tais medidas foram obtidas tendo como amostra 10 plantas de cada parcela nas áreas experimentais I e II. A partir das medidas amostrais foram obtidas as médias de altura e diâmetro de colmos para cada parcela.

A contagem do número de colmos foi realizada utilizando fileiras de 2,0 m de comprimento de três linhas centrais de cada parcela nas áreas I e II. O número total de colmos por metro linear foi calculado conforme a equação 8.

$$C = \frac{NC}{L \times n} \quad (8)$$

em que: C: número de colmos por metro linear; NC: somatória do número de colmos das linhas centrais; L: comprimento da linha de plantio (m); n: número de linhas avaliadas.

Na área experimental I (2015) foram obtidas a massa de colmos, ponteiros e palha das plantas pertencentes as fileiras de 2,0 m de comprimento nas três fileiras centrais de cada parcela. A produtividade de cana-de-açúcar foi estimada pelo método proposto por Martins e Landell (1995), conforme a equação 9.

$$TCH = \left(\frac{P \times C}{E} \right) \times 10 \quad (9)$$

em que: TCH: produtividade estimada (t colmos ha⁻¹); P: razão entre a massa e o número de colmos do feixe (kg/colmo); C: número de colmos por metro linear; E: espaçamento entre sulcos (m).

A pesagem de cana-de-açúcar (ponteiros, palha e colmos) foi realizada em 2016 para cada parcela em ambas as áreas experimentais por meio de uma célula de carga (Kyowa®) com capacidade máxima de 1,0 kN instalada em uma carregadora de cana modificada. A célula de carga foi conectada a uma balança digital portátil (Weightech WT3000-ABS) com resolução de 0,02 kg previamente calibrada. A partir da pesagem do material foi calculada a produtividade de cada parcela correspondente as áreas experimentais I e II.

3.7. Análise dos resultados de campo

Devido ao número reduzido de parcelas experimentais disponíveis ao estudo não foi possível a análise estatística de variância para a verificação da significância pertencente ao conjunto de dados LiDAR. Portanto, os resultados são apresentados em formato de tabelas e gráficos representando a estatística descritiva do conjunto de dados e comparações acerca do comportamento das variáveis avaliadas nesse estudo.

A investigação acerca do potencial do sensor a laser para a estimativa de produtividade de cana-de-açúcar de forma georreferenciada foi realizada por meio de regressões de Pearson e de modelos de regressão entre as variáveis aferidas em campo e a altura de vegetação indicada pelo sistema de mensuração.

A verificação da influência de vibração no conjunto de dados LiDAR em condições de campo foi realizada adotando o valor do RMS como critério quanto a amplitude de oscilações nas componentes longitudinal, lateral e vertical referente ao deslocamento do suporte de sensores acoplado ao trator.

A estatística descritiva e as regressões de Pearson ($\alpha=0,05$) foram realizadas no *software* Minitab 17.3.1 (Minitab, 2013) utilizando o conjunto de dados provenientes do sistema de mensuração e as medidas de biometria. Os modelos de regressão ($p<0,05$) foram gerados envolvendo os dados processados provenientes do sistema de mensuração e as medidas de biometria de cana-de-açúcar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Avaliação da acurácia do sistema de mensuração

A obtenção de medidas (altura e diâmetro) a partir do modelo tridimensional dos objetos permitiu o cálculo estimado de área e volume dos mesmos. As Figuras 18 e 19 representam as nuvens de pontos dos objetos 2D e 3D, respectivamente, geradas na etapa de caracterização do sistema de mensuração.

Figura 18. Nuvem de pontos referente aos objetos 2D: quadrado (A); triângulo (B); círculo (C).

Figura 19. Nuvem de pontos referente aos objetos 3D: cilindro I (A); cilindro II (B); tronco de cone (C).

A acurácia das medidas na nuvem de pontos é avaliada baseando-se nas dimensões dos objetos e não pelo erro real de posicionamento de cada feixe de luz emitido pelo sensor a laser, o qual seria a condição ideal. As faixas visualizadas na Figura 18 se devem ao sentido da varredura realizada de acordo com o posicionamento do sistema de mensuração em relação aos objetos.

A etapa de caracterização do sistema de mensuração permitiu verificar a acurácia do sistema de mensuração em forma de erro percentual (Tabela 4) entre as medidas reais dos objetos e a estimada a partir da nuvem de pontos gerada pelo sistema de mensuração em condições de terreno regular.

Tabela 4. Erro percentual entre as medidas reais dos objetos e a estimada pelo sistema de mensuração.

Erro percentual (%)				
Objetos 2D	Dimensão A	Dimensão B	Área	
Quadrado	5,77	1,40	7,09	
Círculo	-1,17	-	-1,85	
Triângulo	2,30	2,36	2,15	
Objetos 3D	Dimensão A	Dimensão B	Área	Volume
Cilindro I	2,48	0,26	2,22	0,14
Cilindro II	0,42	0,42	1,43	0,18
Tronco de cone	1,55	0,05	-13,0	0,16

Verifica-se um maior nível de erro (5,77%) do sistema de mensuração para os objetos 2D que apresentam bordas pontiagudas em seu formato (quadrado e triângulo). Tal resultado corrobora com o investigado por Dworak et al. (2011) e Sanz-Cortiella et al. (2011a) justificando que o desempenho do sensor a laser está associado a regularidade de formato do objeto-alvo e a geometria do feixe de luz emitido pelo sensor. A estimativa de medidas para os objetos 3D apresentou-se satisfatória e a área referente ao tronco de cone foi subestimada (-13,0%) devido ao maior detalhamento do objeto em relação aos demais e, consequentemente, maior dificuldade de identificação de suas medidas na nuvem de pontos (Figura 19C).

No enfoque desse estudo a irregularidade no formato da folha de cana-de-açúcar pode ser considerada como uma fonte de erro ao sistema devido a deformação das folhas no período de maturação das plantas. A etapa de caracterização do sistema de mensuração evidencia que o conjunto sensor a laser e o receptor GNSS apresentam erros de baixa amplitude que não interferem na confiabilidade das medidas.

Durante a aquisição de dados nas etapas de caracterização do sistema de mensuração e de campo foi observado que a incidência de luz solar de forma contínua no sensor a laser interrompe a coleta de dados pela comunicação serial entre o equipamento e o computador. O mesmo efeito foi observado nas avaliações de Ehlert et al. (2006) quanto ao uso de sensores a laser em condições de ambiente controlado e de campo. Uma possível solução é a utilização do sensor em horários de menor intensidade luminosa ou uma estrutura de proteção ao sensor para a reflexão regular de luminosidade.

4.2. Geração da nuvem de pontos

Na Tabela 5 é apresentada a estatística descritiva dos dados processados a partir do conjunto de dados proveniente do sensor a laser na área experimental I (2015 e 2016). Os dados processados se referem a etapa posterior ao procedimento de limpeza dos dados brutos, como a eliminação de valores discrepantes (*outliers*) e a sobreposição causada devido às dimensões das parcelas experimentais. No Apêndice A é apresentado o conjunto de dados obtidos pelo sistema de mensuração para as parcelas experimentais da área I.

Tabela 5. Estatística descritiva de dados processados do sistema de mensuração para a área I (2015 e 2016).

Altura de vegetação (m)							
Ano	Número de pontos	Mínima	Máxima	Média	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
2015	27.066.379	0,15	3,21	1,67	1,84	0,75	44,85
2016	15.855.696	0,16	4,50	2,76	2,86	0,70	25,38

A partir da Tabela 5 verifica-se que a altura mínima da nuvem de pontos pertencente a área I é de 0,15 m e 0,16 m para 2015 e 2016, respectivamente. Tal altura mínima se refere a distância entre o receptor GNSS e o sensor a laser acoplados no suporte, por isso a distância mínima (nível do solo) na nuvem de pontos não corresponde a 0 m.

Na Tabela 6 é apresentada a estatística descritiva dos dados processados a partir do conjunto de dados proveniente do sensor a laser na área experimental II. O conjunto de dados do sistema de mensuração para as parcelas experimentais dessa área é apresentado no Apêndice B.

Tabela 6. Estatística descritiva de dados processados do sistema de mensuração referente à área II (2016).

Altura de vegetação (m)						
Número de pontos	Mínima	Máxima	Média	Mediana	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
17.825.104	0,24	4,0	2,12	2,72	0,71	33,49

Uma das características do emprego de sensores a laser é a alta capacidade de aquisição de dados, como verificado nas Tabelas 5 e 6, o número de pontos alocados na nuvem de pontos é da ordem de 15-27,0 milhões. Portanto, optou-se pela individualização da nuvem de pontos para cada parcela experimental avaliada como uma abordagem para este estudo, tendo em vista que era a menor unidade em que se dispunha de dados de biometria. Em áreas contínuas e extensas, essa abordagem deverá ser revista, provavelmente com a utilização de camada de superfície raster (matrizes de células distintas que descrevem cada *pixel*) e *pixels* de menor dimensão.

A estatística descritiva dos dados pós-processamento do sistema das áreas I e II (Tabelas 5 e 6) indica um coeficiente de variação (CV) de 44,85% e 33,49%, respectivamente. Nesse caso, o valor elevado do CV se refere a quantidade de pontos impactados e recepcionados pelo sensor a laser, independentemente do objeto-alvo ser correspondente ao solo ou ao dossel de plantas.

A densidade de pontos obtidos na área I é de aproximadamente 3.515 pontos m⁻² e 2.059 pontos m⁻² para 2015 e 2016, respectivamente. Para a área II a densidade de pontos é da ordem de 3.183 pontos m⁻². Em ambos os experimentos há a possibilidade de maior nível de detalhamento do dossel de plantas em comparação com as aplicações aéreas em que o sensor a laser é embarcado (LI et al., 2015; POPESCU, 2007).

A nuvem de pontos gerada após a filtragem do conjunto de dados provenientes do sistema de mensuração para a área experimental I (2015) é apresentada na Figura 20a. O histograma correspondente (Figura 20b) permite verificar a distribuição da altura de vegetação e o nível do solo no conjunto de dados.

Figura 20. Nuvem de pontos referente à área experimental I (2015) (a); histograma correspondente (b).

Cada ponto pertencente à nuvem de pontos se refere a um ponto impactado pelo feixe de luz emitido pelo sensor a laser nas condições do dossel de plantas de cana-de-açúcar com coordenadas geográficas alocadas no sistema de referência UTM. Diversos parâmetros podem ser extraídos ou calculados a partir da nuvem de pontos, como a altura média de vegetação ($\bar{H}$) considerando os valores do nível de solo e o percentil P99 relacionado a altura de vegetação envolvendo 99,0% dos pontos impactados pelo sensor a laser.

A nuvem de pontos gerada na etapa de individualização das parcelas experimentais é apresentada na Figura 21 tendo como exemplo a parcela de número 7 pertencente à área I, sendo o mesmo procedimento aplicado as demais parcelas pertencentes às áreas I e II.

Figura 21. Nuvem de pontos parcela número 7 da área I (2015) (a); histograma correspondente (b).

Devido a alta densidade de pontos e a arquitetura da vegetação de cana-de-açúcar nesse estágio de maturação há uma dificuldade em individualizar as plantas na nuvem de pontos, indicando que a resolução do sensor a laser empregado nesse estudo permite apenas a obtenção de feições de plantas em pequena escala.

A Figura 22 ilustra a nuvem de pontos referente a área I (2016), podendo ser verificado um comportamento do porte de plantas mais difuso em relação as condições da área no ano anterior (Figura 20). As falhas das fileiras de plantas alocadas na parte superior direita da Figura 22a se deve ao tombamento.

Figura 22. Nuvem de pontos referente à área experimental I (2016) (a); histograma correspondente (b).

De acordo com a Figura 22b poucos pontos do feixe de luz foram impactados no solo ($z < 0,50$ m), sendo a maioria dos dados deslocados na distribuição Gaussiana entre 3,50 e 4,50 m de altura de vegetação. A nuvem de pontos gerada a partir do conjunto de dados referente à área experimental II é apresentada na Figura 23. Assim como nas condições de campo da área I (2016), a nuvem de pontos referente à área II apresenta a detecção de ausência de plantas e a interferência do tombamento de plantas no desempenho do sensor a laser com uma maior detecção para o nível do solo (Figura 23b).

Figura 23. Nuvem de pontos referente à área experimental II (2016) (a); histograma correspondente (b).

A distribuição de plantas de cana-de-açúcar (Figuras 20 a 23) com as plantas muito próximas umas das outras e a sobreposição de folhas típica em condições de pré-colheita dificulta a detecção do porte de plantas. A partir da geração da nuvem de pontos apresentada na Figura 20 verifica-se a homogeneidade da altura de vegetação na área experimental I, indicando que devido ao tratamento experimental das parcelas e a menor escala do experimento não ocorreu variabilidade espacial nessas condições.

A nuvem de pontos correspondente aos dados de altura de vegetação para uma parcela experimental representando 99,0% dos pontos impactados (P99) pelo sensor a laser nas áreas I e II é apresentada na Figura 24.

Figura 24. Nuvem de pontos referente aos valores P99: área I (2015) parcela 1 (a); área II (2016) parcela 1 (b).

A camada de dados P99 correspondem aproximadamente a superfície do dossel de plantas e está mais associada às variações de produtividade de cultivos agrícolas (SELBECK et al., 2010; WATT et al., 2013). A principal vantagem da utilização dessa camada de dados é a possibilidade de obtenção das medidas de altura sem a influência dos pontos que representam o solo, além disso a capacidade do feixe de luz penetrar na vegetação de cana (folhas e colmos) e detectar o nível do solo depende da densidade de plantas.

As fileiras de plantas (eixo y) podem ser detectadas a partir da segmentação da nuvem de pontos, como apresentado na Figura 25.

Figura 25. Nuvem de pontos representando as fileiras de plantas da área I (2015) parcela 1.

A detecção de fileiras de plantas de cana-de-açúcar pode auxiliar na estimativa de falhas e no desenvolvimento vegetativo das plantas, impactando no rendimento de sua produção (FRASSON et al., 2007; MOLIN e VEIGA, 2016). Essa análise pode ser realizada apenas nas bordaduras das parcelas devido a capacidade do sensor em detectar o perfil vertical das plantas nas condições das áreas I e II.

Considerando as condições de campo nas áreas experimentais I e II em ambos os anos de estudo foi verificado que a incidência de luminosidade no sensor a laser interrompe a aquisição de dados e que a presença de folhas/plantas acamadas na lavoura durante o período pré-colheita é uma limitação para a avaliação das medidas de produção utilizando esse tipo de sensor.

A estimativa de produtividade a partir da altura de vegetação para os casos em que haja plantas acamadas nas lavouras, em razão de ventos ou da variedade de cultura instalada em campo, pode ser baseada no parâmetro porosidade desenvolvido por Escolà et al. (2016) para o cultivo de oliveiras. Porém, a emissão de apenas um único pulso de feixe de luz pelo sensor LMS200 não permite a obtenção desse parâmetro.

4.3. Avaliação da influência de vibração no conjunto de dados

A estatística descritiva referente aos dados provenientes do sensor de orientação estático para as áreas I e II (2016) é apresentada na Tabela 7. A visualização do comportamento das variáveis obtidas pelo sensor no intervalo de tempo de aquisição de dados pode ser verificada no Apêndice C.

Tabela 7. Estatística descritiva de dados do sensor de orientação estático para as áreas I e II (2016).

	Roll (°)		Yaw (°)		Pitch (°)		Aceleração (m s ⁻²)		Potência (dB)	
	Área I	Área II	Área I	Área II	Área I	Área II	Área I	Área II	Área I	Área II
Mínimo	-305,06	-218,23	-79,80	-41,40	-305,25	-252,01	2,12	2,36	0	0
Máximo	182,92	171,93	0,00	-1,45	203,1	242,77	15,0	8,79	408,57	1.280,82
Média	23,86	7,09	-28,75	-21,07	7,47	-0,36	3,95	4,72	174,58	1,96
DP	36,79	27,83	5,42	13,53	59,71	34,36	0,52	1,09	142,80	8,27
RMS	43,85	28,72	29,26	25,04	60,17	34,36	3,99	4,84	225,24	8,50

DP: desvio padrão; RMS: raiz do valor quadrático médio

As medidas de oscilação (*roll*, *pitch* e *yaw*) apresentaram alto desvio padrão (até 59,71°) devido a sensibilidade do sensor em adquirir dados acima e abaixo do eixo de referência (0°). A aceleração calculada no eixo z apresentou RMS de 3,99 m s⁻² e 4,84 m s⁻² para as áreas I e II, respectivamente, os quais são considerados valores comuns na literatura. A densidade espectral de potência apresentou maior RMS para a área I (225,24 dB). A Figura 26 ilustra a densidade espectral de potência calculada de acordo com a aceleração na componente vertical (*z*) e as respectivas frequências de amostragem do sinal nas áreas I e II.

Figura 26. Densidade espectral de potência: área experimental I (A); área experimental II (B).

De acordo com a Figura 26 há um pico de amplitude de potência em torno de 4,0 Hz em ambos os casos, indicando o efeito da rotação do motor do trator agrícola na estrutura de suporte dos sensores. A alta amplitude de potência verificada na área I (desvio padrão=142,80 dB) sugere a necessidade de implementação de sistemas de estabilização que podem ser aplicados na etapa de pós-processamento dos dados, sendo que cada sistema deve ser desenvolvido de acordo com a magnitude do sinal de vibração e do tipo de veículo agrícola utilizado em condições de campo (DAVID et al., 2016).

O espectro de potência apresentado na Figura 26 pode ser dividido em duas análises, a primeira envolve as frequências inferiores a 1,0 Hz com amplitudes médias de 174,58 dB (área I) e 1,96 dB (área II) ocasionadas pela transferência de vibrações mecânicas ao sistema de mensuração. A segunda análise corresponde a frequências em torno de 4,0 Hz, a qual está associada a rotação do motor do trator agrícola utilizado nesse estudo (CUNHA et al., 2009). Kang e Kaizu (2011) encontraram frequências entre 5-10 Hz para a operação de colheita de gramínea

utilizando um sensor de orientação semelhante ao empregado nesse estudo, excedendo o limite de 2,0 Hz estipulado pela norma ISO 2631 (1974) referente à ergonomia da operação.

A influência da vibração e a incidência de luminosidade no sensor a laser podem ser solucionados com ferramentas de estabilização e com filtros que amenizam a sensibilidade do equipamento à luminosidade, respectivamente, como ocorre para os sensores a laser de aplicações *outdoor*. Os critérios de determinação do sensor empregado em condições de campo devem considerar tais componentes.

4.4. Relação entre os parâmetros de produção e o conjunto de dados LiDAR

As medidas de biometria avaliadas na área experimental I em 2015 e 2016 são apresentadas no Apêndice D. Na Tabela 8 é apresentada a estatística descritiva referente ao conjunto de dados de biometria para a área experimental I.

Tabela 8. Estatística descritiva dos dados de biometria para a área experimental I (2015 e 2016).

		Massa (kg m ⁻¹)				Altura de colmos (m)	Diâmetro de colmos (cm)	Produtividade (t ha ⁻¹)
		Colmo	Ponteiro	Palha	C			
Mínimo	2015	19,38	2,42	2,82	11,76	3,40	0,11	93,20
	2016	-	-	-	12,13	3,42	0,11	107,90
Máximo	2015	51,74	5,08	7,40	13,79	3,75	0,19	130,0
	2016	-	-	-	13,99	4,41	0,20	134,0
Média	2015	31,85	3,37	4,53	12,45	3,64	0,14	107,43
	2016	-	-	-	12,94	4,0	0,16	122,10
Desvio padrão	2015	7,58	0,68	1,08	0,57	0,09	0,03	11,48
	2016	-	-	-	0,51	0,31	0,04	9,33
CV (%)	2015	23,81	20,32	23,87	4,62	2,61	21,84	10,68
	2016	-	-	-	3,92	7,63	23,24	7,65

- não avaliado em 2016; C: número de colmos m⁻¹; CV: coeficiente de variação

De acordo com a Tabela 8 verifica-se um número de colmos médio por metro linear de 12,45 (2015) e 12,94 (2016) com coeficientes de variação (CV) de 4,62% e 3,92%, respectivamente. A altura de colmos apresentou variação de aproximadamente 5,0% entre os anos de estudos. Os valores de diâmetro médio de colmos e produtividade média apresentaram valores superiores em 2016 quando comparados ao ano de 2015, tal fato pode ser atribuído a elevada precipitação em 2016 e, conseqüentemente, um maior acúmulo de biomassa nas plantas (MARIN e NASSIF, 2013).

A correlação entre as variáveis de biometria e a produtividade na área experimental I é apresentada na Tabela 9. As medidas obtidas pelo sistema de mensuração (altura máxima de vegetação, média, mediana e P99) também são confrontadas aos parâmetros de biometria (altura e diâmetro de colmos, produtividade, etc.).

Tabela 9. Correlações entre as medidas de biometria e os dados do sistema de mensuração para a área I (2015 e 2016).

		Biometria										Sistema de mensuração								
		Massa			Número de colmos m ⁻¹		Altura de colmos		Diâmetro de colmos		Produtividade		Máxima		Média		Mediana		P99	
		Colmo	Ponteiro	Palha	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Biometria	Colmo	1,0	0,79	0,91	0,07	-	-0,01	-	0,53	-	0,02	-	0,20	-	0,19	-	0,18	-	0,56	-
	Ponteiro	0,79	1,0	0,73	0,05	-	0,05	-	0,53	-	-0,42	-	0,17	-	0,26	-	0,25	-	0,59	-
	Palha	0,91	0,73	1,0	0,30	-	0,19	-	0,43	-	-0,13	-	-0,08	-	0,05	-	0,04	-	0,50	-
	Número de colmos m ⁻¹	0,07	0,05	0,30	1,0	0,14	0,50	0,22	0,27	0,23	-0,04	-0,13	-0,40	-0,37	-0,51	-0,44	-0,53	-0,42	-0,22	-0,51
	Altura de colmos	-	-	-	0,14	1,0	0,28	0,18	0,01	0,00	-0,29	0,40	-0,29	0,42	-0,22	0,19	-0,22	0,18	0,22	0,03
	Altura de colmos	-0,01	0,05	0,19	0,50	0,28	1,0	0,01	-0,13	0,28	0,25	-0,04	-0,41	-0,13	-0,46	-0,13	-0,47	-0,14	-0,23	-0,18
	Altura de colmos	-	-	-	0,22	0,18	0,01	1,0	0,10	-0,32	0,18	0,10	-0,02	-0,11	-0,07	0,20	-0,09	0,25	0,23	0,20
	Diâmetro de colmos	0,53	0,53	0,43	0,27	0,01	-0,13	0,10	1,0	0,17	-0,29	0,88	0,33	-0,04	-0,03	-0,53	-0,07	-0,52	0,12	-0,48
	Diâmetro de colmos	-	-	-	0,23	0,00	0,28	-0,32	0,17	1,0	0,43	0,80	-0,07	-0,15	0,04	0,02	0,03	-0,01	0,05	-0,05
	Diâmetro de colmos	0,02	-0,42	-0,13	-0,04	-0,29	0,25	0,18	-0,29	0,43	1,0	0,78	0,16	0,07	-0,14	0,14	-0,16	0,16	-0,17	0,16
Sistema de mensuração	Produtividade	-	-	-	-0,13	0,40	-0,04	0,10	0,88	0,80	0,78	1,0	0,10	0,49	0,32	0,64	0,31	0,64	0,34	0,38
	Máxima	0,20	0,17	-0,08	-0,40	-0,29	-0,41	-0,02	0,33	-0,07	0,16	0,10	1,0	0,38	0,68	0,32	0,65	0,31	0,11	0,24
	Máxima	-	-	-	-0,37	0,42	-0,13	-0,11	-0,04	-0,15	0,07	0,49	0,38	1,0	0,10	0,39	0,08	0,40	0,00	0,49
	Média	0,19	0,26	0,05	-0,51	-0,22	-0,46	-0,07	-0,03	0,04	-0,14	0,32	0,68	0,10	1,0	0,55	1,0	0,53	0,48	0,33
	Média	-	-	-	-0,44	0,19	-0,13	0,20	-0,53	0,02	0,14	0,64	0,32	0,39	0,55	1,0	0,54	1,0	0,24	0,82
	Mediana	0,18	0,25	0,04	-0,53	-0,22	-0,47	-0,09	-0,07	0,03	-0,16	0,31	0,65	0,08	1,0	0,54	1,0	0,52	0,50	0,32
	Mediana	-	-	-	-0,42	0,18	-0,14	0,25	-0,52	-0,01	0,16	0,64	0,31	0,40	0,53	1,00	0,52	1,0	0,25	0,85
	P99	0,56	0,59	0,50	-0,22	0,22	-0,23	0,23	0,12	0,05	-0,17	0,34	0,11	0,00	0,48	0,24	0,50	0,25	1,0	0,10
	P99	-	-	-	-0,51	0,03	-0,18	0,20	-0,48	-0,05	0,16	0,38	0,24	0,49	0,33	0,82	0,32	0,85	0,10	1,0

- não avaliado em 2016; P99: percentil 99,0% dos valores de altura de vegetação.

Os resultados indicaram que os valores P99 estão correlacionados moderadamente ($r=0,56$) à massa de colmos e que há uma correlação moderada entre o diâmetro de colmos e a produtividade de cana-de-açúcar ($r=0,80$ para 2016). Assim como nos estudos de Tesche et al. (2014) não foi verificada correlação entre a densidade de plantas e a produtividade de cana, porém Simões et al. (2005) esclarecem que a densidade de plantas interfere no acúmulo de biomassa em estágios avançados de desenvolvimento das plantas. Além disso, a incidência de falhas de brotação das plantas nas lavouras influencia no acúmulo de biomassa a medida em que se adota maiores cortes consecutivos.

A correlação negativa ($r=-0,53$) entre o diâmetro de colmos e a altura de vegetação (máxima, média e mediana) obtida pelo sistema para as condições da variedade de cana-de-açúcar instalada na área I corrobora com o investigado por Oliveira et al. (2010), os quais analisaram diferentes variedades de cana-de-açúcar submetidas a mesma condição de campo e constataram o comportamento inversamente proporcional entre a altura e o diâmetro de colmos. O mesmo comportamento foi verificado quanto a correlação entre o número de colmos por metro linear e a altura média de vegetação indicada pelo sistema em 2015 ($r=-0,51$).

Houve uma correlação moderada ($r=0,64$) entre as medidas de altura média e mediana de vegetação obtidas pelo sistema e a produtividade indicada na área experimental I em 2016. Para 2015 não foi verificado o mesmo comportamento, o qual pode ser atribuído ao método de estimativa de produtividade.

As medidas de biometria avaliadas na área experimental II são apresentadas no Apêndice E. A estatística descritiva do conjunto de dados de biometria para essa área é apresentada na Tabela 10. A produtividade referente a parcela 4 (121,12 t ha⁻¹) foi considerada como *outlier* pelo comportamento discrepante em relação aos demais dados.

Tabela 10. Estatística descritiva dos dados de biometria para a área experimental II (2016).

	Número de colmos m ⁻¹	Altura de colmos (m)	Diâmetro de colmos (cm)	Produtividade (t ha ⁻¹)
Mínimo	25,09	3,55	0,11	76,74
Máximo	25,73	4,64	0,20	112,99
Média	25,43	3,98	0,15	99,58
Desvio padrão	0,18	0,31	0,03	11,48
CV (%)	0,71	7,74	17,97	11,53

CV: coeficiente de variação

Verifica-se um número de colmos médio por metro linear de 25,43 com coeficiente de variação de 0,71%, indicando baixa variabilidade dessa medida entre as parcelas experimentais pertencentes à área II. A altura de colmos máxima é de 4,64 m. O diâmetro de colmos e a produtividade apresentaram, dentre as medidas avaliadas, maiores valores de coeficiente de variação de 17,97% e 11,53%, respectivamente. Na Tabela 11 são apresentadas as correlações entre as medidas de biometria e as alturas de vegetação indicadas pelo sistema de mensuração para a área experimental II.

Tabela 11. Correlações entre as medidas de biometria e os dados do sistema de mensuração para a área II (2016).

		Biometria				Sistema de mensuração			
		Número de colmos m ⁻¹	Altura de colmos	Diâmetro de colmos	Produtividade	Máxima	Média	Mediana	P99
Biometria	Número de colmos m ⁻¹	1,0	-0,12	-0,31	0,20	0,08	0,24	0,19	0,10
	Altura de colmos	-0,12	1,0	0,09	-0,27	0,30	-0,02	0,06	0,10
	Diâmetro de colmos	-0,31	0,09	1,0	0,77	0,06	0,10	0,08	0,26
	Produtividade	0,20	-0,27	0,77	1,0	0,18	0,15	0,08	0,09
Sistema de mensuração	Máxima	0,08	0,30	0,06	0,18	1,0	0,59	0,59	0,73
	Média	0,24	-0,02	0,10	0,15	0,59	1,0	0,96	0,71
	Mediana	0,19	0,06	0,08	0,08	0,59	0,96	1,0	0,59
	P99	0,10	0,10	0,26	0,09	0,73	0,71	0,59	1,0

P99: percentil 99,0% dos valores de altura de vegetação.

Para as condições da área II não foram verificadas correlações significativas entre as medidas de biometria e as alturas de vegetação indicadas pelo sistema. Foi observado resultado semelhante a área I quanto a correlação entre o diâmetro de colmos e a produtividade ($r=0,77$).

O desempenho do sensor a laser em relação a produtividade de cana-de-açúcar foi satisfatório ($r=0,64$) sobretudo para as condições da área I (2016) com a pesagem de material das parcelas experimentais. O tombamento de plantas influenciou na capacidade de detecção do porte de plantas através do sensor a laser, porém não foi verificado interferência na produtividade. De acordo com Carlin et al. (2008) o período de até 95 dias após o tombamento de plantas não prejudica a produtividade de cana-de-açúcar.

A comparação entre as medidas de altura de colmos realizada manualmente e a altura de vegetação indicada pelo sistema foi realizada considerando a altura máxima da nuvem de pontos como representativa da altura

de plantas de cana-de-açúcar. A Figura 27 ilustra essa comparação em cada parcela da área I para os períodos de estudo.

Figura 27. Altura de colmos e a altura máxima de vegetação indicada pelo sistema para as parcelas da área I: 2015 (A); 2016 (B).

Para as condições da área I em 2015 observa-se um erro médio das medidas do sistema de 0,81 m em relação às medidas manuais de altura de colmos. Para o período de 2016 (Figura 27B) tais medidas foram superestimadas em até 1,0 m em relação as medidas de biometria. Na Figura 28 é apresentada a comparação entre as medidas de altura de colmos e a indicada pelo sistema considerando a altura máxima do conjunto de dados para a área II em cada parcela experimental.

Figura 28. Altura de colmos e a altura máxima de vegetação indicada pelo sistema para as parcelas da área II.

De acordo com a Figura 28 houve um erro médio entre as medidas de 0,65 m, sendo que na maioria das parcelas as medidas provenientes do sistema foram semelhantes às medidas de biometria. Devido a ausência de múltiplos pulsos emitidos pelo sensor a laser não se pode correlacionar os parâmetros locais amostrados, como a

altura de colmos e, portanto, foram considerados os valores de altura máxima indicada pelo sistema referentes a cada parcela experimental das áreas I e II (Figuras 27 e 28). O erro médio de 1,0 m entre as medidas de altura pode ser considerado como intrínseco aos métodos, tendo em vista que a própria medida de biometria de plantas pode apresentar incertezas no momento da aferição em campo.

Os modelos de regressão foram gerados baseando-se nos dados de altura média provenientes do LiDAR e os dados médios obtidos pela biometria para cada parcela das áreas experimentais. Essa análise foi realizada devido às distintas densidades amostrais dos métodos e fornece subsídio à caracterização e ao desenvolvimento do sistema de mensuração.

A Figura 29 apresenta os modelos de regressão linear e de potência para a estimativa de produtividade a partir da altura máxima e média indicada pelo sistema, respectivamente, para a área I. Tais medidas foram determinadas por melhor se correlacionarem com a produtividade (Tabela 9).

Figura 29. Modelos de regressão entre a produtividade e as alturas de vegetação indicadas pelo sistema na área I: altura máxima – modelo linear (A); altura média – modelo de potência (B).

De acordo com a Figura 29 há baixos coeficientes de determinação, $R^2=0,02$ a $R^2=0,41$, considerando as medidas de altura máxima e média, respectivamente. O ajuste dos modelos pode ter sido influenciado pelo método de estimativa de produtividade, pois em 2015 não houve a pesagem do material, mas sobretudo pela baixa variabilidade dos fatores. Os modelos de regressão polinomiais entre a produtividade e a altura máxima e média de vegetação para a área II são apresentados na Figura 30. Tais medidas foram determinadas por apresentarem maior correlação com a produtividade (Tabela 11).

Figura 30. Modelos de regressão entre a produtividade e as alturas indicadas pelo sistema na área II (2016): altura máxima – modelo polinomial (A); altura média – modelo polinomial (B).

De acordo com a Figura 30 há baixo valor de coeficiente de determinação ($R^2=0,22$ e $R^2=0,05$) entre as variáveis analisadas e uma distribuição irregular dos dados. Uma das causas pode ser o tombamento de plantas mais acentuado na área II. Além disso, as condições de pesagem do material para ambas as áreas em 2016 podem ter interferido na correlação entre as medidas de produção, já que o material pesado corresponde não apenas aos colmos de plantas, mas ao conjunto de ponteiros e de palha.

Os modelos de regressão entre a produtividade e a altura de vegetação gerados compõem o desenvolvimento do sistema de mensuração para a aplicação dos algoritmos de aquisição e processamento de dados em condições de campo. Portanto, é necessária a validação do sistema desenvolvido em áreas mais abrangentes e com maior repetibilidade para que se possa elaborar a análise estatística de forma consistente, com mais dados amostrais e com maior densidade para a sua calibração.

Comparando esses resultados com os estudos consolidados sobre a produção de grãos Selbeck et al. (2010) encontraram ajustes de regressão ($R^2=0,94$) entre os dados de biomassa real e a estimada pelo LiDAR, Saeys et al. (2009) desenvolveram algoritmos capazes de estimar biomassa de trigo em tempo real com o sensor a laser embarcado em colhedora através de ajustes entre 0,80 e 0,96.

O resultado de baixa correlação verificado nesse estudo entre a produtividade de cana-de-açúcar e as medidas de altura de vegetação indicadas pelo LiDAR não exclui a possibilidade de acompanhamento da lavoura e de predição do potencial produtivo de cana-de-açúcar. Apenas sugere que para a obtenção de um modelo mais adequado é necessária a informação de produtividade espacializada em alta resolução. Além disso, poderiam haver outras aferições em determinados momentos do ciclo de desenvolvimento das plantas em que seja possível a detecção mais nítida dos colmos na nuvem de pontos.

Para a validação do sistema proposto em escalas comerciais de cana-de-açúcar seria necessário o levantamento de dados em alta densidade e de modo contínuo para que a modelagem localizada da altura de colmos seja construída e comparada aos dados reais de produção e analisando as camadas de dados em formato raster, mas para tanto é necessária a disponibilização de um sistema de monitoramento de produtividade consolidado.

As folhas secas e os ponteiros das plantas podem ser considerados como ruídos na nuvem de pontos, pois a medida de interesse para a indústria corresponde aos colmos. Os períodos ideais de aquisição de dados em lavouras ainda deverá ser um tema a ser explorado devido ao comportamento de crescimento diferenciado das

plantas em estações secas e chuvosas. Tal comportamento interfere na condição da folhagem e no desempenho do sensor a laser para a detecção do porte de plantas, viabilizando o cálculo de seu volume e a possível associação desse parâmetro à produtividade.

A perspectiva do estudo no contexto da AP é de que a tecnologia LiDAR seja disponibilizada na agricultura como forma de monitoramento em tempo real da lavoura por meio de plataformas aérea ou terrestre. As informações acerca de parâmetros produtivos com alta resolução poderão compor o planejamento da logística no período pré-colheita e de configurações de regulação das colhedoras como função da produtividade pontual e de características como a altura de colmos, o grau de acamamento das plantas e a intensidade de falhas.

5. CONCLUSÃO

A metodologia proposta permitiu o desenvolvimento de procedimentos padronizados de aquisição e processamento de conjunto de dados LiDAR e GNSS aplicados em lavouras de cana-de-açúcar para a determinação de parâmetros geométricos da cultura em período pré-colheita.

O sistema de mensuração utilizando uma plataforma terrestre apresentou desempenho satisfatório em relação à capacidade de detecção da distribuição de plantas de cana-de-açúcar de forma georreferenciada nas áreas experimentais e condizente com as condições encontradas em ambos os períodos de estudo.

A aplicação desse sistema para a estimativa de produtividade da cultura de forma pontual apresentou baixa capacidade preditiva para as condições dos períodos de estudo, necessitando de mais dados amostrais e com maior densidade para a sua calibração.

REFERÊNCIAS

- Amaral, L. R. do, & Molin, J. P. (2011). Sensor óptico no auxílio à recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 16(1), 1633-1642.
- Amaral, L. R. do. (2014). Sensor de reflectância do dossel para direcionar a aplicação de nitrogênio em taxas variáveis na cultura da cana-de-açúcar. 125 p. *Tese (Doutorado)* – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- Amaya, A., Gomez, A. L., Buitrago, J. T., Moreno, C. A., Cassalet, C. (2000). Characterization of lodging in sugarcane. In: Australian Society of Sugar Cane Technologists Conference, 22, 2000, Bundaberg. *Proceedings...* Bundaberg: D.M. Hogarth. p. 321-327.
- Anderson, E. S., Thompson, J. A., Austin, R. E. (2005). LIDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 26(18), 3889-3900.
- Andújar, D., Escolà, A., Rossell-Polo, J. R., Sanz, R., Rueda-Ayala, V., Fernández-Quintanilla, C., et al. (2016). A LiDAR-Based System to Assess Poplar Biomass. *Gesunde Pflanzen*, 68(3), 155-162.
- Arnó, J., Escolà, A., Vallès, J. M., Llorens, J., Sanz, R., Masip, J., et al. (2013). Leaf area index estimation in vineyards using a ground-based LiDAR scanner. *Precision Agriculture*, 14(3), 290– 306.
- Batista, E. L. da, Zolnier, S., Ribeiro, A., Lyra, G. B., Silva, T. G. F. da, Boehringer, D. (2013). Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(10), 1080–1087.
- Ben. (2015). Balanço Energético Nacional. *Relatório síntese ano base 2015*. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf> . Acesso em: 29/11/2016.
- Benjamin, C. E., Price, R. R., Mailander, M. P. (2001). *Sugar cane yield monitoring system*. ASAE Paper No. 011189. ASAE, St. Joseph. 9p.
- Blackmore, B. S., & Larscheid, G. (1997). Strategies for managing variability. In: European Conference on Precision Agriculture, I, 1997, Warwick. *Proceedings...* Warwick , 1997. p. 851-859.
- Bramley, R. G. V. (2009). Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop & Pasture Science*, 60(3), 197-217.
- Bramley, R. G. V., & Jensen, T. A. (2013). Sugarcane yield monitoring: A protocol for yield map interpolation and key considerations in the collection of yield data. In: Australian Society of Sugar Cane Technologists *Proceedings...* Australia, 35, 2013.
- Carlin, S. D., Silva, M. A. de, Rossetto, R. (2008). Parâmetros biométricos e produtividade da cana-de-açúcar após tombamento dos colmos. *Bragantia*, 67(4), 845-853.
- Colaço, A. F., Trevisan, R. G., Eitelwein, M. T., Molin, J. P. (2015). Sensor LiDAR (Light detection and ranging) para obtenção de modelos tridimensionais de culturas de porte arbóreo. *Anais...* X Congresso Brasileiro de Agroinformática, 21 a 23 de outubro de 2015. Ponta Grossa, PR. Universidade Estadual de Ponta Grossa, SBI Agro.
- Colaço, A. F. (2016). Mobile terrestrial laser scanner for site-specific management in orange crop. 87 p. *Tese (Doutorado)* – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., Tsipris, J. (2005). Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56, 1843-1852.

- Conab. (2017). Companhia Nacional de Abastecimento. *Indicadores da agropecuária*. Brasília. Disponível em: <https://www.novacana.com/pdf/18042017090454_Conab_-_4_Levantamento_2016-17_180417.pdf>. Acesso em: 16/06/2017.
- Cox, G., Harris, H., Pax, R., Dick, R. (1996). Monitoring cane yield by measuring mass flow rate through the harvester. *Proceedings...* Australian Society of Sugar Cane Technologists, edited by W Ferguson.
- Cox, G., Harris, H., Pax, R. (1997). Development and testing of a prototype yield mapping system. In: Australian Society of Sugar Cane Technologists. *Proceedings...* Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1997, edited by W Ferguson, p. 38-43.
- Cunha, J. P. A. R. da, Duarte, M. A. V., Rodrigues, J. C. (2009). Avaliação dos níveis de vibração e ruído emitidos por um trator agrícola em preparo de solo. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 39(4), 348-355.
- David, A. S., Sousa, R. V. de, Valentim, C. A., Tabile, R. A., Machado, J. A. T. (2016). Fractional PID controller in an active image stabilization system for mitigating vibration effects in agricultural tractors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 131, 1-9.
- Deery, D., Jimenez-Berni, J., Jones, H., Sirault, X., Furbank, R. (2014). Proximal Remote Sensing Buggies and Potential Applications for Field-Based Phenotyping. *Agronomy*, 4(3), 349-379.
- Del-Moral-Martinez, I., Arnó, J., Escolà, A., Sanz, R., Masip-Vilalta, J., Company-Messa, J., et al. (2015). Georeferenced Scanning System to Estimate the Leaf Wall Area in Tree Crops. *Sensors*, 15(4), 8382-8405.
- Del-Moral-Martinez, I., Rosell-Polo, J. R., Company, J., Sanz, R., Escolà, A., Masip, J., et al. (2016). Mapping vineyard leaf area using mobile terrestrial laser scanners: should rows be scanned on-the-go or discontinuously sampled? *Sensors*, 16(1), 02-13.
- Díaz-Varela, R., Rosa, R. de la, León, L., Zarco-Tejada, P. (2015). High-Resolution Airborne UAV Imagery to Assess Olive Tree Crown Parameters Using 3D Photo Reconstruction: Application in Breeding Trials. *Remote Sensing*, 7(4), 4213-4232.
- Dinardo-Miranda, L. L., Vasconcelos, A. C. M. de, Landell, M. G. A. de. (2010). *Cana-de-açúcar*. Campinas: IAC. 882p.
- Dworak, V., Selbeck, J., Ehlert, D. (2011). Ranging sensors for vehicle-based measurement of crop stand and orchard parameters: a review. *Transactions of the ASABE*, 54(4), 1497-1510.
- Edan, Y., Han, S., Kondo, N. (2009). *Automation in Agriculture*. Springer Handbook of Automation, ed. Nof, p. 1095-1128.
- Ehlert, D., Horn, H. J., Adamek, R. (2006). Potential of laser distance sensors for measuring crop parameters. *Journal of Applied Sciences*, 6(4), 898-904.
- Ehlert, D., Adamek, R., Horn, H. J. (2009). Laser rangefinder-based measuring crop biomass under field conditions. *Precision Agriculture*, 10, 395-408.
- Ehlert, D., & Heisig, M. (2013). Sources of angle-dependent errors in terrestrial laser scanner-based crop stand measurement. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 10-16.
- Embrapa. (1999). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: CNPS, 1999. 412p.
- Embrapa. (2000). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia*, 2000, 21, p. 01-05.
- EN 50178. (1997). *Electronic equipment for use in power installations*. European Standards, 1997.

- Escolà, A., Martínez-Casasnovas, J. A., Rufat, J., Arnó, J., Arbonés, A., Sebé, F., et al. (2016). Mobile terrestrial laser scanner applications in precision fruticulture/horticulture and tools to extract information from canopy point clouds. *Precision Agriculture*, 18(1), 111-132.
- Fao. (2013). Food and Agriculture Organization of the United Nations. *Statistics of Production Crops*. Acesso em: 30/11/2016. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/*/E>.
- Fernandes, J. L., Rocha, J. V., Lamparelli, R. A. C. (2011). Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images. *Scientia Agricola*, 68(2), 139-146.
- Frasson, F. R., Salvi, J. V., Povh, F. P., Molin, J. P., Motomiya, A. V. A. de. (2007). Quantificação de falhas de plantio em cana-de-açúcar utilizando um sensor ótico ativo. *Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 197-203, 21-26 de abril de 2007, Florianópolis, SC.
- Fry, B., & Reas, C. (2014). Processing Library for Visual Arts and Design.
- Gator XUV 855D. John Deere. Acesso em: 23/02/2017. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt_BR/products/equipment/gator_multipurpose_vehicles/xuv_855d/xuv_855d.page>.
- Gil, E., Arnó, J., Llorens, J., Sanz, R., Llop, J., Rosell-Polo, J., et al. (2014). Advanced Technologies for the Improvement of Spray Application Techniques in Spanish Viticulture: An Overview. *Sensors*, 14(1), 691-708.
- Jimenez, L. M., & Molin, J. P. (2004). Algoritmo para redução de erros em mapas de produtividade para agricultura de precisão. *Revista Brasileira de Agrocomputação*, 2, 05-10.
- Girardeau-Montaut, D. (2014). CloudCompare: 3D Point Cloud and Mesh Processing Software.
- Glennie, C., & Lichti, D. D. (2010). Static calibration and analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for high accuracy mobile scanning. *Remote Sensing*, 2(6), 1610-1624.
- Grego, C. R., Araujo, L. S. de, Vicente, L. E., Nogueira, S. F., Magalhães, P. S. G., Vicente, A. K., et al. (2014). *Agricultura de precisão em cana-de-açúcar*. Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Brasília. Revisão Perenes, p. 442-457.
- Gregorio, E., Torrent, X., Martí, S. P., Solanelles, F., Sanz, R., Rocadenbosch, F., et al. (2016). Measurement of spray drift with a specifically designed LIDAR system. *Sensors*, 16(4), 01-15.
- Gregory, P. M., Mahan, J. R., Dever, J., Payton, P. R. (2016). Analysis of physiological and morphological traits associated with thermal stress acclimation in cotton. *Proceedings... Southern Section of the American Society of Plant Biologists*, April 2-4, 2016, Denton, TX. p. 11.
- Hayes, M. (2006). *Processamento Digital de Sinais*. Coleção Schaum, Porto Alegre: Bookman, 466p.
- Inamasu, R. Y., Sousa, R. V. de, Tabile, R. A. (2014). *Instrumentação em máquinas agrícolas*. Conceitos e aplicações da instrumentação para o avanço da agricultura. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa Instrumentação. Capítulo 11, p. 317-342.
- ISO 2631. (1974). *Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibration*. International Organization for Standardization.
- Jozkow, G., Toth, C., Grejner-Brzezinska, D. (2016). UAS topographic mapping with velodyne LIDAR sensor. *Proceedings... XXIII ISPRS Congress of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Volume III-1, 12 a 19 de julho de 2016, Prague, República Tcheca, p. 201-208.
- Kang, T. H., & Kaizu, Y. (2011). Vibration analysis during grass harvesting according to ISO vibration standards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(2), 226-235.

- Koppe, W., Gnyp, M. L., Hutt, C., Yao, Y., Miao, Y. X., Chen, X., et al. (2013). Rice monitoring with multi-temporal and dual-polarimetric TerraSAR-X data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 568–576.
- Kyowa. Células de carga. Acesso em: 30/12/2016. Disponível em: <http://www.panambra.com/fw-uploads/2015-01-21-03-01-03_carga.pdf>.
- Landell, M. G. A. de, & Silva, M. A. (1995). *Manual do experimentador: melhoramento da cana-de-açúcar*. In: Metodologia de Experimentação: ensaios de competição em cana-de-açúcar. Pindorama: Instituto Agrônomo, p. 03-09.
- Lee, K. H., & Ehsani, R. (2009). A laser scanner based measurement system for quantification of citrus tree geometric characteristics. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(5), 777-788.
- Li, W., Niu, Z., Gao, S., Huang, N., Chen, H. (2014). Correlating the horizontal and vertical distribution of lidar point clouds with components of biomass in a picea crassifolia forest. *Forests*, 5(8), 1910-1930.
- Li, W., Niu, Z., Huang, N., Wang, C., Gao, S., Wu, C. (2015). Airborne LiDAR technique for estimating biomass components of maize: A case study in Zhangye City, Northwest China. *Ecological Indicators*, 57, 486–496.
- Ma, S., Karkee, M., Scharf, P. A., Zhang, Q. (2014). Sugarcane harvester technology: a critical overview. *Applied Engineering in Agriculture*, 30(5), 727-739.
- Magalhães, A. C. N. (1987). Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: Castro PRC, Ferreira SO, Yamada TY. (ed.) *Ecofisiologia da produção agrícola*. Piracicaba: Potafos, p. 113-118.
- Magalhães, P. S. G., & Cerri, D. G. P. (2007). Yield monitoring of sugarcane. *Biosystems Engineering*, 96(1), 1–6.
- Mailander, M., Benjamin, C., Price, R., Hall, S. (2010). Sugar cane yield monitoring system. *Applied Engineering in Agriculture*, 26(6), 965-969.
- Maldaner, L. F., Canata, T. F., Molin, J. P., Passalacqua, B. P. (2015). Avaliação da precisão dos sinais RTK e RTX em ensaio estático e cinemático. *Anais... X Congresso Brasileiro de Agroinformática*, 21 a 23 de outubro de 2015. Ponta Grossa, PR. Universidade Estadual de Ponta Grossa, SBIAgro.
- Marin, F., & Nassif, D. S. P. (2013). Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. *Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(2), 232–239.
- Marin, F., Martha, G. B., Cassman, K. G., Grassini, P. (2016). Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil. *BioScience*, 66(4), 307-316.
- Martins, A. L. M., & Landell, M. G. A. de. (1995). *Conceitos e critérios para avaliação experimental em cana-de-açúcar utilizados no Programa Cana IAC*. Pindorama: Instituto Agrônomo, 45p., p. 02-14.
- MathWorks R2016b. Matlab. Natick, MA, EUA. Acesso em: 01/01/2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com>>.
- Minitab. Statistical Software. Acesso em: 07/01/2017. Disponível em: <<https://www.minitab.com/pt-br/products/minitab/>>.
- Milan, M., & Rosa, J. H. M. (2015). Corte, Transbordo e Transporte (CTT): Aspectos relevantes e uso da modelagem para o CTT. In: BELARDO, G. C. et al. *Processos Agrícolas e Mecanização da Cana de Açúcar*. Jaboticabal: SBEA, p. 415-428.
- Molin, J. P. (2002). Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. *Engenharia Agrícola*, 22, 83-92.
- Molin, J. P., & Menegatti, L. A. A. (2004). Field-testing of a sugar cane yield monitor in Brazil. In: Annual International Meeting, 2004, Ottawa. *Proceedings... ASAE*. p. 12.
- Molin, J. P., Colaço, A. F., Amaral, L. R. do. (2015) *Agricultura de Precisão*. 1 ed. Piracicaba: Oficina de Textos, 224 p.

- Molin, J. P., & Veiga, J. P. S. (2016). Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. *Ciência e Agrotecnologia*, 40(3), 347-355.
- Morel, J., Todoroff, P., Bégué, A., Bury, A., Martiné, J. F., Petit, M. (2014). Toward a Satellite-Based System of Sugarcane Yield Estimation and Forecasting in Smallholder Farming Conditions: A Case Study on Reunion Island. *Remote Sensing*, 6(7), 6620-6635.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371.
- Novacana. (2015). Capacidade mundial de cogeração de energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar. Acesso em: 22/02/2017. Disponível em: <<https://www.novacana.com/data/planilha/capacidade-mundial-de-geracao-de-energia-a-partir-do-bagaco-de-cana/>>.
- Novacana. (2017). Diário de Pernambuco. Acesso em: 07/03/2017. Disponível em: <<https://www.novacana.com/n/cana/safra/seca-derrubar-safra-cana-20-nordeste-060317/>>
- Oliveira, R. A. de, Daros, R., Zambom, J. L. C., Weber, H., Ido, O. T., Bespalhok-Filho, J. C. (2007). Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 37(2), 71-76.
- Oliveira, E. C. A., Oliveira, R. I., Andrade, B. M. T., Freire, F. J., Lira, J., Mario, A., et al. (2010). Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(9), 951-960.
- Oliveira, M. P. de, Ragghianti, K. C., Homem, B. F. M., Marques, M. O. (2014). Cana-de-açúcar: análise biométrica de cultivares ano agrícola 2012/2013. *Ciência & Tecnologia*, 6, 110-114.
- Oliveira, A. R. de, Braga, M. B., Santos, B. L. S., Walker, A. M. (2016). Biometria de cultivares de cana-de-açúcar sob diferentes reposições hídricas no vale do Submédio São Francisco. *Energia na Agricultura*, 31(1), 48-58.
- Pallejà, T., Tresanchez, M., Teixido, M., Sanz, R., Rosell, J. R., Palacín, J. (2010). Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11), 1420-1427.
- Panasonic. Toughbook CF-18, EUA. Acesso em: 03/01/2017. Disponível em: <ftp://ftp.panasonic.com/computer/toughbook19/toughbook-19_specsheets.pdf>.
- Paula, V. D., & Molin, J. P. (2013). Assessing damage caused by accidental vehicle traffic on sugarcane ratoon. *Applied Engineering in Agriculture*, 29(2), 161-169.
- Periu, C. F., Mohsenimanesh, A., Laguë, C., McLaughlin, N. B. (2013). Isolation of vibrations transmitted to a LIDAR sensor mounted on an agricultural vehicle to improve obstacle detection. *Canadian Biosystems Engineering*, 55, 233-242.
- Pierossi, M. A., & Hassuani, S. J. (1997). Caçamba instrumentada para pesagem de cana picada. In: Seminário Copersucar de Tecnologia Agrônômica, 7. Piracicaba: Copersucar.
- Polat, N., & Uysal, M. (2015). Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. *Measurement*, 63, 61-68.
- Popescu, S. C. (2007). Estimating biomass of individual pine trees using airborne LiDAR. *Biomass and Bioenergy*, 31(9), 646-655.
- Portz, G., Molin, J. P., Jasper, J. (2011). Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. *Precision Agriculture*, 13(1), 33-44.

- Portz, G., Amaral, L. R. do, Molin, J. P. (2012). Measuring sugarcane height in complement to biomass sensor for nitrogen management. In: International Conference on Precision Agriculture, 11, 2012, Indianápolis. *Proceedings...* Monticello: ISPA.
- Posto Meteorológico da ESALQ/USP. Base de dados da estação convencional em Piracicaba, SP. Acesso em: 30/12/2016. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/postocon.html>>.
- Povh, F. P., Molin, J. P., Gimenez, L. M., Pauletti, V., Molin, R., Salvi, J. V. (2008). Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(8), 1075-1083.
- Price, R., Larsen, J., Peters, A. (2007). Development of an optical yield monitor for sugar cane harvesting. In: Asabe Annual International Meeting, *Proceedings...* p. 27.
- Price, R., Johnson, R., Viator, R., Larsen, J., Peters, A. (2011). Fiber optic yield monitor for a sugarcane harvester. *Transactions of the ASABE*, 54(1), 31-39.
- R Core Team. (2014). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ramos, C. R. G., Lanças, K. P., Sandi, J., Lyra, G. A. de, Millani, T. M. (2015). Qualidade do corte dos rebolos na colheita mecanizada da cana-de-açúcar em diferentes condições operacionais. *Energia na Agricultura*, 30(3), 217-224.
- Richardson, J. J., Moskal, L. M., Kim, S. H. (2009). Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1152–1160.
- Rodrigues, J. D. (1995). *Fisiologia da cana-de-açúcar*. Botucatu: Unesp, 75 p.
- Rodrigues Junior, F. A., Magalhães, P. S. G., Silva, M. J. da. (2012). Sugar cane yield monitor evaluation. *Anais...* Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 24 a 26 de setembro de 2012. Ribeirão Preto, SP. ConBAP.
- Rolim, G. S., Camargo, M. B. P., Lania, D. G., Moraes, J. F. L. (2007). Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia*, 6(4), 711-720.
- Ross, F. N. (2013). How did we get here? An early history of forestry lidar. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39(1), 6-17.
- Rosell, J. R., & Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 124-141.
- Saeys, W., Lenaerts, B., Craessaerts, G., Baerdemaeker, J. de. (2009). Estimation of the crop density of small grains using LiDAR sensors. *Biosystems Engineering*, 102(1), 22-30.
- Sanz-Cortiella, R., Llorens-Calveras, J., Rosell-Polo, J. R., Gregorio-Lopez, E., Palacin-Roca, J. (2011a). Characterisation of the LMS200 Laser Beam under the Influence of Blockage Surfaces: influence on 3D Scanning of Tree Orchards. *Sensors*, 11(3), 2751-2772.
- Sanz-Cortiella, R., Llorens, J., Escolà, A., Arnó, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., et al. (2011b). Innovative LiDAR 3D dynamic measurement system to estimate fruit-tree leaf area. *Sensors*, 11(6), 5769-5791.
- SBG Systems. Sistemas de Navegação Inercial, IG30-A. Rueil Malmaison, França Acesso em: 30/12/2016. Disponível em: <<https://www.sbg-systems.com/>>.
- Scarpari, M. S., & Beauclair, E. G. F. (2010). *Anatomia e botânica*. In: Dinardo-Miranda LL, Vasconcelos ACM, Landell MGA. (Ed.). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico, 882p.
- Schirrmann, M., Hamdorf, A., Garz, A., Ustyuzhanin, A., Dammer, K. H. (2016). Estimating wheat biomass by combining image clustering with crop height. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 374–384.

- Selbeck, J., Dworak, V., Ehlert, D. (2010). Testing a vehicle-based scanning LiDAR sensor for crop detection. *Canadian Journal Remote Sensing*, 36(1), 24-35.
- Shi, Y., Wang, N., Taylor, R. K., Raun, W. R. (2015). Improvement of a ground-LiDAR-based corn plant population and spacing measurement system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112, 92-101.
- Sick AG. Sensor Intelligence LMS200. Waldkirch, Alemanha. Acesso em: 26/12/2016. Disponível em: <<http://sicktoolbox.sourceforge.net/docs/sick-lms-technical-description.pdf>>.
- Silva, F. L., Pedrozo, C. A., Barbosa, M. H. P., Resende, M. D. V., Peternelli, L. A., Costa, P. M. A., et al. (2009). Análise de trilha para os componentes de produção de cana-de-açúcar via blup. *Revista Ceres*, 56(3), 308-314.
- Silva, C. B., Moraes, M. A. F. D., Molin, J. P. (2011). Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. *Precision Agriculture*, 12(1), 67-81.
- Silva, C. A., Klauberg, C., Hudak, A. T., Vierling, L. A., Liesenberg, V., Carvalho, S. P. C. E., et al. (2016). A principal component approach for predicting the stem volume in *Eucalyptus* plantations in Brazil using airborne LiDAR data. *Forestry*, 89(4), 422-433.
- Simões, M. S., Rocha, J. V., Lamparelli, R. A. C. (2005). Growth indices and productivity in sugarcane. *Scientia Agricola*, 62(1), 23-30.
- Singh, G., Chapman, S. C., Jackson, P. A., Lawn, R. J. (2000). Lodging - A major constraint to high yield and CCS in the wet and dry tropics. In: Australian Society of Sugar Cane Technologists Conference, 22, Bundaberg. *Proceedings...* Bundaberg: D.M. Hogarth. p. 315-321.
- Souza, C. H. W. de, Lamparelli, R. A. C., Rocha, J. V., Magalhães, P. S. G. (2017). Height estimation of sugarcane using an unmanned aerial system (UAS) based on structure from motion (SfM) point clouds. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8), 2218-2230.
- Spekken, M., Molin, J. P., Romanelli, T. L. (2015). Cost of boundary maneuvers in sugarcane production. *Biosystems Engineering*, 129, 112-126.
- Tarpley, L., Reddy, K. R., Sassenrath-Cole, G. F. (2000). Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. *Crop Science*, 1(40), 1814-1819.
- Tesche, L. Z., Ragghianti, K. C., Pauli, F. P. de, Marques, M. O. (2014). Comparação biométrica em cana-de-açúcar safra 2012/2013. *Ciência & Tecnologia*, 6, 148-152.
- Tilly, N., Hoffmeister, D., Cao, Q., Huang, S., Wiedemann, L. V., Miao, Y., et al. (2014). Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice. *Applied Remote Sensing*, 8, 1-22.
- Topcon. GNSS GR-3. Califórnia, EUA. Acesso em: 26/12/2016. Disponível em: <http://www.cropos.hr/files/docs/manuals/topcon_gr-3_om_revb.pdf>.
- Watt, M. S., Meredith, A., Watt, P., Gunn, A. (2013). Use of LiDAR to estimate stand characteristics for thinning operations in young Douglas-fir plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 43:18, 2-10.
- Weightech. Indicador de pesagem WT3000-ABS. Miami, FL, EUA. Acesso em: 30/12/2016. Disponível em: <<http://www.weightech.com.br/arquivos/indicador-wt3000abs-manual.pdf>>.
- Zaman, Q., Schumann, A., Percival, D., Read, S., Esau, T., Farooque, A. (2011). Development of cost-effective prototype variable rate sprayer for spot-specific application of agrochemicals in wild blueberry cropping systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76, 175-182.

APÊNDICES

APÊNDICE A.

Dados do sistema de mensuração referentes às parcelas da área I (2015 e 2016).

Altura de vegetação (m)								
Parcelas	Ano	Mínima	Máxima	Média	Mediana	P99	Desvio padrão	CV (%)
01	2015	0,15	3,02	1,79	1,87	2,96	0,63	35,16
	2016	0,16	4,0	2,78	2,89	3,31	0,67	24,06
02	2015	0,15	2,75	1,49	1,59	2,96	0,55	36,61
	2016	0,16	3,99	2,58	2,70	3,24	0,69	26,58
03	2015	0,15	2,91	1,65	1,72	2,35	0,58	35,12
	2016	0,16	3,97	2,57	2,68	2,92	0,66	25,64
04	2015	0,15	2,91	1,62	1,69	2,21	0,55	33,83
	2016	0,16	3,96	2,37	2,44	2,91	0,68	28,77
05	2015	0,15	3,0	2,20	2,26	2,26	0,39	17,74
	2016	0,16	4,0	2,86	2,94	3,17	0,62	21,57
06	2015	0,15	2,81	1,50	1,57	2,30	0,54	36,22
	2016	0,16	4,0	2,86	2,94	3,20	0,62	21,57
07	2015	0,15	3,0	1,89	1,99	2,30	0,56	29,94
	2016	0,16	4,0	2,90	2,99	3,20	0,62	21,49
08	2015	0,15	2,91	1,98	2,06	2,48	0,47	23,84
	2016	0,16	4,02	2,65	2,73	2,98	0,60	22,49
09	2015	0,15	3,0	1,96	2,09	2,37	0,56	28,45
	2016	0,16	4,0	2,80	2,88	3,11	0,57	20,48
10	2015	0,15	2,90	1,74	1,86	2,24	0,54	31,11
	2016	0,16	4,0	2,72	2,81	3,21	0,60	21,85
11	2015	0,15	2,99	1,83	1,92	2,28	0,58	31,62
	2016	0,16	4,08	3,07	3,17	3,40	0,59	19,31
12	2015	0,15	3,0	2,49	2,57	2,46	0,39	15,49
	2016	0,16	4,03	3,27	3,42	3,55	0,61	18,57
13	2015	0,15	3,08	2,18	2,26	2,39	0,44	20,23
	2016	0,16	4,04	2,71	2,81	3,12	0,63	23,32
14	2015	0,15	2,87	1,93	2,06	2,32	0,53	27,28
	2016	0,16	3,99	2,83	2,93	3,26	0,58	20,37
15	2015	0,15	3,0	2,07	2,19	2,40	0,57	27,34
	2016	0,16	4,49	3,08	3,17	3,34	0,58	18,94
16	2015	0,15	3,0	1,70	1,73	2,25	0,71	41,88
	2016	0,16	4,49	2,88	3,02	3,44	0,76	26,31

P99: percentil 99,0% dos valores de altura de vegetação; CV: coeficiente de variação.

APÊNDICE B.

Dados do sistema de mensuração referentes às parcelas da área II (2016).

Altura de vegetação (m)							
Parcelas	Mínima	Máxima	Média	Mediana	P99	Desvio padrão	CV (%)
1	0,24	3,99	2,56	2,72	3,55	0,76	29,77
2	0,24	3,99	2,86	2,99	3,41	0,69	24,10
3	0,24	3,99	2,88	2,90	3,71	0,68	23,61
4	0,24	3,99	2,62	2,72	3,25	0,66	25,16
5	0,24	3,98	2,40	2,59	3,20	0,78	32,59
6	0,24	4,02	2,58	2,80	3,37	0,88	34,08
7	0,24	4,0	3,09	3,14	3,18	0,81	26,18
8	0,24	3,87	2,25	2,35	3,08	0,65	29,05
9	0,24	4,0	2,51	2,70	3,20	0,73	29,0
10	0,24	4,01	2,71	2,88	3,30	0,73	26,96
11	0,24	4,0	3,11	3,18	3,68	0,80	25,64
12	0,24	3,88	2,32	2,43	3,08	0,66	28,44
13	0,24	3,99	2,82	2,93	3,27	0,63	22,38
14	0,24	4,0	2,89	3,02	3,36	0,67	23,19
15	0,24	4,0	3,01	3,21	3,69	0,97	32,09
16	0,24	3,96	2,39	2,52	3,15	0,70	29,22
17	0,24	4,0	1,95	1,88	3,34	0,99	50,69
18	0,24	4,0	2,56	2,79	3,33	0,88	34,42
19	0,24	4,0	2,70	2,76	3,46	0,81	29,84
20	0,24	3,91	2,20	2,31	3,03	0,70	31,77
21	0,24	3,98	2,15	2,28	3,18	0,88	41,10
22	0,24	4,0	2,48	2,70	3,35	0,93	37,59
23	0,24	3,99	2,74	2,80	3,19	0,98	35,77
24	0,24	3,86	2,0	2,12	2,99	0,74	37,20
25	0,24	4,0	2,66	2,80	3,32	0,73	27,38
26	0,24	4,0	2,82	2,94	3,39	0,71	25,31
27	0,24	3,99	2,92	3,66	2,98	1,14	38,87
28	0,24	3,73	1,84	1,91	2,67	0,73	39,82

P99: percentil 99,0% dos valores de altura de vegetação; CV: coeficiente de variação.

APÊNDICE C. Dados do sensor de orientação estático referentes às áreas experimentais I e II (AI e AII) em 2016
roll (A); *yaw* (B); *pitch* (C); aceleração na componente vertical (D).

APÊNDICE D.

Medidas de biometria para a área experimental I (2015 e 2016).

Parcelas	Massa (kg m ⁻¹)*			C		Altura de colmos (m)		Diâmetro de colmos (cm)		Produtividade (t ha ⁻¹)	
	Colmo	Ponteiro	Palha	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015**	2016
1	38,08	4,46	5,06	12,58	12,54	3,75	4,37	0,17	0,20	114,0	113,79
2	26,88	2,90	4,32	12,38	12,99	3,69	3,91	0,11	0,15	110,90	109,05
3	40,94	3,52	6,18	13,79	13,09	3,67	4,38	0,15	0,12	117,61	124,80
4	26,50	3,08	4,12	13,58	12,80	3,69	3,77	0,19	0,20	95,95	107,90
5	30,80	3,32	4,22	12,21	12,22	3,71	3,42	0,12	0,20	114,0	120,50
6	26,00	3,20	4,10	13,14	13,49	3,75	4,29	0,12	0,19	103,56	129,00
7	32,68	3,08	4,90	12,14	13,43	3,74	4,41	0,11	0,11	115,0	122,20
8	51,74	5,08	7,40	12,43	13,58	3,67	3,78	0,19	0,19	93,20	131,30
9	30,90	2,42	3,78	11,99	12,13	3,6	3,80	0,12	0,12	130,0	122,70
10	19,38	2,56	3,60	12,40	12,78	3,64	3,77	0,12	0,11	94,24	111,60
11	36,02	3,14	5,24	12,26	13,14	3,59	3,96	0,13	0,17	117,72	120,70
12	28,82	3,38	4,38	12,47	12,74	3,58	4,39	0,12	0,16	104,14	134,00
13	36,36	3,72	4,58	11,76	12,64	3,4	4,27	0,19	0,12	95,0	109,50
14	29,88	3,56	3,92	12,03	12,46	3,49	3,84	0,11	0,19	95,88	128,70
15	29,10	3,82	3,88	12,01	13,99	3,63	3,73	0,12	0,17	97,09	133,70
16	25,44	2,66	2,82	12,08	13,02	3,6	4,11	0,15	0,11	120,49	133,60

*avaliado em 2015; C: número de colmos m⁻¹; **produtividade estimada

APÊNDICE E.

Medidas de biometria para a área experimental II (2016).

Parcelas	Número de colmos m ⁻¹	Altura de colmos (m)	Diâmetro de colmos (cm)	Produtividade (t ha ⁻¹)
1	25,09	4,64	0,20	91,17
2	25,38	3,94	0,13	103,45
3	25,67	3,65	0,18	103,80
4	25,56	3,81	0,15	121,12
5	25,60	4,41	0,11	96,30
6	25,40	4,29	0,16	91,37
7	25,60	3,94	0,12	108,31
8	25,64	4,38	0,11	108,60
9	25,29	3,74	0,17	104,31
10	25,62	4,22	0,15	106,25
11	25,38	4,02	0,16	76,64
12	25,73	3,57	0,15	107,46
13	25,56	3,70	0,11	101,68
14	25,13	4,06	0,18	108,94
15	25,42	3,79	0,20	101,20
16	25,16	4,33	0,14	101,32
17	25,31	3,65	0,16	96,00
18	25,31	4,08	0,11	93,62
19	25,38	3,88	0,16	98,42
20	25,47	3,57	0,13	112,99
21	25,56	4,36	0,18	77,74
22	25,62	4,17	0,18	95,23
23	25,58	3,71	0,14	104,12
24	25,11	3,55	0,15	110,51
25	25,36	4,37	0,20	101,32
26	25,56	3,89	0,15	110,13
27	25,38	4,02	0,15	85,52
28	25,31	3,63	0,18	70,87