

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – *CAMPUS* MONTE CARMELO

ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA

MARCONDES QUEIROZ BARCELOS

**ESTIMATIVA DE VOLUME PARA A CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE
IMAGENS OBTIDAS DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

MONTE CARMELO

2018-2

MARCONDES QUEIROZ BARCELOS

**ESTIMATIVA DE VOLUME PARA A CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE
IMAGENS OBTIDAS DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

Trabalho de Conclusão de Curso, como exigência parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia, *campus* Monte Carmelo.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis.

MONTE CARMELO

2018-2

MARCONDES QUEIROZ BARCELOS

**ESTIMATIVA DE VOLUME PARA A CANA-DE-AÇÚCAR POR MEIO DE
IMAGENS OBTIDAS DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA**

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis, UFU
(Orientador)

Prof. Dr. Ricardo Luís Barbosa. UFU
(Membro convidado)

Téc. Msc. Samuel Lacerda de Andrade, UFU
(Membro Convidado)

Homologado pelo Colegiado do Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica em:

_____/_____/_____

Coordenador do Curso de Engenharia de
Agrimensura e Cartográfica

MONTE CARMELO

2018-2

DEDICATÓRIA

*A meus pais Gislene e Neudison, minha
irmã Marina, e aos amigos por todo apoio
e incentivo na conclusão do curso, dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder desfrutar de boa saúde, inteligência e paciência para concluir com êxito essa etapa tão importante, de minha vida e das pessoas que amo. Os caminhos ao aprimoramento são difíceis e, mesmo que por linhas tortas, hoje me sinto transformado e sinceramente agradecido a Ele por esta oportunidade.

Aos meu pais, Gislene e Neudison, por serem as minhas principais referências de amor trabalho e companheirismo. Agradeço pelo incentivo e apoio nas minhas decisões, por me acolherem com carinho e paciência, e principalmente pela confiança colocada em mim. Por eles essa etapa foi concluída.

À minha querida irmã Marina, que nos momentos de dificuldade me acolheu com palavra de esperança, sempre me estimulando a vencer as minhas dificuldades e superar os meus limites. Não tenho palavras para expressar minha gratidão “maninha”.

Sou grato ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis, exemplo de profissional, por todo o aprendizado, apoio e principalmente pela amizade e companheirismo firmado nesse ano de trabalho. Foi uma honra trabalhar a seu lado e compartilhar dos momentos de descontração e risadas no laboratório. Deixo um forte abraço e os meus sinceros agradecimentos.

Agradeço a banca examinadora, o Prof. Dr. Ricardo Luís Barbosa e o Téc. Msc Samuel Lacerda de Andrade, por terem aceitado o convite, e acrescentar com suas amplas experiências, importantes considerações e soluções propostas a favor da edificação deste trabalho.

Ao professor Dr. George Deroco Martins, pela amizade, ensinamentos, sua importância e contribuição significativa ao longo do ano, agradeço.

Aos profissionais Prof. Msc. Matheus Oliveira Alves, professor da FAZU (Faculdades Associadas de Uberaba), e a Vitor Godoy de Barros, engenheiro cartógrafo e agrimensor formado pela UFU, pela contribuição com os dados levantados.

Da mesma forma, presto meus agradecimentos aos amigos e companheiros de curso, por dividirem as experiências boas e ruins da graduação, principalmente aos amigos Gabriel e Valter que tiveram total importância para o êxito deste trabalho, a todos levarei para a vida.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim. ”

(Francisco Cândido Xavier)

RESUMO

Nos últimos anos, o acompanhamento de culturas de maneira remota tem se tornado uma prática altamente eficaz para a tomada de decisão em campo. Para isso, a utilização de sensores embarcados em aeronaves remotamente pilotadas têm se mostrado uma prática muito promissora. Ela se caracteriza por uma aplicação barata, prática e rápida justamente por se instalar em sistemas aéreos que apresentam facilidade de operação, flexibilidade e uma construção relativamente barata, RPAs (Aeronave Remotamente Pilotada). Atualmente, o Brasil é considerado o maior produtor do complexo sucroalcooleiro do mundo, empregando alta tecnologia nesse processo. Se atentando a isso, a agricultura de precisão desempenha papel indispensável no aprimoramento da produtividade das usinas e destilarias sucroalcooleiras brasileiras. Os benefícios de todo esforço empregado às estimativas de safras possibilitam avanços no planejamento das exportações, importações, do consumo energético nacional, no abastecimento do mercado interno e em diversas outras áreas. Tendo isso em vista, o devido trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade de se realizar cálculos volumétricos na cana-de-açúcar a partir de imagens aéreas obtidas por uma aeronave remotamente pilotada. Para isso, foi utilizado um RPA Phantom 4 com referenciais apenas no receptor GPS (*Global Positioning System*) instalado, que coleta coordenadas enquanto o voo é realizado. A não utilização de apoio de pontos em terreno, caracterizando assim uma aplicação de baixo custo, outro objetivo do trabalho. As áreas escolhidas demonstraram os erros de se quantificar o volume de matéria orgânica por igual em uma área não uniforme. A partir das análises realizadas, foi possível concluir que a aplicação é válida para essa variável nas devidas circunstâncias onde os levantamentos ainda são feitos de forma subjetiva, no entanto o resultado pode ser ainda mais satisfatório a atender outros parâmetros de voo e associado a diferentes sensores.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Fotogrametria. RPA. VANT. Nuvem de pontos. Volume.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
3	JUSTIFICATIVA	12
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1	Cana-de-açúcar	14
4.1.1	<i>Importância econômica</i>	<i>14</i>
4.1.2	<i>A cultura da cana-de-açúcar e seu desenvolvimento</i>	<i>15</i>
4.2	O sistema atual de monitoramento e estimativa de safra no Brasil	16
4.2.1	<i>Previsão de safras para cana-de-açúcar</i>	<i>17</i>
4.3	Sensoriamento remoto aplicado à agricultura	19
4.3.1	<i>Resoluções dos sistemas sensores</i>	<i>20</i>
4.4	Fotogrametria	21
4.4.1	<i>Uso de RPA como plataforma de SR</i>	<i>22</i>
4.4.2	<i>Legislação</i>	<i>23</i>
4.4.3	<i>Planejamento de voo</i>	<i>23</i>
4.4.4	<i>Pontos de controle</i>	<i>25</i>
4.5	Modelos digitais do terreno e de superfície	26
5	MATERIAL E MÉTODOS	28
5.1	Área de estudo	28
5.2	Material	29
5.2.1	<i>RPA's</i>	<i>30</i>
5.2.2	<i>Softwares de processamento de imagens de RPA's</i>	<i>31</i>
5.2.3	<i>A classificação da ocupação do solo</i>	<i>33</i>
5.3	Metodologia	33
5.3.1	<i>Procedimento de campo.....</i>	<i>34</i>
5.3.1.1	<i>Planejamento de voo.....</i>	<i>35</i>
5.3.1.2	<i>Aquisição de dados.....</i>	<i>37</i>
5.3.2	<i>Processamento dos dados</i>	<i>39</i>
5.3.2.1	<i>Alinhamento e fototriangulação</i>	<i>39</i>
5.3.2.2	<i>Densificação da nuvem de pontos</i>	<i>40</i>
5.3.2.3	<i>Ortofoto</i>	<i>41</i>
5.3.2.4	<i>Cálculo de Volume</i>	<i>42</i>

5.3.3	<i>Comparação dos cálculos de volume</i>	44
6	RESULTADOS OBTIDOS	44
6.1	Fazenda Sonho Azul	45
6.2	Fazenda Tombamento (Área 01)	50
6.3	Fazenda Tombamento (Área 02)	53
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental tem considerado meios para otimizar os processos a que elas se associam. É nesse ambiente que se potencializa a utilização de recursos combustíveis como o etanol, oriundo da cana-de-açúcar. Conforme a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2017), essa alternativa tem ganhado cada vez mais espaço frente a utilização de combustíveis fósseis, um dos principais responsáveis por contribuir com o agravamento de um cenário de devastação, causa de desequilíbrio no balanço de carbono atmosférico e consequente elevação das temperaturas globais.

É certo que, a produção do etanol tem grande relação com a produção de sua principal matéria prima em campo, e desta forma, nota-se grandes esforços em pesquisas que potencialize a produção e o controle das lavouras. O intuito principal se encontra em minimizar esforços para suprir as necessidades do setor de energia e alimentício. O surgimento de veículos bicompostíveis no Brasil contribuiu ainda para o aumento da demanda por etanol, reforçando a necessidade de uma produção mais significativa dessa fonte energética (Moraes, 2012).

De acordo com Goldemberg (2007), ainda em 2007 o Brasil já despontava mundialmente como produtor de etanol e cana-de-açúcar, assim como na tecnologia empregada na sua produção. O setor ainda passa por grande ascensão e prevê uma demanda mundial saltando de 80 bilhões de litros produzidos em 2013, para 200 bilhões de litros em 2021 (GOLDEMBERG et al.,2014). A expressividade na participação do país é demonstrada na estimativa para a safra 2017/18, de 647,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar que reflete uma produção de 26,45 bilhões de litros de etanol em uma área de 8,84 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2017).

Fortes (2003) ressalta a grande importância do planejamento sobre os estudos relacionados à cultura, mais especificamente a estimativa de safras, que possibilita o redirecionamento da produção para os mercados interno e externo, minimiza esforços em possíveis cultivos e focaliza em políticas públicas que favoreçam o seguimento. No campo, o emprego de tecnologia tem apresentado aceitação razoável e gradual por parte dos produtores. De acordo com Moraes (2012), o uso de sensoriamento remoto e outras geotecnologias são consideradas necessárias já que essas podem contribuir significativamente para obter metodologias eficazes e de baixo custo no controle de culturas, principalmente se aplicadas em regiões de grande extensão territorial, como é o caso do Brasil.

No entanto, considerações devem ser realizadas à cerca das limitações na utilização de metodologias inclusive do sensoriamento remoto. De acordo com Martello (2017), apesar desta,

ser uma ferramenta consagrada na agricultura, a identificação de falhas nas lavouras e avaliação de variabilidade com alto nível de detalhamento, exige alta precisão e por consequência, uma elevada resolução espacial.

Segundo Vicente (1994), variações nas colheitas exercem grande influência nas decisões do poder público, assim como em vários setores da economia. De acordo com a lei de oferta e demanda, os déficits na balança produtiva podem causar altas nos preços, assim como os superávits podem causar a desvalorização dos produtos em um ano de bons rendimentos. Tendo isso em vista, nota-se a necessidade da quantificação de safras de maneira mais precisa e confiável, podendo associar a isso o controle sobre a lucratividade e prejuízo da terra.

O surgimento das aeronaves remotamente pilotadas (RPAs) promete solucionar grande parte das limitações encontradas no sensoriamento remoto. Elas se caracterizam pela capacidade de elevar a nível aéreo sensores remotos embarcados de modo a se respeitar um plano de voo pré-definido. Esses mesmos equipamentos ainda possibilitam atender necessidades diferentes de acordo com sua categoria e os sensores possível de serem embarcados a cada um deles. Uma aplicação desse trabalho, é a modelagem tridimensional (3D) da área estudada, com o objetivo de estimar a altura da cultura. Para a cana-de-açúcar esses dados são de suma importância, visto que, através deles é possível aferir a produtividade aproximada da área.

Diversos estudos evidenciam uma maior produtividade da utilização dos RPAs em comparação a outras tecnologias. Holman et al. (2016) citam em exemplo a comprovação disso na modelagem 3D, em que foi evidenciado uma coleta de dados 72 vezes mais rápida quando comparado ao uso de um sistema LIDAR (*Laser Scanner*), extremamente mais caro. Além de tudo, os RPAs associam aos seus produtos um baixo custo de operação, não assumindo gastos de sobrevoo com um avião convencional, uma boa flexibilidade na adaptação das plataformas, podendo integrar diferentes sensores e por não sofrer dependência da resolução temporal do sistema orbital, possibilitando realizar coletas a todo momento no melhor horário.

De acordo com o apresentado, o presente trabalho levanta a hipótese de se estimar a produtividade de uma parcela cultivada com cana-de-açúcar, levando em consideração principalmente, dados de altura da planta, modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais da superfície (MDS) obtidos através de imagens de câmaras não métricas, de baixo custo e a bordo de um veículo aéreo não tripulado.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é realizar a estimativa do volume, de determinadas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, por meio de imagens aéreas obtidas de câmaras não métricas de baixo custo a bordo de um RPA. Os objetivos específicos são:

- Propor uma metodologia de baixo custo para estimar volume de cana-de-açúcar por meio de imagens obtidas de RPA;
- Verificar a correlação entre volume calculado e altura das plantas;
- Avaliar a correlação entre os produtos gerados e dados reais de colheita;

3 JUSTIFICATIVA

Há muito que a agricultura de precisão vem demonstrando em números a sua relevância, e a importância da geoinformação como instrumento de planejamento. Segundo Grego (2014), a agricultura de precisão desempenha papel fundamental no aprimoramento da produtividade das usinas e das destilarias sucroalcooleiras. Devido à alta demanda, interna e externa, por etanol e açúcar, a sua contribuição principal se dá como ferramenta de gestão, e visa expandir a participação desses produtos no mercado internacional sem deixar de suprir o consumo nacional.

Aliado a isso, as previsões de safra, desde que, obtidas com suficiente antecipação à colheita e com admissível exatidão, auxiliam no planejamento não só das usinas como de um país em sua totalidade. Dentre as contribuições possíveis, Ipolliti-Ramilo et al. (1999) cita avanços no planejamento das exportações agrícolas, das importações, do consumo energético do país, no abastecimento do mercado interno e para a adoção de políticas governamentais de desenvolvimento dos produtos mais relevantes para a economia do país. Conforme Esquerdo (2007), previsões confiáveis de safras por agentes internos podem representar um meio eficaz de proteger a produção nacional, contribuindo para uma considerável redução das ações especulativas, decorrente de estimativas de fontes externas, na maioria das vezes vindas de países concorrentes internacionalmente.

Além disso, modelos econômicos mostram que mesmo pequenos ganhos em precisão na previsão das safras, podem ocasionar em diferenças de centenas de milhões de dólares repassadas aos consumidores mundiais (IPOLLITI-RAMILO et al.,1999). A posse de valores como estes, é impossível não notar a importância de se investir em métodos que façam projeções e estimativa de produtividade.

No Brasil, conforme Ipolliti-Ramilo et al. (1999), um dos primeiros investimentos em pesquisas na previsão de safras partiu da iniciativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) firmar convênio com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 1986 na implantação de um Sistema de Informações Agropecuárias (SIAG) baseado em técnicas de sensoriamento remoto, processamento geográfico e métodos probabilísticos, denominado atualmente como Pesquisa Objetiva de Precisão de Safras (PREVS). Porém, esse sistema ainda é criticado por diversos pesquisadores e não estabelece procedimentos sistemáticos que forneçam estimativas com suficiente antecedência à época de colheita.

De acordo com Picoli (2006), nas usinas, as estimativas de produtividade são realizadas por meio de levantamentos subjetivos, muitas vezes baseadas nas opiniões de técnicos que tenha relação com o setor, atribuindo confiança apenas em suas experiências de campo. Eles percorrem os canaviais observando o desenvolvimento da cultura, o que demanda tempo, e realizam seus cálculos baseados na sua experiência de campo e em valores de safras anteriores. Esta forma de realizar estimativas não permite avaliações estatísticas nem a análise de erros, além de ser passível de manipulação e, portanto, gerar resultados tendenciosos.

O surgimento dos RPAs tem mudado a visão sobre o monitoramento, estimativas volumétricas e, principalmente, quanto a viabilidade de todo o processo de controle aplicado ao campo. Em comparação ao clássico sensoriamento remoto, a utilização de RPAs como plataforma associa vantagens quanto à flexibilidade na coleta dos dados (GÓMEZ-CANDÓN; DE CASTRO; LÓPEZ-GRANADOS, 2014). O levantamento dos dados pode ser realizado no momento em que se determinar mais apropriado, sem ter que depender de resolução temporal dos satélites ou gastos enormes com levantamentos fotogramétricos convencionais com aviões. Além do baixo custo operacional, o RPA possibilita um alto nível de detalhamento das imagens, uma vez que se assume uma baixa altitude de voo e alta proximidade do sensor com o alvo.

De acordo com Holman et al. (2016), o sensoriamento utilizando um RPA como plataforma se reconhece como uma aplicação barata, prática e rápida. Assim sendo, este trabalho apresenta fundamental importância, pois a sua aplicação gera informações que auxiliam no manejo e aumentam o potencial produtivo de uma região. Além de se caracterizar por uma demanda nacional, objetiva auxiliar não somente as camadas operacionais como também as esferas mais elevadas no planejamento econômico nacional.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cana-de-açúcar

4.1.1 Importância econômica

O Brasil é considerado o maior produtor do complexo sucroalcooleiro do mundo. Dentre os países produtores de cana-de-açúcar, Brasil, China e Índia são responsáveis por significativos 65% da produção mundial (FAO, 2016). De acordo com os dados da CONAB (2017), para a safra de 2017/18 o Brasil estima uma produção de 647,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, refletindo em uma produção de 26,45 bilhões de litros de etanol e uma de 38,7 milhões de toneladas de açúcar.

Segunda a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo – UNICA (2006), no Brasil o agronegócio é responsável por 20,6% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e gera 14% dos empregos totais. A atividade canavieira sozinha é expressa 6% dos empregos agroindustriais no Brasil e gera cerca de um milhão de empregos diretos, 511 na produção da cana e a outra parcela distribuída na agroindústria de açúcar e álcool. O estado de São Paulo, estado com maior expressividade do setor, é encarregado por 400 mil dos empregos diretos, podendo chegar a cerca de 1,2 milhão de outro indiretos.

Além do mais, o cultivo da cana no Brasil apresenta um dos níveis tecnológicos mais aplicados à agricultura nacional, utilizando técnicas de setorização da produção em talhões e gerenciamento das áreas produtoras em banco de dados (JOAQUIM, 1998). De acordo com Carvalho (2006), a evolução nas pesquisas proporcionou uma maior competitividade, do álcool e do açúcar, frente aos maiores produtores internacionais. A tabela a seguir representa a comparação entre os gastos para a produção do álcool nos principais países competidores.

Tabela 1 – Custo de produção em 2004 (US\$/l).

	País	Álcool Anidro (US\$/l)	Matéria Prima
Brasil	Centro-Sul	0,15	Cana-de-açúcar
	Norte-Nordeste	0,18	Cana-de-açúcar
EUA		0,33	Milho
União Europeia		0,55	Beterraba, trigo

Fonte: Adaptado de Carvalho (2006).

Além do fator ambiental, que possibilita a forte representatividade do Brasil, maiores benefícios estão relacionados a fatores econômicos na utilização do etanol, principalmente pela

instabilidade na oferta de petróleo e sua volatilidade nos preços (Figueira, 2005).

O fortalecimento desse setor ainda promete aumentar de acordo com estimativas acuradas da produtividade. Essa prática é importante para que se consolide políticas de preços e marketing das indústrias, auxílio nas decisões de datas inícios e fechamentos de safras além de quantificar as taxas reais de abastecimento e moagem das unidades industriais (SCHIMIDT et al., 2001).

4.1.2 A cultura da cana-de-açúcar e seu desenvolvimento

A cana-de-açúcar pertence à um grupo de gramíneas do gênero *Saccharum* e tem sua origem na Ásia. Seu surgimento é admitido, pela maioria dos pesquisadores, há cerca de seis mil anos, mais precisamente, em lugares como Indonésia, Filipinas, Nova Guiné e norte da África. De acordo com Lucchesi (2001), nos dias de hoje, a cultura está instalada principalmente em regiões tropicais e subtropicais, de 15° a 30° latitudinais, podendo se estender até os 35° de latitude.

Até meados de 1925, no Brasil, ainda predominava variedades de culturas consideradas “nobres” ou “tropicais” (*Saccharum officinarum*), que sustentavam a agroindústria açucareira. Porém, há muito, doenças assolavam e comprometiam o desenvolvimento vegetativo. Desde já, almejando maiores alcances em produtividade, aos poucos, substituiu-se essas variedades por espécies híbridas (*Saccharum spp*), com o intuito de garantir maior capacidade de resistência e adaptação às diversas condições exposta (SEGALLA, 1978).

Para um desenvolvimento ideal da cultura, se assume um cenário climático que potencialize os resultados da safra. De acordo com Doorenbos e Kassan (1979), duas situações são consideradas no ciclo produtivo. No período de crescimento constata-se uma estação quente com alta incidência da radiação solar, e específica umidade no solo. No seu período de maturação e colheita, a estação é seca e razoavelmente fria, favorável à diminuição de parte vegetal e acúmulo de sacarose nos colmos. O ideal é que, durante o crescimento a temperatura média varie entre 22 e 30°C, e no período de amadurecimento de 10 a 20°C, acompanhado de uma necessidade hídrica de 1500 a 2500 milímetros distribuídos igualmente no ciclo de cultivo (Doorenbos e Kassan, 1979).

Em suas diversas variedades, a cana-de-açúcar apresenta características como: considerada robustez, porte alto, metabolismo fotossintético C4 e considerável eficiência na produção de biomassa. De acordo com Rodrigues (1995), seu metabolismo fotossintético C4 se relaciona à eficácia na conversão de energia radiante em energia química, podendo chegar a

taxas fotossintéticas de 100 mg de CO₂ por dm² de área foliar por hora. Seguindo suas conclusões, a grande capacidade de produção de matéria orgânica pela cana-de-açúcar se correlaciona às altas taxas de fotossíntese por unidade de superfície de terreno, influenciado diretamente pelo Índice de Área Foliar (IAF), ressaltando a importância desse parâmetro agrônomo na análise de crescimento.

De acordo com Magalhães (1985), a análise de crescimento é um método padrão que estima a produtividade biológica de uma cultura em seu ambiente produtivo. O conhecimento da capacidade produtiva é importante pois além de assegurar lavouras, também avalia a validade do manejo presente. Além do (IAF), algumas outras variáveis morfológicas das plantas podem contribuir para a identificação da capacidade produtiva. Entre elas estão, a altura, o diâmetro e plantas m⁻¹ (SILVA; JERONIMO; LÚCIO, 2008).

Com os esforços direcionados em reduzir os custos de produção, mais ainda se direciona ao conhecimento do desenvolvimento temporal das variáveis agrônomicas que permitem o entendimento e predição da produção canavieira (MARAFON, 2012). Estudos realizados com variedades comerciais de cana-de-açúcar demonstra que a altura é fator determinante para a estimativa da produção, destacando a possível interferência de características biométricas na escolha da variedade que melhor se adapta à região (SANTANA; OLIVEIRA; MELO, 2010).

Aliadas ao conhecimento de informações agrônomicas e os padrões possíveis de serem interpretados, podemos tornar possível a implantação do gerenciamento agrícola por intermédio da geoinformação. Magalhães et al. (2013), reforçam os eventuais impactos positivos da implementação do uso de ferramentas que estimem a produção podendo determinar o manejo correto, uma logística adequada de colheita, o planejamento das operações nas usinas e no armazenamento e escoamento estratégico da produção.

4.2 O sistema atual de monitoramento e estimativa de safra no Brasil

A estimativa do potencial produtivo de uma determinada atividade agrícola é exercício de extrema importância, assim como o acompanhamento dos resultados adquiridos ao longo da safra. De acordo com Fernandes (2009), as previsões são fundamentais para o planejamento agrícola, visto a sua aptidão em fornecer estatísticas que subsidiam a formação de preços, o armazenamento, o abastecimento do mercado e as explorações.

No Brasil, tanto o IBGE quanto a CONAB se responsabilizam pelo levantamento das informações referente à produção agrícola. A utilização da geotecnologia pela CONAB está presente em dois projetos, Projeto Geosafra e Projeto SigaBrasil, que objetivam não apenas as

previsões de safras como também, o mapeamento da rede armazenadora nacional e das usinas de álcool e açúcar, localização de estoques, logística de escoamento, entre outras atribuições.

O IBGE, que comanda as estimativas de produtividade em escala municipal, aplica metodologias subjetivas à cerca da produção agrícola nos municípios. Basicamente o levantamento das informações é feita aplicando questionários, que são preenchidos por agentes de coleta do IBGE, estes devem fazer o preenchimento com base em consultas à técnicos do setor agrícola, grandes produtores ou com base no próprio conhecimento sobre a agricultura no município (IBGE, 2002).

O Projeto de Aperfeiçoamento Metodológico do Sistema de Previsão de Safras no Brasil (Geosafra), tem como principal objetivo agregar maior credibilidade às estimativas da companhia por meio do mapeamento das áreas cultivadas, divulgação de boletins espectrais, agroclimáticos e agrometeorológicos. Além disso, ele também pode servir como apoio à produtores rurais na tomada de decisões estratégicas e prevenção contra riscos envolvendo intempéries climáticas. O projeto SigaBrasil, se atenta mais a um melhor entendimento da estrutura da cadeia produtiva, dos impactos da agropecuária no ambiente e no facilitar de processos logísticos, isso tudo por intermédio de mapeamento envolvendo diversas informações do setor agropecuário relacionandas com parâmetros econômicos e ambientais (CONAB, 2012).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), ainda conta com o projeto Canasat que, desde 2003 monitora o crescimento das áreas cultivadas a cada ano na região centro-sul do Brasil (CANASAT, 2010). Mesmo notando uma crescente intervenção das geotecnologias a campo, muitos pesquisadores afirmam que esta ainda não é uma prática consolidada, necessitando o desenvolvimento de métodos que torne vantajoso as suas aplicações.

4.2.1 A previsão de safras para cana-de-açúcar

Com a intenção de aprimorar o sistema de estimativas e monitoramento das plantações, diversos autores propõem metodologias ou modelos sistemáticos com a intenção de contribuir com o progresso científico e melhoramento dos processos.

De acordo com Hoogenboom (2000 apud Moraes, 2012), modelos são simplificações matemáticas do mundo real, onde é impossível incluir todas as interações entre o ambiente e o sistema modelado, por isso, uma simplificação. Porém, a modelagem permite previsões baseadas na realidade, pelo fato de se conhecer os fatores que influem no resultado. No caso da cana-de-açúcar diversas metodologias são propostas, principalmente baseadas em dados

agrometeorológicos, espectrais e em parâmetros agronômicos.

Em Moraes (2012), é descrito uma metodologia que estima a produtividade de áreas cultivadas com cana-de-açúcar por meio da aplicação do Método da Zona Agroecológica (ZAE), de Doorenbus e Kassan de 1979, que calcula o potencial de biomassa considerando a temperatura do ar, a irradiância solar e a duração do ciclo da cultura. Os resultados mostram que o modelo em conjunto com a identificação de pixel do sensor MODIS, apresenta boas estimativas de produtividade comparado aos dados do IBGE, principalmente para municípios com 99% de área plantada.

Já em Benvenuti (2005), é mostrado uma metodologia que busca avaliar a relação entre a resposta espectral da cana com a sua produtividade. O estudo foi feito avaliando esses aspectos na forma de índices de vegetação (NDVI e GVI) e pela reflectância da banda 4 (b4) utilizando regressão linear simples. Os resultados também se mostraram promissores propiciando a utilização de imagens de satélite como auxílio para a estimativa de produção da cana-de-açúcar. Verificou-se também, uma melhor resposta do índice GVI em relação aos outros para a predição da produtividade, seguido pela b4 que se caracteriza também por ser o que tem maior sensibilidade aos estádios fenológicos da cana-de-açúcar.

A utilização de RPAs em estudo de estimativa ainda é um tanto quanto inovador, porém nota-se grande interesse e avanço nos estudos desses veículos como plataformas imageadoras. Martello (2017), avalia a potencialidade do uso de imagens obtidas por diferentes sensores a bordo de RPAs na obtenção da altura, da produtividade e da viabilidade espacial da cultura por meio de modelos tridimensionais. A estimativa de altura das plantas pelas imagens aéreas, principalmente de sensores IVP, se mostraram adequadas ao cálculo da produtividade, já que os valores obtidos apresentaram alta correlação aos dados observados em campo e estimados pela modelagem. O estudo ainda mostra que isso possibilita estimativas satisfatórias de produtividade, visto a comparação entre os valores encontrados na literatura.

De acordo com Martello (2017), a definição da altura das plantas é feita por meio da diferença entre o ponto mais alto do modelo, extraído do Modelo Digital de Superfície (MDS), até a sua origem, partindo do Modelo Digital do Terreno (MDT). A utilização das imagens no trabalho, possibilita a extração de tais modelos através de nuvens densas de pontos, geradas por métodos fotogramétricos convencionais. As nuvens densas de pontos são utilizadas para fornecer modelos da altura da cultura (MAC), que representa o topo do dossel da planta em determinado estágio de crescimento (BENDIG et al. 2013). A resolução de uma MAC varia normalmente entre 1 e 0,01 m para modelos georreferenciados permitindo assim o cálculo preciso do volume produtivo.

4.3 Sensoriamento Remoto Aplicado à Agricultura

Sensoriamento remoto pode ser definido como a detecção da natureza de um objeto sem que haja contato direto entre objeto e sistema sensor (Garcia, 1982). Florenzano (2002) define como uma ciência que permite a obtenção de alvos ou superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície, através de sensores instalados em plataformas terrestres orbitais ou aéreas.

De acordo com Benvenuti (2005), todos os materiais da superfície terrestre que apresentam temperatura acima do zero absoluto (0°K) podem emitir, refletir, transmitir ou absorver parcela da Radiação Eletromagnética (REM). O uso do sensoriamento remoto no estudo da vegetação, recorrentemente, inclui a reflectância como o fenômeno físico mais analisado (PONZONI, 2001). O produtor gerado consiste em se capturar parte da Energia Eletromagnética (EM) refletida pelo sensor, que por sua vez gera a imagem desses registros (BENVENUTI, 2005). Grandes vantagens são associadas à aplicação do sensoriamento remoto, entre elas a possibilidade de maior rapidez no recobrimento e a relação direta com os dados de campo.

Segundo Florenzano (2002), as distâncias entre sensor e alvo podem mudar de acordo com a plataforma que este é acoplado, isso permite a classificação quanto os níveis de altitude entre orbital, aéreo e terrestre. Conforme Fernandes (2009), a tecnologia permite a obtenção de informações espaciais e temporais detalhadas sobre comportamento das culturas e sua aplicação possibilita monitorar e detectar condições de stress que limitam a produtividade.

Koffler (1992) associa muitas vantagens ao uso de sensores orbitais em estudos agroambientais, como a possibilidade de analisar grandes áreas em apenas uma imagem, a regularidade na obtenção das imagens, e a obtenção de dados multiespectrais, multitemporais e em diferentes resoluções espaciais. A nível orbital a detecção das áreas cultivadas com cana representa uma alternativa de baixo custo, considerado a relevância das informações levantadas para o manejo. Isso tudo graças a capacidade de registro da interação da REM com o dossel da cana pelo sensor (FORTES; DEMATTÊ, 2006).

De acordo com Martello (2017), o uso de câmeras digitais profissionais de pequeno e médio formato têm crescido por serem, leves de fácil manejo e custo reduzido frente ao aerolevanteamento convencional. Porém em levantamentos convencionais, normalmente não é comum o emprego da banda do infravermelho próximo, devido ao custo elevado desta característica comparado as demais câmeras digitais.

Considerado a importância da banda do infravermelho próximo para o estudo dos alvos

e utilização de técnicas de sensoriamento remoto, nota-se a necessidade de adaptação dessas câmaras. Segundo Marotta et al. (2015), bons resultados têm sido alcançados na adaptação de filtros de câmaras digitais convencionais, possibilitando a realização da delimitação de coberturas vegetais, corpos hídricos e mapas temáticos com alta resolução espacial quando comparada a resultados obtidos pelos sistemas orbitais. A grande vantagem na utilização de câmaras modificadas se alia a ascensão do uso de RPAs, o embaratecimento dessa tecnologia e a possibilidade das mesmas serem acopladas à plataforma, imagens a qualquer momento e alta resolução espacial e temporal.

4.3.1 Resolução dos sistemas sensores

A qualidade de um sistema sensor está associada diretamente à sua resolução. Ela, pode ser definida como o grau de detalhes que cada sensor é capaz de traduzir, da energia eletromagnética refletida pelos alvos, em informação. Sendo assim, temos no mercado uma diversidade de sensores que atendem à diferentes objetivos, já que cada um apresenta resoluções particulares. De acordo com Coelho e Brito (2007), toda imagem apresenta quatro resoluções básicas, ou seja, quatro parâmetros básicos de avaliação de suas capacidades de aquisição de dados. São elas, resolução espacial, radiométrica, espectral e temporal.

A resolução espacial está relacionada à capacidade que o sensor admite para “enxergar” objetos tão pequenos quanto possível (COELHO; BRITO, 2007). A resolução espacial para imagens digitais, se relaciona diretamente ao “tamanho do pixel” assumido. Conforme Batista e Dias (2005), em algumas aplicações de sensoriamento remoto, o nível de detalhes de informações obtidas pelo sensor se relaciona com a distância entre alvo e a plataforma que embarca o sensor. As diferentes resoluções espaciais ditam as principais aplicações dos sensores. Sendo assim, a escala espacial é fator mais que importante para a escolha do sensor, procurando buscar sempre o equilíbrio entre o menor custo com os maiores benefícios (FERNANDES, 2009).

A resolução radiométrica diz respeito à capacidade que um sensor tem de detectar diferentes tons de cinza. Segundo as palavras de Coelho e Brito (2007), isso também pode ser entendido como a capacidade de se detectar as menores variações possíveis de incidência de energia sobre o filme, em caso de imagens analógicas. No caso de imagens digitais, a quantidade de tons está relacionada a uma potência de 2, uma vez que o sistema utilizado para as máquinas é o binário. No exemplo de uma imagem que apresente 8 bits (binary digits), o número de tons de cinza é “ 2^8 ”, encontrando-se assim o valor de 256 tons.

A resolução espectral funciona de forma análoga tanto para na aplicação da Fotogrametria com câmaras digitais ou analógicas. Em câmaras analógicas, basicamente, a resolução espectral corresponde ao número de bandas e a largura que o filme consegue cobrir de cada banda. Pode-se dizer também, que essa resolução corresponde à largura da faixa do espectro eletromagnético captada. Segundo Novo (2010), quanto maior o número de bandas em regiões diferentes do espectro e menor for a largura do comprimento de onda, maior será a resolução espectral embutida.

Por fim, a resolução temporal, assim como a espectral, não apresenta variação no seu conceito quanto o sistema, seja ele digital ou analógico. Fernandes (2009), relaciona a resolução temporal como a repetitividade de observação de uma mesma área por um mesmo sensor, ou seja, o intervalo temporal entre revisitas.

Em estudos agrícolas recomenda-se o uso de sensores de alta resolução temporal, com pequeno intervalo de tempo entre revisitas, a fim de aumentar a periodicidade o monitoramento das culturas e as chances de se obter imagens livres de interferências, como nuvens.

4.4 Fotogrametria

Segundo definição de Wolf e Dewitt (2004), a Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de se obter informações confiáveis sobre objetos e ambientes, por meio de processos de gravação, medição e interpretação, de fotografias e imagens em geral. De acordo com Coelho e Brito (2007), essa informação tem grande aceitação e correlação com outros autores da área, porém o texto ainda é vago, e muitas vezes traz ao leitor inexperiente a impressão de nada ter acrescentado nos seus conhecimentos. Em razão disso eles expandem o conceito de forma a reforçar o objetivo principal da Fotogrametria, que consiste em uma ciência e tecnologia de se reconstruir o espaço tridimensional, por meio de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas, sem contato direto entre sensor e objeto.

A Fotogrametria ainda pode ser classificada em terrestre, aérea e orbital, conforme a plataforma em que está baseada a sua aquisição. Segundo Zanetti (2017), a aquisição de imagens ainda é considerada muito onerosa, devido ao alto custo dos equipamentos e incluso aos de operação. Coelho e Brito (2007) fazem considerações acerca de equipamentos como câmaras métricas, que apresentam uma maior rigidez nas coordenadas de câmara, e parâmetros já definidos em um certificado de calibração. Entretanto, a utilização de câmaras não-métricas

passou a ganhar grande significância, uma vez que estas apresentam baixo custo, grande praticidade e a possibilidade de se aplicar métodos de calibração assegurando seus parâmetros internos.

4.4.1 Uso de RPA como plataforma de SR

Aliado ao uso de câmaras não-métricas, o surgimento dos RPAs trouxe a possibilidade de elevar essa tecnologia de baixo custo para níveis aéreos. No início da década de 1970 potências nacionais começaram a experimentar RPAs menores, mais lentos e baratos onde seu principal recurso era a utilização de câmaras pequenas que poderiam enviar fotos em tempo real (NASA, 2006).

De acordo com Zanetti (2017), o sensoriamento remoto é provavelmente a área com o maior número de ferramentas desenvolvidas para o uso de RPAs. Algo que favoreça isso, é o fato de que a maioria das aplicações destinadas a RPAs tem embasamento em técnicas tradicionais de SR, nos seguimentos das ciências exatas e da terra, no manejo do territorial, das costas e como instrumento de segurança pública (NASA, 2006).

Para Bendig et al. (2015), a coleta de dados com o auxílio de RPAs representa um grande avanço na escala observacional em sensoriamento remoto. Entre as vantagens citadas, se destaca a alta precisão espacial e temporal, alcançada quando sensores são associados a essas plataformas. Esses, são parâmetros de suma importância para o monitoramento do crescimento das culturas. Em consequência da aplicação dessa tecnologia no monitoramento, respostas mais rápidas e facilitadas são adquiridas na detecção e quantificação da variabilidade dentro do campo, revelando esse como um ótimo instrumento de agricultura de precisão para o apoio de decisões no setor agrícola.

As informações que vão desde o preparo da terra para plantio até a sua colheita são de extrema importância para o ciclo produtivo. Poder se apoiar em sistemas que monitorem todo o esse espaço de tempo é atividade muito vantajosa, já que esta abre a possibilidade de se fazer considerações e alinhar melhores rotas para uma maior eficiência. Além de todas as vantagens associadas ao monitoramento em si, Rkhmana (2015) ainda cita maiores vantagens em sua associação a um RPA, como facilidade de operação, boa repetitividade e alta resolução das imagens.

4.4.2 Legislação

No Brasil existem legislações para o uso de aeronaves não tripuladas. Recentemente a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) junto ao DECEA (Departamento de Controle do Espaço) e a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicação), regulamentaram o seu uso para operações civis (ANAC, 2017).

As normas para utilização de RPA variam de acordo com o seu peso máximo no momento da decolagem. Cada classificação apresenta normas específicas e diretrizes a serem seguidas por regulamento. Quanto maior o peso do RPA maior serão as exigências da norma. Sendo assim, pode-se classificar esses equipamentos de três maneiras distintas, indicadas no quadro a seguir.

Quadro1: Categoria dos Veículos Aéreos Não Tripulados.

Classes	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Peso Máximo de Decolagem	Acima de 150kg	Entre 25Kg e 150kg	Abaixo ou Igual a 25Kg

Fonte: Adaptado ANAC, (2017).

O aeromodelo a ser utilizado no presente trabalho se encaixa na “Classe 3”. Esta classe estabelece que os voos acima deverão ser de no máximo de 120 metros, acima disso é necessário que o projeto seja autorizado pela ANAC junto ao seu registro.

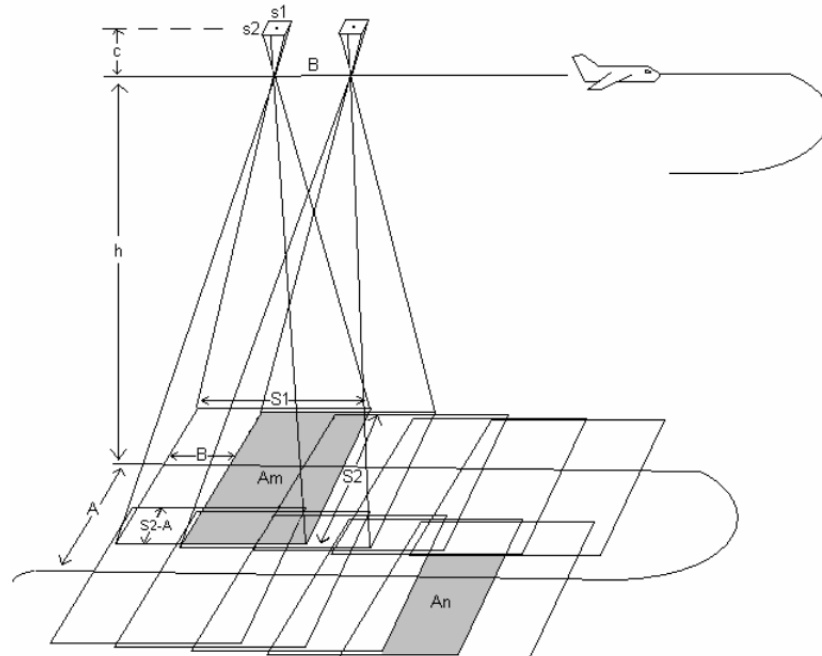
Nesse sentido ANAC estabelece normas gerais para o uso de RPA em aerolevantamentos em que o piloto é impossibilitado de intervir. É expressamente proibido no Brasil voos abaixo de 30 metros e operação desses equipamentos por menores de idade. Em caso de infrações o responsável, ou responsáveis, estão sujeitos a penalização de acordo com o descrito no Código Brasileiro de Aeronáutica (ANAC, 2017).

4.4.3 Planejamento de voo

O plano de voo tem como objetivo utilizar da melhor forma todos os recursos disponíveis para execução do levantamento aerofotogramétrico com vistas a todos os elementos necessários de um levantamento fotogramétrico. De acordo com Gonçalves (2006), os elementos necessários para realização do voo são a altitude de voo, o espaço entre duas imagens devidamente tomadas adjuntas (Figura 1) e a distância entre as linhas de voo. Outro fator

relevante para a reconstrução 3D dos ambientes é a sobreposições das imagens, também representado a seguir.

Figura 1: Tomada de imagens a partir de parâmetros definidos em plano de voo.



Fonte: Adaptado de Redweik (2007).

Na Fotogrametria tradicional as linhas de voo geralmente são planejadas com uma região de sobreposição longitudinal de 60% entre as imagens, ao mesmo tempo em que, a área de sobreposição lateral é de 30% entre as fotos obtidas de maneira adjacentes, pois com isso é possível evitar espaços vazios entre as imagens sucessivas e possibilita a visão estereoscópica e ter maiores acurácias e precisões. Outros elementos importantes é a distância focal e a abertura da câmera, estes elementos são determinados em função das características do terreno a ser levantado (COELHO e BRITO, 2007).

Um fator determinístico para a finalidade do aerolevanteamento é escala de voo, pois esta é a razão entre a uma distância medida em um mapa e a correspondente no terreno, este fator implica diretamente na escolha para altitude de voo, sobreposição entre as fotografias, velocidade de voo e na escolha de sensor levado a bordo do avião.

Segundo Tommaselli (2009), a escala pode ser dada por meio de uma função da distância focal da câmara e da altura de voo alterada pela altitude do terreno. Logo a equação matemática da escala (Equação (1)) e focal (Equação (2)) é dada por:

$$E = \frac{f}{hm - h} \quad (1)$$

Onde:

- f é a distância focal;
- hm é a atitude média do terreno;
- h é a altitude da câmera.

$$H' = h - hm = \frac{f}{E} \quad (2)$$

Onde:

- h é a altitude da câmera;
- hm é a atitude média do terreno;
- f é a focal;
- E é a escala.

Apresentado os elementos citados acima, para complementar é necessário que se conheça a extensão da área a ser imaginada e a finalidade do projeto, para assim, definir o restante dos parâmetros do plano de voo, como: o número total de fotos, quantidades de linhas de voo, o intervalo de tempo entre as fotografias, tempo gasto para realização do aerolevanteamento e porcentagem de sobreposição.

4.4.4 Pontos de controle

Para se atingir resultados satisfatórios por meio da Fotogrametria, deve-se dispor de dados iniciais de boa qualidade. De acordo com Coelho e Brito (2007), esses dados são constituídos sobretudo, por pontos de controle em campo e pontos de teste para análise da qualidade do mapeamento produzido. Uma vez que esses pontos são alocados no espaço-imagem, adquire-se os parâmetros para a dedução da função que mapeia um sistema no outro.

Segundo Zanetti (2017), um problema recorrente que influencia na qualidade posicional na geração de ortofotos é a falta de análise efetiva do número e distribuição dos pontos de controle. Recomenda-se que estes estejam distribuídos de maneira uniforme sobre o terreno. A qualidade posicional da ortofoto também está relacionada de maneira diretamente proporcional ao número de pontos, porém, cabe se verificar até onde é economicamente viável a obtenção de tantos pontos de controle (COELHO; BRITO, 2007).

Como a formação da imagem corresponde a um processo de interpolação estes incluem erros inerentes. Porém, de acordo com Coelho e Brito (2007), se respeitadas as precisões adequadas a cada escala na obtenção dos pontos de apoio, pode-se chegar a resultados aceitáveis para mapeamento topográfico, ou até mesmo para mapeamento cadastral.

Atualmente, os sistemas das câmaras aéreas permitem o registro automático das coordenadas do centro da foto tomada, inclusive de dados de rotação da aeronave. Isso tudo graças a integração dessas com sistemas de posicionamento por satélite e sistemas de medição inercial (*Inertial Measurement Unit -IMU*). Conforme Sato (2003), a qualidade geométrica para a obtenção das imagens é aumentada quando a câmara é dotada de dispositivos de compensação dos ângulos de orientação (ω , φ , κ) o que aumenta consideravelmente a produtividade, reduzindo a densidade necessidade de pontos de controle assim como as tarefas de ajustamento da aerotriangulação.

Em estudo citado por Zanetti (2017), para aeronaves dotadas dessa tecnologia, foi alcançada classificação A na escala de até 1:2500 para levantamento com ausência de pontos de apoio. Porém, o ortomosaico e MDS gerados sem ponto de apoio apresentam tendência planialtimétrica, revelando assim a necessidade de se apoiar levantamentos na confecção desses produtos obtidos por RPAs.

4.5 Modelos digitais do terreno e de superfície

Os Modelos, Digital de Terreno e Digital de Superfície fazem parte de um grupo de representações que tem por objetivo descrever uma área da superfície terrestre. Segundo Gripp Jr. (2009), um Modelo Digital de Terreno (MDT), ou, Modelo Digital de Elevação (MDE) corresponde à uma representação da Terra no modo digital, cuja objetivo principal é descrever a morfologia de uma área de forma contínua visando representar a altimetria sem a cobertura vegetal e/ou elementos antrópicos. Já um Modelo Digital de Superfície, tem por objetivo representar a superfície do terreno sem levar a consideração a exclusão de qualquer elemento, como por exemplo árvores ou edificações, onde a superfície do objeto é considerada e representada como a superfície do terreno (CRUZ et al., 2011).

Uma das etapas que envolve o processo de geração dos modelos digitais é a parte de aquisição dos dados, a fim de representar o fenômeno, também chamada de amostragem. No caso de um MDT, a aquisição pode ser feita por meio de topografia clássica, posicionamento por satélites, Fotogrametria entre outros. Felicísimo (1994 apud ZANETTI, 2017), traz na tabela 2, a indicação das devidas tecnologias usadas para criação de um MDT, classificadas em

métodos diretos ou indiretos.

Tabela 2 - Métodos de aquisição de dados para MDTs.

Diretos	GPS	Global Positioning System, sistema de localização por satélites.
	Topografia	Uso de estação total e níveis.
Indiretos	Restituição	Digital: imagens estereoscópicas orbitais ou de sistemas aerotransportados
		Analógica: pares de fotografias estereoscópicas analógicas.
	Digitalização	Manual: mediante mesas digitalizadoras
		Automática: com uso de scanners

Fonte: Adaptado de Felicísimo (1994 apud ZANETTI, 2017).

Segundo Martello (2017), a partir do desenvolvimento das aeronaves remotamente pilotadas, em conjunto com câmaras de alta resolução, vários trabalhos vêm utilizando a tecnologia para obter modelos digitais de superfície e de elevação, por meio da modelagem tridimensional dos ambientes.

A modelagem tridimensional da área é realizada por meio de algoritmo SFM (*Structure From Motion*), que identifica semelhanças geométricas, que são detalhes específicos dos objetos, em uma série de imagens, permitindo reconstruir a cena em três dimensões. Isso pode ser verificado observando a Figura 2, que representa a densificação intensa de pontos. De acordo com Viana (2015), uma vez detectado os pontos comuns suas coordenadas são computadas e esses passam a integrar a chamada nuvem esparsa, que corresponde a distribuição espacial dos pontos no sistema. A próxima etapa corresponde à inserção dos pontos de controle para a formação da nuvem densa de que gera a triangulação ou malha triangular, posterior MDS. Com o MDS é produzida a ortofoto da área de estudo.

Figura 2 – Densificação de pontos com o auxílio do algoritmo SFM.



Fonte: Laboratório de Sensoriamento Remoto e Fotogrametria – UFU (2018).

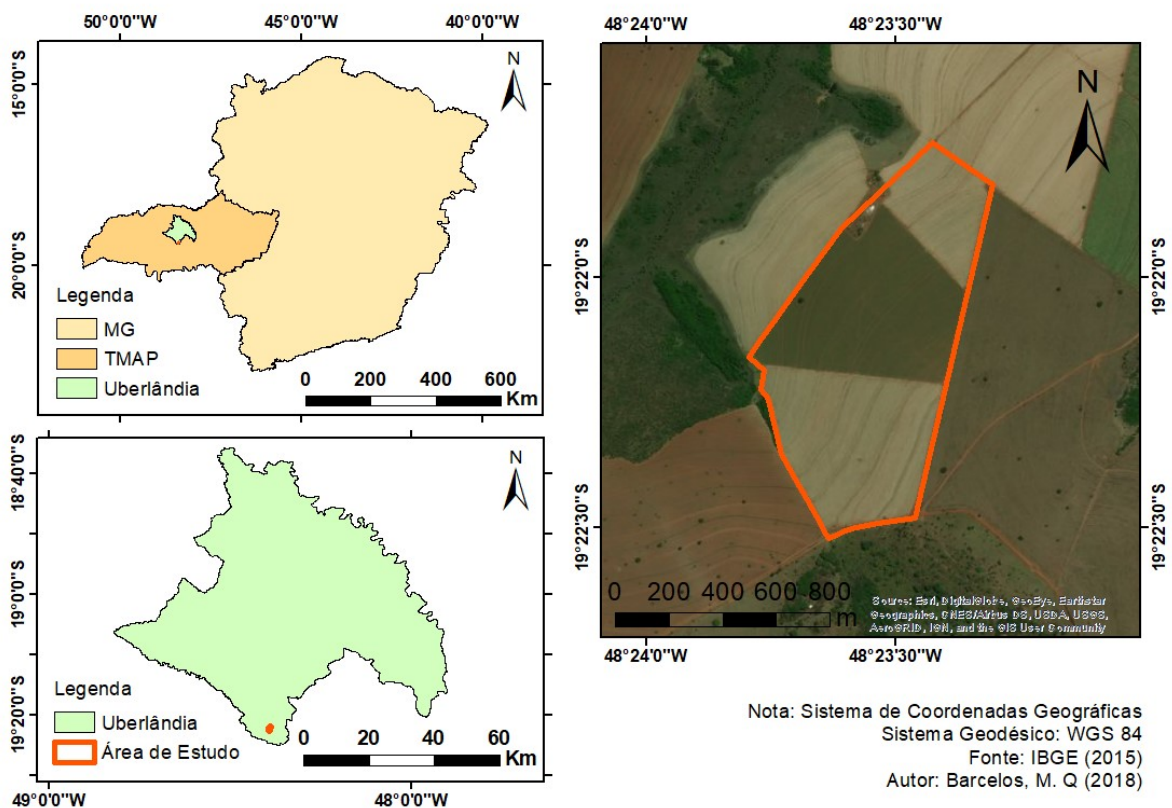
5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo

Para a realização do estudo foram consideradas duas áreas diferentes com cultivares de cana-de-açúcar. As escolhas das áreas foram feitas com o intuito de se realizar testes em diferentes condições de cultivares, de densidades, idades e climáticas.

Uma das áreas experimentais está localizada dentro dos limites políticos da cidade de Uberlândia – MG, nas imediações do distrito de Miraporanga, distrito mais antigo do município, situado na região do Triângulo Mineiro próximo às coordenadas geográficas 19° 22' 4" de latitude sul e 48° 23' 32" de longitude oeste. A região abrange uma área de aproximadamente 70 hectares (ha) cultivados exclusivamente com cana-de-açúcar, onde foi realizado um dos levantamentos necessários para o estudo.

Figura 3 - Mapa de localização Fazenda Sonho Azul.

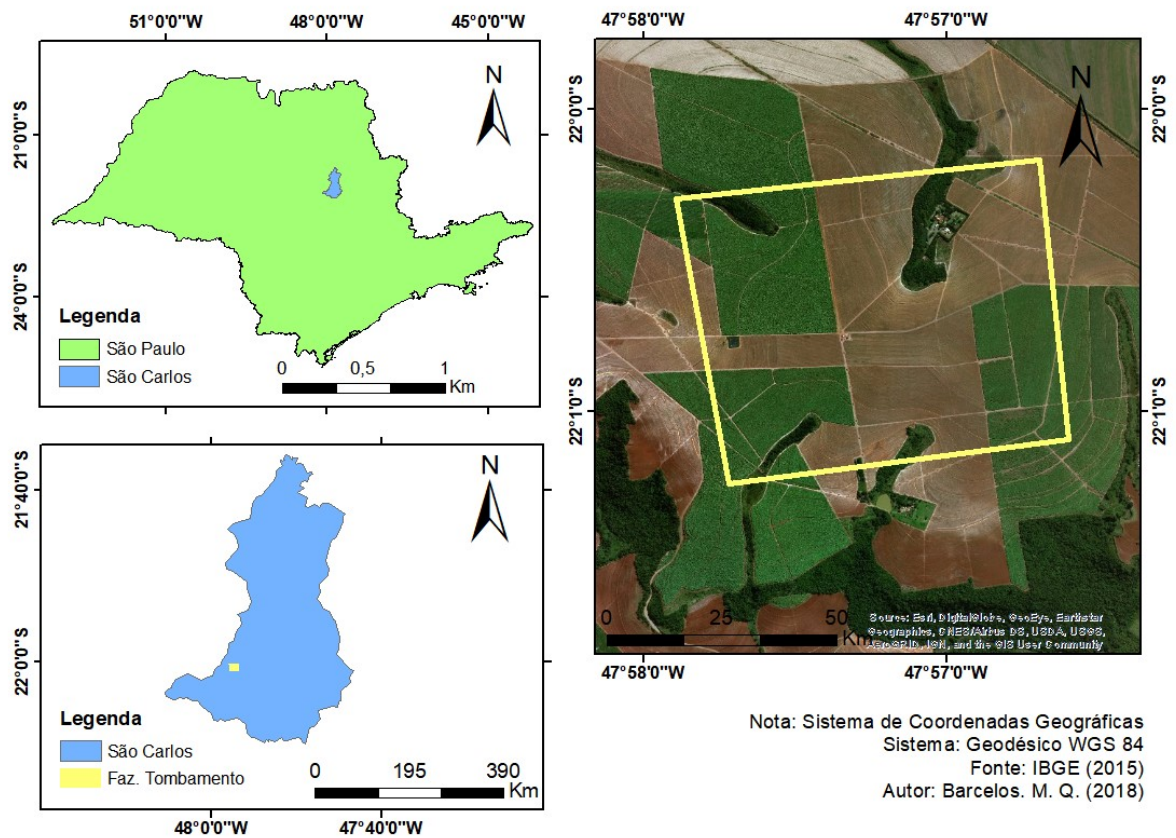


Fonte: O autor.

A segunda área está localizada dentro dos limites políticos da cidade de São Carlos. A

cidade se localiza no centro geográfico do Estado de São Paulo, a aproximadamente 250 km da capital paulista. O município ainda faz parte da macrorregião mais desenvolvida do Estado estando próxima às cidades de Ribeirão Preto, Araraquara e Rio Claro. Situada próxima às coordenadas geográficas $22^{\circ} 00' 47''$ de latitude sul e $47^{\circ} 57' 20''$ de longitude oeste. A região abrange uma área de aproximadamente 200 hectares (ha) cultivados também exclusivamente com cana-de-açúcar.

Figura 4 - Mapa de localização Fazenda Tombamento.



Fonte: O autor.

5.2 Material

O presente trabalho, apresenta as etapas de planejamento, aquisição, processamento e análise dos dados. Para a realização dessas etapas se fez necessário a utilização de diversos materiais, entre equipamentos para a aquisição dos dados de campo, assim como de softwares para processamento a fim de se chegar aos produtos finais e nas informações desejadas.

A seguir é indicado todo o material necessário divididos por fases. A primeira das etapas consiste em se definir exatamente as ações a fim de economizar tempo e recursos na execução,

o planejamento. Para essa etapa se inclui os seguintes materiais:

- Notebook Dell Inspiron i15-5567-A30C, Intel Core 7 I5, 8GB RAM, 2GB vídeo, HD 1TB e sistema operacional Windows 10, 64 bits;
- Celular;
- *Software Google Earth* para o planejamento do levantamento dos dados *in situ*;
- *Software DroneDeploy* para a elaboração do planejamento de voo;

Na aquisição de dados, dois levantamentos distintos serão considerados: os levantamentos fotogramétricos e o levantamento *in situ* (no local) de alturas por regiões. Assim sendo, os equipamentos exigidos são:

- Drone Phantom 4 Advanced, com peso de 1368 gramas, autonomia de voo de aproximadamente 30 minutos e equipado com câmara RGB de 20 megapixels e GPS integrado;
- Trena;

Para o processamento e análise dos dados são incluídos aos materiais *software* que trabalharão os dados brutos e os transformarão em informação. São eles:

- Notebook Dell Inspiron i15-5567-A30C, Intel Core 7 I5, 8GB RAM, 2GB vídeo, HD 1TB e sistema operacional Windows 10, 64 bits;
- *Software Pix4D* para o processamento fotogramétrico;
- *Software Agisoft* para o processamento fotogramétrico;
- *Software SisCob* para segmentação de áreas;
- *Software QGIS* para a confecção dos mapas;

5.2.1 RPAs

Para a aquisição das imagens aéreas, foi utilizado um RPA *Phantom 4 Advanced* (Figura 5) desenvolvido pela empresa DJI. Esse drone apresenta decolagem vertical característica desses equipamentos que apresentam asa rotativa, assim como uma bateria removível possibilitando a utilização de mais de uma bateria por voo. É considerado um drone de alcance médio, principalmente, por apresentar atributos que possibilitam a realização de trabalhos de engenharia e seu ótimo custo benefício se comparado a outros equipamentos utilizados com o mesmo propósito técnico.

Figura 5 – Drone Phantom 4 Advanced com controle e baterias.



Fonte: Laboratório de Sensoriamento Remoto e Fotogrametria – UFU (2018).

Dentre as características dispostas pelo fabricante podemos citar como principais:

- Autonomia de voo de 30 minutos por bateria;
- Sensores de detecção de obstáculo;
- Câmera 20 megapixels de 1 polegada equipada com sensor CMOS Alcance de controle remoto de até 7 km;
- Permite voos programados através de aplicativos de dispositivos móveis;
- Sistema de posicionamento por satélites de banda dupla (GPS e GLONASS) integrado;
- Alcance máximo de velocidade de até 75 km/h;
- Sistema de auto estabilização contra condições climáticas de vento de até 50 km/h.

5.2.2 Softwares de processamento de imagens de RPAs

Existem vários programas de fotogrametria no mercado e sua utilização está relacionada diretamente ao produto a ser gerado. Para este trabalho escolheu-se processar as imagens adquiridas nos softwares Photoscan e Pix4D. Os dois desenvolvidos especificamente para tratar conjunto de imagens de levantamentos aéreos de veículos não tripulados.

O Photoscan é um *software* desenvolvido pela empresa Agisoft. Ele foi lançado em 2010

para realizar processamento de imagens digitais e a geração de dados espaciais em 3D para seu uso e implementação em Sistemas de Informação geográfica (GIS) e permitir medições de objetos de diferentes escalas. O *software* associa diversas funcionalidades como fototriangulação aérea e terrestre com exportação dos dados para outros *softwares* fotogramétricos, geração de nuvem de pontos e modelos poligonais triangulares 3D, MDS e MDT, Ortofoto verdadeira, processamento de imagem multiespectral, entre outras. Recomenda-se que se use sobreposições longitudinais e laterais de 80 e 60% respectivamente (PHOTOSCAN, 2014).

O Pix4Dmapper é um *software* pago fabricado pela empresa Pix4D, lançado em 2011 sob a função principal de criar modelos e mapas digitais em 2D e 3D georreferenciados e buscando alta precisão de imagens de drones. Para realização dos trabalhos de mapeamento se utilizando dessa ferramenta é necessário adquirir uma licença particular ou por contrato de serviço online. Vale salientar que para a realização desse trabalho se utilizou da versão teste que é disponibilizada pela empresa no prazo de 15 dias, a fim de permitir que o usuário avalie cada um dos atributos que oferece. O *software* calcula as posições e orientações das imagens originais de forma automática por meio da Triangulação Aérea (AAT) e Ajustamento de feixes em Bloco (*Bundle Block Adjustment*, BBA). Por esses meios é possível que seja feito Modelos Digitais de Superfícies (MDS) que têm suas bases em nuvens de pontos 3D obtidos durante a AAT e BBA. O ortomosaico por sua vez é formado a partir na projeção e combinação das imagens originais com o MDS (PIX4D 2013a).

Entre alguns dos produtos que os programas são capazes de fornecer estão:

- Nuvem de pontos 3D: reconstrução e classificação digital geolocalizada com precisão de todos os pontos de interesse;
- Modelo digital de superfície e terreno: valores de elevação de cada pixel que eles permitem trabalhar com ferramentas SIG;
- Ortomosaicos: mapas digitais de alta resolução georreferenciados a partir das imagens processadas;
- Cálculo de área e volume: é possível realizar cálculos de área e volume a partir de uma representação gráfica das áreas de interesse;
- Mapas 3D: criação de malha texturizada fotorrealistas do objeto de interesse.

5.2.3 A classificação da ocupação do solo

A análise de ocupação do solo fica por conta do SisCob, que é um *software* utilizado para fazer análises de cobertura do solo. Para isso ele utiliza de técnicas de classificação e processamento de imagens digitais a fim de quantificar alterações e produzir mapas temáticos de diferentes culturas. Essa classificação é feita através de artifícios de inteligência artificial reconhecer padrões de cores pré-estabelecidos e assim gera um produto final.

Suas principais aplicações estão no monitoramento de pragas, doenças, deficiências e de necessidades específicas. Neste trabalho o *software* teve fundamental importância na quantificação mais assertiva das áreas plantadas, aumentando a precisão na previsão das safras uma vez que foram retiradas as áreas afetadas por falhas. Além de se destacar na medição de áreas das culturas prevendo alterações por praga doença ou deficiência, o sistema ainda se apresenta como uma solução de fácil acesso podendo auxiliar pesquisadores, produtores, silvicultores, dentre tantos, à tomada de decisão por meio da sistematização das informações produzidas.

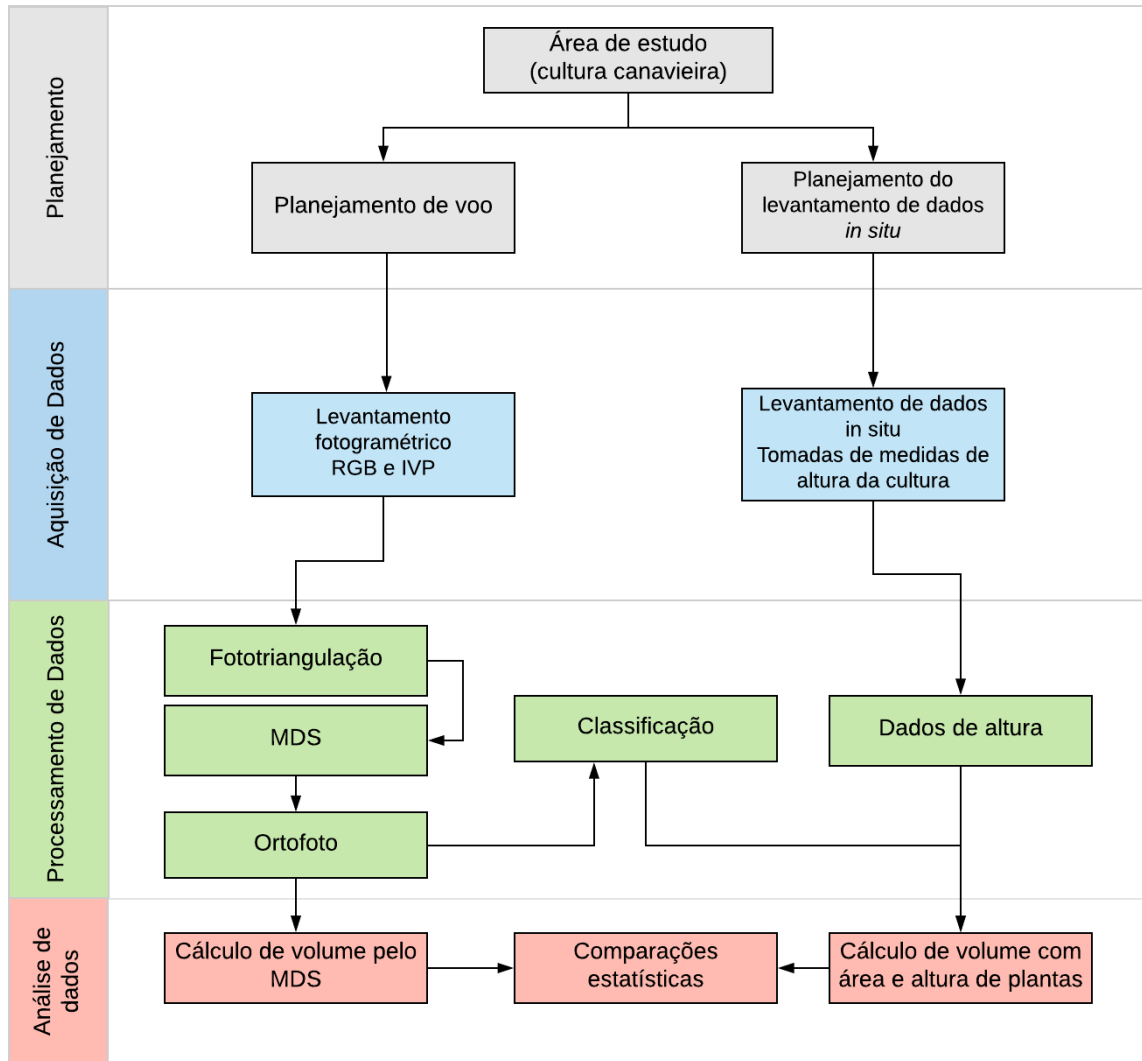
O SisCob tem capacidade para processar e analisar imagens obtidas de diversas fontes, sejam elas terrestres, aéreas ou orbitais. Ele ainda se caracteriza por ser uma aplicação prática e de baixo custo já que não se assume gastos com licença, podendo o mesmo ser baixado no site da Embrapa Instrumentação Agropecuária.

5.3 Metodologia

Para uma melhor estruturação da metodologia, foi realizado um fluxograma (Figura 6) com o intuito de ilustrar, de forma lógica, o decorrer das etapas. O objetivo é de limitar, melhorar a visão e dar direcionamento às ações. Desta forma, este, também serve como instrumento de planejamento e conseqüentemente, facilitador para o alcance dos objetivos.

As etapas são compostas de uma seqüência temporal passando do planejamento inicial, aquisição dos dados, processamento dos dados e análise das informações acerca da execução das etapas precedentes. A seguir está representado o fluxograma de atividades.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: O autor.

5.3.1 Procedimento de campo

A realização de toda a parte de aquisição dos dados de campo se deu em parceria com o professor Mestre Matheus Oliveira Alves (Professor nas Faculdades Associadas de Uberaba (FAZU)) para a Fazenda Sonho Azul, e com o profissional Vitor Godoy de Barros para a Fazenda Tombamento. Os levantamentos aconteceram nas datas 24 de junho de 2018 e 18 de abril de 2018 respectivamente, sendo que uma delas (Fazenda Sonho Azul) já em época de pré colheita e a segunda área formada por uma variedade maior de desenvolvimentos. Toda a etapa de aquisição foi feita de forma independente pelos devidos profissionais, por isso, este trabalho apresenta uma proposta de metodologia, semelhante a aplicada pelos profissionais em campo.

Antes que se inicie o levantamento dos dados em campo é recomendável que se faça um planejamento das atividades. Nesta etapa a análise das condições geralmente são feitas por meio de uma visita técnica de reconhecimento do local e ou por algum *software* de visualização espacial na internet. Essa etapa é importante por garantir uma melhor eficácia no desempenho das atividades em campo, buscando sempre uma maior agilidade a fim de evitar gastos desnecessários e conseqüentemente, reduzir os custos operacionais.

O planejamento bem feito ainda evita maiores problemas com imprevistos, com dificuldade em acesso a localidades, tomando ideia das dimensões territoriais acompanhado da previsão climática do dia do voo. Sendo assim, dentro da disponibilidade das equipes foram constatados os melhores dias, citados anteriormente, para levantamento e a distribuição espacial dos pontos de coleta de amostras “*in situ*” pelo *software* Google Earth.

5.3.1.1 Planejamento de voo

Para a realização dos levantamentos aéreos primeiro é obrigatório que sejam feitos os devidos planejamentos de voo. O *software* utilizado para a realizações dessa tarefa foi o *Drone Deploy*, que oferece uma solução rápida e fácil, devido à sua interface bastante intuitiva, para a automatização de voos e obtenção de mapas aéreos. Ele pode ser realizado em um computador pessoal ou em qualquer dispositivo móvel através de seu aplicativo para posterior comunicação com o controlador do drone. Nele foram fixados diferentes parâmetros para os diferentes planos de voo em decorrência da diferença entre as áreas.

Desta forma ficou definido para a Fazenda Sonho Azul uma altura de voo de 100,58 metros, sobreposição lateral de 65 % e sobreposição longitudinal de 75 %. Tendo isso tudo aplicado em uma área de 8 ha conseguiu-se um resultado de 3cm por pixel de GSD (*Ground Sample Distance*), que é a representação de cada pixel da imagem em unidades de terreno (geralmente em centímetros), e uma quantidade de 7 linhas de voo ajustadas de forma a se economizar o máximo de bateria. O voo teve duração de 6:36 minutos foi realizado por volta das 16:32 horas, o que é considerada um horário ruim para se realizar o estudo. Isto porque o melhor horário para se realizar um voo é entre as onze as treze horas, por se tratar do período do dia em que os alvos sofrem menos com a influência de sombras e pela boa quantidade de radiação recebida. Levando em conta que quantificação dos volumes são feitos a borda dos talões, muitas vezes esse problema pode ser acentuado, daí a importância de se realizar o levantamento no horário ideal.

Na imagem a seguir está representado a imagem do plano de voo similar realizado pelo

Software Drone Deploy para a Fazenda Sonho Azul.

Figura 7 – Plano de voo para a Fazenda Sonho Azul, talhão 24.



Fonte: O autor.

Para a Fazenda Tombamento foi definida uma altura de voo de 330 metros, sobreposição lateral de 50% e sobreposição longitudinal de 75% com uma duração de 19:26 minutos. Seguindo esses parâmetros a área de 200 ha precisou de sete linhas de voo, possibilitando um GSD de 10 cm por pixel. O voo na Fazenda Tombamento foi realizado por volta das 10 horas, considerada um bom, mas não melhor horário para a realização do estudo.

Figura 8 – Plano de voo para a Fazenda Tombamento.



Fonte: O autor.

5.3.1.2 Aquisição dos dados

Para a aquisição das imagens aérea foi realizado o voo que se sucedeu de forma automática por intermédio do aplicativo *Drone Deploy*. Após escolha do ponto de decolagem, atenção as condições climáticas e definição prévia do planejamento o voo é realizado, sendo que o seu controle e acompanhamento também é feito por intermédio do mesmo aplicativo.

Finalmente, foi realizado o levantamento de dados “*in situ*” onde foram coletadas algumas amostras de altura de plantas. Esses dados mais tarde foram destinados a um cálculo de volume, uma metodologia mais acessível.

A coleta de dados “*in situ*” foi realizada apenas na Fazenda Sonho Azul em pontos arbitrários escolhidos de forma a representar a realidade de um dos talhões da melhor forma possível, aproximadamente 28 há de área. A tomada de medidas de altura da cana-de-açúcar foi realizada com trena (assim como é mostrado na Figura 10) acrescidos de sua posição espacial aproximada, adquirida por meio de GPS de navegação para posterior espacialização da coleta. A imagem a seguir retrata os pontos de coleta das plantas adicionado também o polígono de estudo dos cálculos fotogramétricos.

Figura 9 – Localização geográfica dos pontos de coleta de dados *in situ*.



Fonte: O autor.

A seguir está representada a tomada de medidas em campo por trena. Este procedimento foi realizado para o cálculo de volume relacionada a área plantada retirado as falhas.

Figura 10 – Tomada de altura da cana com trena.



Fonte: Alves, M. O (2018).

A seguir o quadro com as respectivas alturas das plantas em cada um dos pontos:

Quadro 2 - Alturas das amostras colhidas em campo.

Altura Cana	
P1	1,97
P2	1,72
P3	2,05
P4	2,22
P5	2,78
P6	2,47
P7	2,53
P8	2,22
P9	2,28
P10	2,06

Fonte: Alves, M. O (2018).

5.3.2 Processamento dos dados

O procedimento computacional que envolve o processamento das imagens dos aerolevamentos contou com a utilização dos *softwares Pix4D e PhotoScan*. Eles foram responsáveis por realizar a fototriangulação, que possibilitou a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos no terreno e por fim gerar a ortoimagem necessária em etapas subsequentes.

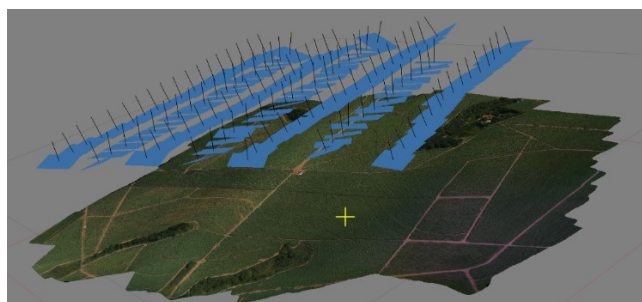
Uma outra metodologia proposta contou com a utilização do *software SisCob* para a classificação dos produtos gerados na fototriangulação anterior. Esse método se caracteriza por ser uma abordagem de menor custo onde o objetivo é a mensuração da área plantada associada a dados de altura das plantas.

5.3.2.1 Alinhamento e fototriangulação

Após o processo de levantamento as imagens, são importadas para dentro do *software* com os devidos dados de orientação interior, vindo do GPS do próprio equipamento. Assim que as imagens são posicionadas e orientadas, é possível executar o alinhamento das fotografias, obtendo o posicionamento inicial. Essa e outras etapas são realizadas de forma automática pelos *softwares Pix4D e PhotoScan* que recebem as imagens e avaliam os parâmetros internos e externos da orientação da câmara, incluindo as distorções radiais e não-lineares.

O trabalho é executado por meio da correspondência de pontos homólogos entre as imagens e com as coordenadas de cada cena. A obtenção de um posicionamento inicial em campo possibilita maiores ajustes na posição planimétrica fazendo correções das fotografias em relação aos pontos rastreados, porém tal levantamento não é necessário para realização da fototriangulação nem construção da ortoimagem, os parâmetros interiores já garantem bons resultados. A figura a seguir retrata o processo de fototriangulação.

Figura 11 – Fototriangulação inicial.

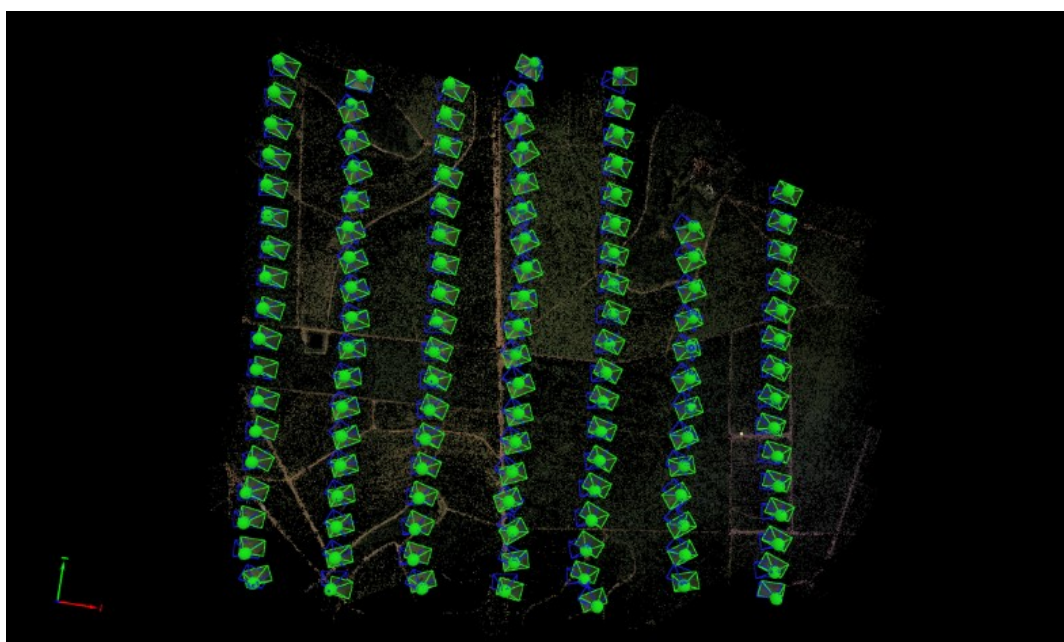


Fonte: O autor.

5.3.2.2 Densificação da nuvem de pontos

Para a formação da nuvem de pontos os programas localizam pontos de correlação entre as cenas para ser utilizados como pontos de ligação na fototriangulação, também chamados de pontos de enlace, o produto gerado nesse processo pelos *softwares* é denominado de nuvem de pontos esparsa (Figura 12). De acordo com os parâmetros de orientação interior das imagens esses pontos são processados no mesmo referencial e desta forma o aglomerado forma uma nuvem de pontos em três dimensões a fim de reconstruir o modelo tridimensional. A posição X, Y, Z e as informações de cor são armazenadas para cada ponto da nuvem possibilitando reconhecimento e a realização de medidas diretamente no modelo digital gerado pela nuvem, sejam elas de distâncias, áreas ou volumes.

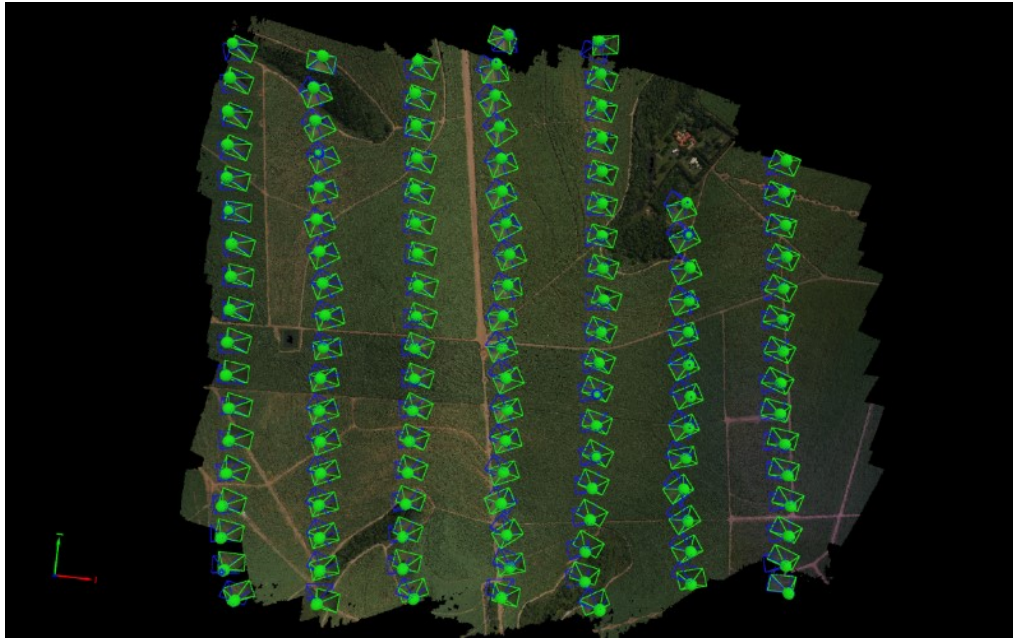
Figura 12 – Nuvem de pontos esparsa.



Fonte: O autor.

O processo seguinte consiste em uma nova fototriangulação com base nos pontos de enlace. Nessa etapa é gerada a Nuvem de Pontos Densificada, onde mais pontos de enlace são criados, preenchendo e dando maior qualidade e realismo na representação do terreno. Para exemplificar a nuvem está representada após a sua densificação na Figura 13.

Figura 13 – Nuvem densa de pontos.



Fonte: O autor.

5.3.2.3 Ortofoto

Anteriormente ao processo de criação da Ortofoto é gerada a malha triangular do terreno. Essa é a última etapa no processamento e para sua realização é utilizada a nuvem de pontos gerada no processo de fototriangulação. Essa malha funciona como uma forma de organizar os pontos de maneira a permitir a construção dos modelos digitais.

O processo utilizado para produção a ortofoto é também feita de forma automática pelos *softwares* Pix4D e PhotoScan. As fotos são corrigidas de todas as deformações decorrentes da projeção da câmera e das variações do relevo, trazendo tudo para uma mesma escala. Então, utilizando da malha gerada e os consequentes modelos digitais a ortofoto gerada está representada com propriedade para tomada de medidas e vetorização com precisão de acordo com a Figura 14.

Figura 14 - Ortoimagem.



Fonte: O autor.

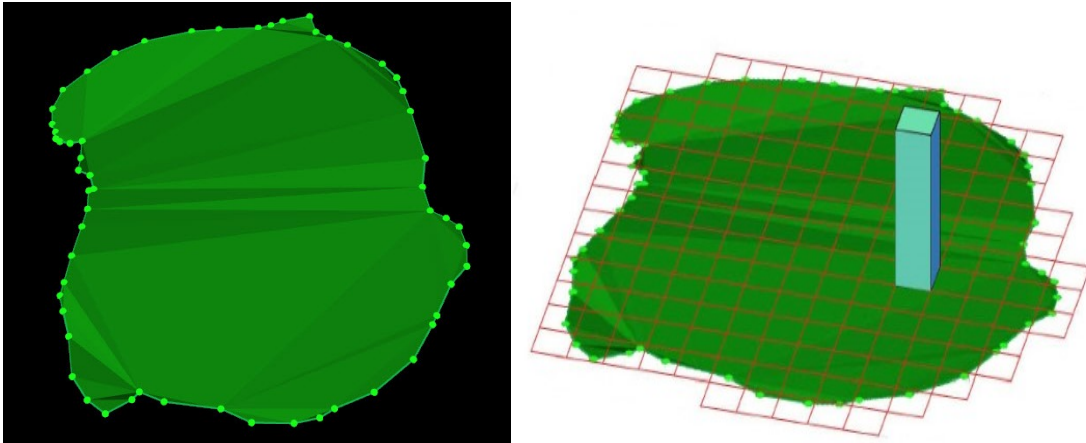
5.3.2.4 Cálculo de volume

Para o cálculo volumétrico e possível estimativa da área plantada em toneladas, ou em toneladas por hectare, foram utilizados dois meios distintos, um utilizando os *softwares* Pix4D e PhotoScan e o outro utilizando os dados de área vindos da classificação gerada pelo SisCob juntamente com os dados de altura das plantas colhidas em campo com suas devidas medidas tomadas por trena.

Para o cálculo por meio dos *softwares* fotogramétricos, Pix4D e PhotoScan, primeiramente é necessário que sejam realizadas as etapas para gerar a nuvem de pontos e o MDS. Tendo esses passos realizados a próxima etapa consiste na identificação das áreas onde se deseja fazer as estimativas e traçar um polígono limítrofe. Esse polígono é que define a base de cálculos para volume sendo que acima dele tudo será considerado volume de corte.

A base é criada se levando em consideração a altitude de cada vértice da limitação (Figura 15), e a partir dela é projetada uma grade quadriculada com espaçamentos do GSD alcançado no processamento. Sendo assim, uma maior densificação de pontos na limitação das bordas repercute em uma maior representação do terro abaixo da cana.

Figura 15 – Delimitação para o cálculo de volume.



Fonte: Pix4D.

O cálculo do volume é feito então considerando cada uma das partes individuais da divisão. É realizada a multiplicação entre a largura, comprimento e altura da célula, sendo que para o comprimento e largura são considerados o valor do GSD do projeto, e a altura como sendo a diferença entre a altitude do terreno, em cada célula, e a altitude base da célula correspondente. Os *softwares* calculam dois volumes distintos ainda, um considerando o terreno mais alto que a base (utilizado para o volume da cana-de-açúcar) e ou onde o terreno está abaixo da base. Para esse último volume é considerando então um preenchimento de valor negativo. O volume total então para uma área é resultado da soma desses dois volumes.

Uma funcionalidade a mais para o *software* Pix4D é que o mesmo assume erros em estimativas volumétricas. Para isso, o cálculo dos erros envolvidos na estimativa é feito da mesma forma como é feito o cálculo de volumes, célula a célula. Para isso, é considerado que a altitude (Z) de um ponto 3D é calculada com uma precisão de 1 a 3 vezes o GSD adotado para o projeto, desta forma o cálculo do erro em cada uma das células é calculado da seguinte forma:

$$E_i = L_i * W_i * Z_{ei} = \text{GSD} * \text{GSD} * 1,5 * \text{GSD} = 1,5 * \text{GSD}^3 \quad (3)$$

Onde:

E_i = erro do volume de uma célula.

L_i = comprimento da célula.

W_i = largura da célula.

Z_{ei} = erro na direção Z da célula.

5.3.2 Comparação dos cálculos dos volumes

Partindo dos resultados encontrados no processamento das imagens e dos valores encontrados para os volumes, foi estabelecida uma análise da variação dos resultados encontrados. Para isso foi considerado como verdade de campo os dados aproximados de colheita cedidos pelos proprietários e as estimativas feitas através dos métodos propostos. Foram feitos os cálculos então do erro absoluto, que é em módulo o valor de colheita real subtraído do valor encontrado ou aproximado, e do erro relativo percentual, conforme a fórmula 8 a seguir.

$$Er = \frac{(|Ve-Va|)}{Ve} * 100 \quad (4)$$

Onde:

- *Er* é o erro relativo em porcentual;
- *Ve* é o valor exato (topográfico);
- *Va* é o valor aproximado (fotogramétrico).

6 RESULTADOS OBTIDOS

Este trabalho teve o intuito de analisar a viabilidade de um produto fotogramétrico de baixo custo para a quantificação volumétrica da cana-de-açúcar. Os produtos gerados buscam auxiliar o agricultor, seja ele de pequeno ou grande porte, assim como as instituições financiadoras da produção que necessitam de instrumentos que tragam maior segurança nas estimativas.

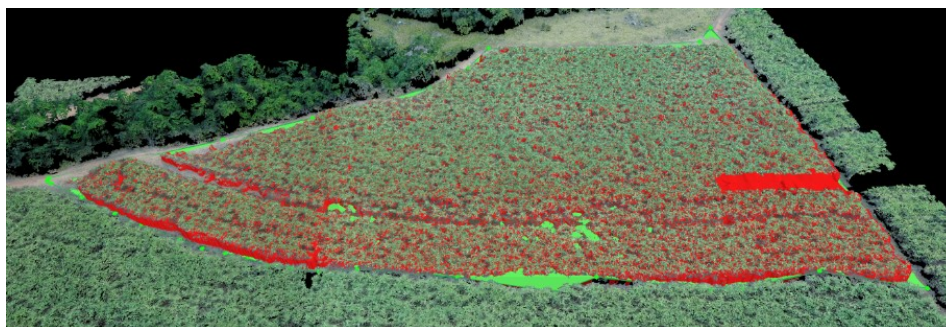
Para isso, foram feitos levantamentos e após as suas execuções, e posterior tratamento dos dados coletados, foi possível chegar a alguns valores para volume a fim de serem comparados com a verdade de campo, que são os próprios dados de colheita das áreas de estudo em questão.

Objetivando uma maior organização dos resultados, para cada uma das diferentes áreas foi considerado casos diferentes. Isso porque as condições dos levantamentos fotogramétricos não foram os mesmos, assim como a disposição de dados complementares, que é o caso da fazenda Tombamento que não contou com a coleta de dados “*in situ*” impossibilitando aferir uma verdade de campo quando a variável morfológica altura.

6.1 Fazenda Sonho Azul

No caso da Fazenda Sonho Azul, após gerado o Modelo Digital de Superfície, foram realizados os cálculos volumétricos em uma área reduzida para melhor análise dos resultados e dificuldades desse tipo de estimativa. A seguir estão representadas as imagens da delimitação da base para os cálculos e em seguida o valor de volume encontrado considerando os pontos acima da base de referência (de maior altitude) as próprias alturas das plantas e consequentemente volumes de corte.

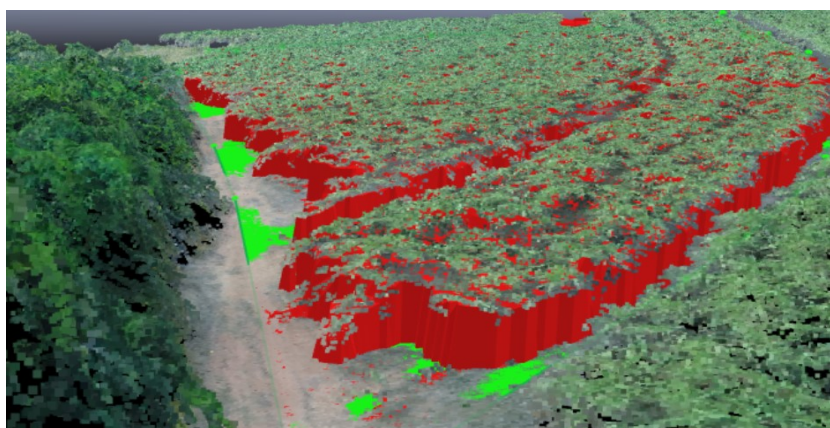
Figura 16 – Área escolhida para cálculos de área e volume.



Fonte: O autor.

Em uma visão mais aproximada é possível notar a diferença de altitude entre o nível de base (pintado na cor verde), e as diferentes altitudes representadas (na cor vermelha), partindo do nível de base até os pixels acima do próprio.

Figura 17 – Altura das plantas na vista para o cálculo de volume.

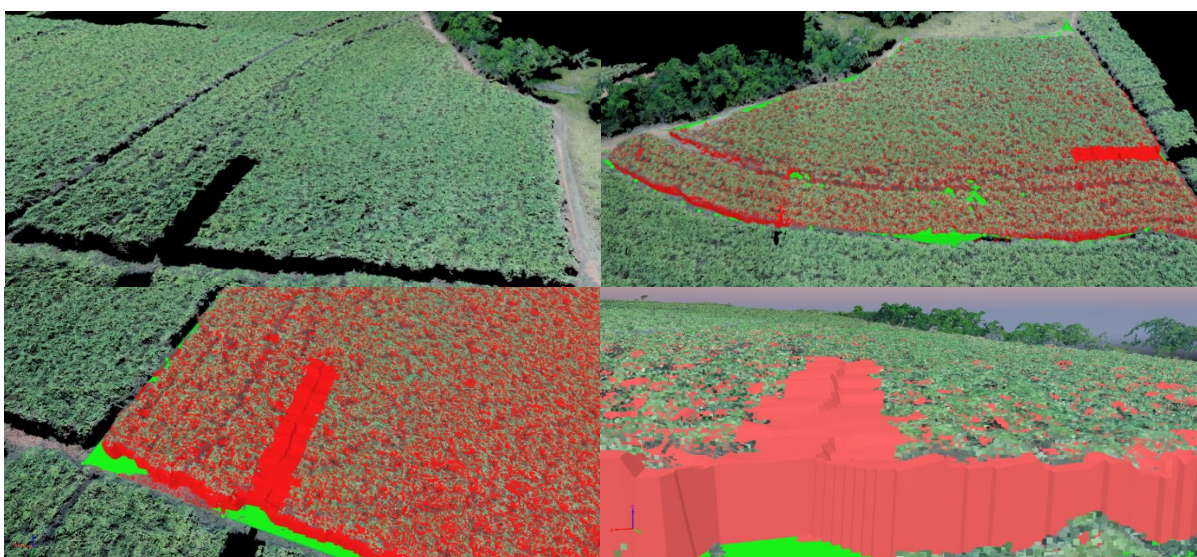


Fonte: O autor.

Para tal área, foi utilizado o software Pix4D pois este apresentou melhores resultados se comparado ao processamento no PhotoScan, que não realizou a delimitação de nenhum talhão bem definido por inteiro. Isso aconteceu devido à perda de informações na passagem das imagens sendo que, muitas estavam em falta, tornando muito dificultoso o processo de se fazer a fototriangulação sem a ideal sobreposição. O processo computacional do Pix4D então conseguiu gerar um talhão bem delimitado dimensionado em 1,96 há, onde foram feitas as análises e posterior cálculo de volumes.

Alguns problemas foram observados na representação desta área, entre eles a perda de informação formando alguns “buracos” como apresentado de vários ângulos na Figura 18. Porém, para esse específico caso, não houve influência significativa no cálculo do volume, já que, aplicando o zoom na região é possível observar que para tal área foram consideradas as médias das alturas, modelando uma continuidade para a área com falta de informações.

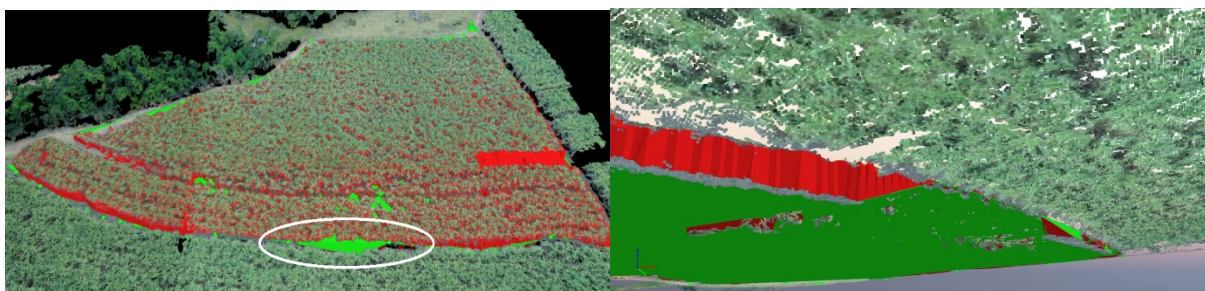
Figura 18 – Falha gerada em processo computacional (Pix4D).



Fonte: O autor.

O cálculo de volume ainda sofreu influência por defeitos estendidos ao modelo digital de superfície gerado. Algumas áreas de característica de solo e conseqüentemente base para cálculos, tivera suas alturas estabelecidas na cota superior da cultura. A confusão gerada na nuvem de pontos pode ter sido conseqüência da falta de redundância entre imagens, diminuindo a densificação de pontos e por conseqüência pior quantificação das medidas e estimativa da posição dos pixels. Uma medida para melhorar a precisão no cálculo de volumes é aumentando a sobreposição entre as fotos, diminuindo a altitude de voo o que por conseqüência aumentaria a resolução espacial e uma maior densificação de pontos para melhor alcance dos resultados.

Figura 19 – Falhas geradas no processo computacional (Pix4D).



Fonte: O autor.

Como mostrado na Figura 20, mesmo acontecendo uma classificação incorreta na representação da altitude dos pontos de terreno coletados por imagem, foi possível a realização do cálculo do volume para o talhão, alcançando os seguintes resultados:

Figura 20 – Resultados do cálculo de área e volume Pix4D.

Volume 1	
Terrain 3D Area:	19623.05 m ²
Cut Volume:	36648.57 ± 717.75 m ³
Fill Volume:	-251.33 ± 44.66 m ³
Total Volume:	36397.24 ± 762.41 m ³

Fonte: O autor.

A posse desse resultado e dos dados de altura das plantas, é possível se chegar a valores aproximados de toneladas produzidas em uma área. Esse cálculo é realizado se considerando as médias produtivas em variedades diferentes de cana de açúcar, sendo que o ideal mesmo seria a identificação correta da variedade e as condições de seu desenvolvimento, se o mesmo foi feito a contar ou não por irrigação. Essas são informações importantes já que segundo Barbosa (2005) observa-se que o peso associado as diversas variedades apresenta em média 30% de diferença entre um experimento irrigado para um que não tem irrigação.

Nas devidas situações os cálculos realizados terão como base o valor médio entre as cinco variedades utilizadas no estudo assim como nas condições de cultivo, sem avaliar se a área possui irrigação ou não, usando-se assim sempre os valores médio de produtividade. Porém, quanto mais se souber da cultura melhor será e mais realista serão os resultados da estimativa. Logo em seguida é mostrada a tabela com dados de produtividade de cinco

variedades de cana-de-açúcar relacionada diretamente à suas condições de cultivo.

Tabela 3 - Produtividade total (t/ha), de cinco variedades de cana-de-açúcar cultivado em sistema irrigado e sequeiro, avaliado no estágio de colheita.

Experimentos	Variedades					Média
	SP791011	Java	RB765418	RB72454	SP801842	
Irrigado	213,17	151,78	213,27	191,20	218,41	197,57
Sequeiro	122,98	120,96	153,46	157,31	134,47	137,84
Média	168,08	136,37	183,36	174,25	176,44	167,71

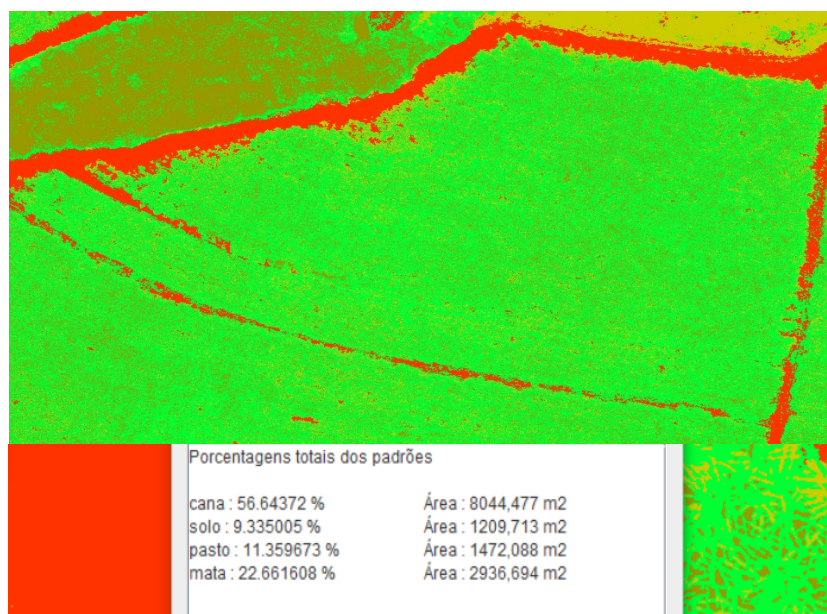
Fonte: Adaptado de Barbosa (2005).

Com base nos valores encontrados de produtividade entre cinco variedades diferentes é possível chegar que em uma média de 16,771 kg de cana de açúcar produzidos por metro quadrado. Porém, podemos entender que em um metro quadrado de cana-de-açúcar cultivada encontramos valores de volumes variados conforme a altura da plantação. No levantamento dos dados *in situ* da fazenda Sonho Azul foi encontrado uma média de 2,23 m de altura de cana cultivada dentro do talhão de estudo, sendo que para isso foram colhidas 10 amostras de altura com trena. Seguindo o raciocínio, chegamos que para cada metro cúbico de plantação encontraríamos o valor de 7,52 quilogramas por metro cúbico. Com o total de volume encontrado no cálculo fotogramétrico chegamos então ao valor de 273,73 de tonelada produzidas em toda a área de 1,96 ha, o que dá uma média produtiva de 139,66 t/ha.

Essa é uma média um tanto quanto alta se comparada a verdade de campo que em média apresentou no ano uma produção média de 90 t/ há. O erro absoluto encontrado nessa estimativa chega então à 49,66 t/ha e o relativo de 55,18% do real, o que por si só desqualifica essa metodologia para a aplicação na cultura. A visão desses valores pode ser interpretada de várias perspectivas diferentes, sendo que a maioria das variáveis utilizadas para realização desse estudo não foram isoladas, e o levantamento apresentou algumas complicações com a perda de dados, impossibilitando se chegar a um produto de elevada qualidade devido a uma fototriangulação com pouco recobrimento.

Com o intuito de analisar e comparar o cálculo de volume por meio da classificação da cobertura do solos, o estudo considerou também para essa área a classificação feita pelo *software* SisCob. O produto foi gerado e como resultado encontramos a representação demonstrada na Figura 21 a seguir.

Figura 21 – Classificação gerada pelo Siscob.



Fonte: O autor.

Tendo a mesma base de cálculos, a média dos valores de produção utilizados para comparação do método fotogramétrico, na utilização do SisCob foram encontrados valores distintos. A classificação dividida em cana, solo, pasto e mata estimou que aproximadamente 56,64% da imagem era composta de cana-de-açúcar, resultando em 0,804 ha que a uma altura média de cultivo de 2,23 metros resulta em 17939,18 m³ de plantação. Considerando que para a média de produção da cana-de-açúcar é de 7,52 kg/m³, temos 134902,66 kg totais de toda a área se resumindo à 167,7 t/ha já que agora a área utilizada é de 0,8044 há, área de plantação encontrada na classificação. O erro absoluto encontrado para tal área agora representa 77,70 toneladas e o erro relativo de 86,34%.

O valor exagerado dos erros apenas salienta a necessidade de se ter controle dos parâmetros de cada localidade, já que cada área apresenta uma composição de terras com maiores ou menores condições para cultivo. No estudo para efeito de comparação foi utilizado um cenário ideal onde se tem a média de 167,71 entre a produção com e sem irrigação o que já representa quase o dobro da realidade da área que colhe em média 90 t/ha. Por mais precisos que sejam os métodos de quantificação, pouco se aproximará de um erro mínimo com uma realidade tão diferente da encontrada na Fazenda Sonho Azul. Vale ressaltar que para isso é necessário se levantar os parâmetro e controles já feitos pelo agricultor a se chegar em estimativas que valorizem realmente de forma fiel a precisão que os aparelhos cartográficos oferecem.

6.2 Fazenda Tombamento (Área 01)

Para a segunda área de estudo localizada dentro das divisões do município de São Carlos-SP, o processamento foi realizado nos *softwares* Pix4D, PhotoScan e SisCob. A qualidade entre o processamento nos programas Pix4D e PhotoScan foram elevadas e com poucas diferenças, por isso, os mesmos foram utilizados para comparação nos cálculos volumétricos.

O cálculo de toneladas por hectare nessa região foi realizado utilizando dados aproximados de altura das culturas, encontrado em literatura, já que nesta área não foi feito o levantamento dos dados *in situ*.

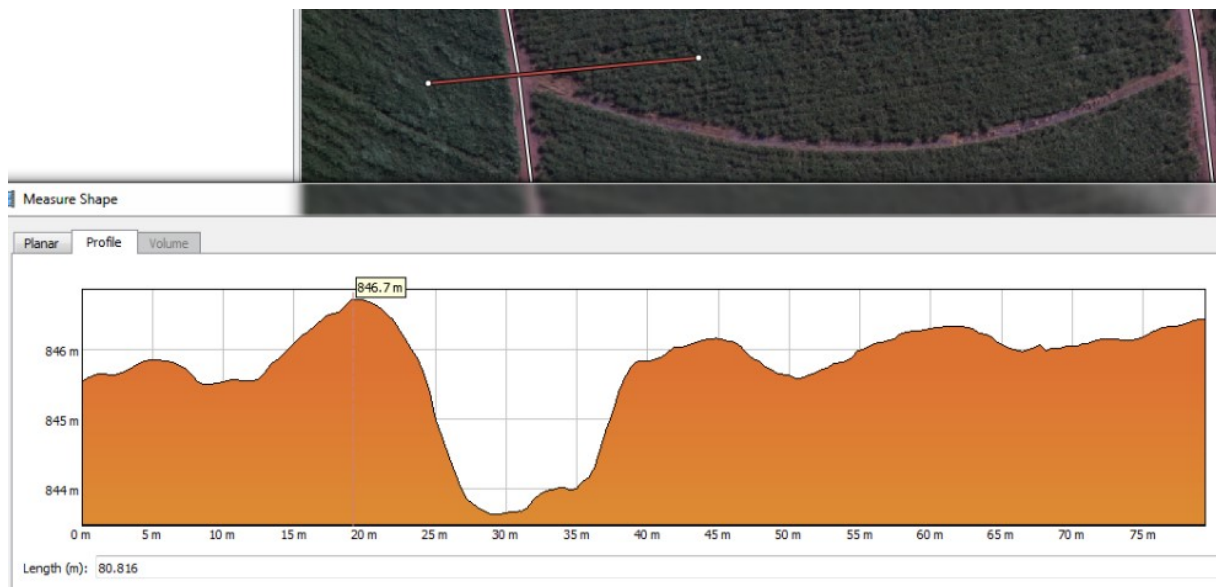
Tabela 4 - Altura em metros de cinco variedades de cana-de-açúcar cultivado em sistema irrigado e sequeiro, avaliado no estágio de colheita.

Experimentos	Variedades					Média
	SP791011	Java	RB765418	RB72454	SP801842	
Irrigado	4,12	4,03	4,60	4,24	4,09	4,11
Sequeiro	4,18	4,32	4,55	4,39	4,46	4,38
Média	4,15	4,18	4,58	4,32	4,28	4,25

Fonte: Adaptado de Barbosa (2005).

Para tal procedimento é considerado que as alturas são coerentes já que por meio de processo computacional chegou a estimativa de altura de plantas de 3 metros de altura em estágio de maturação, como é mostrado na Figura 22, podendo sim chegar a média dos 4,25 m.

Figura 22 – Altura em perfil de plantas pelo *software* PhotoScan.



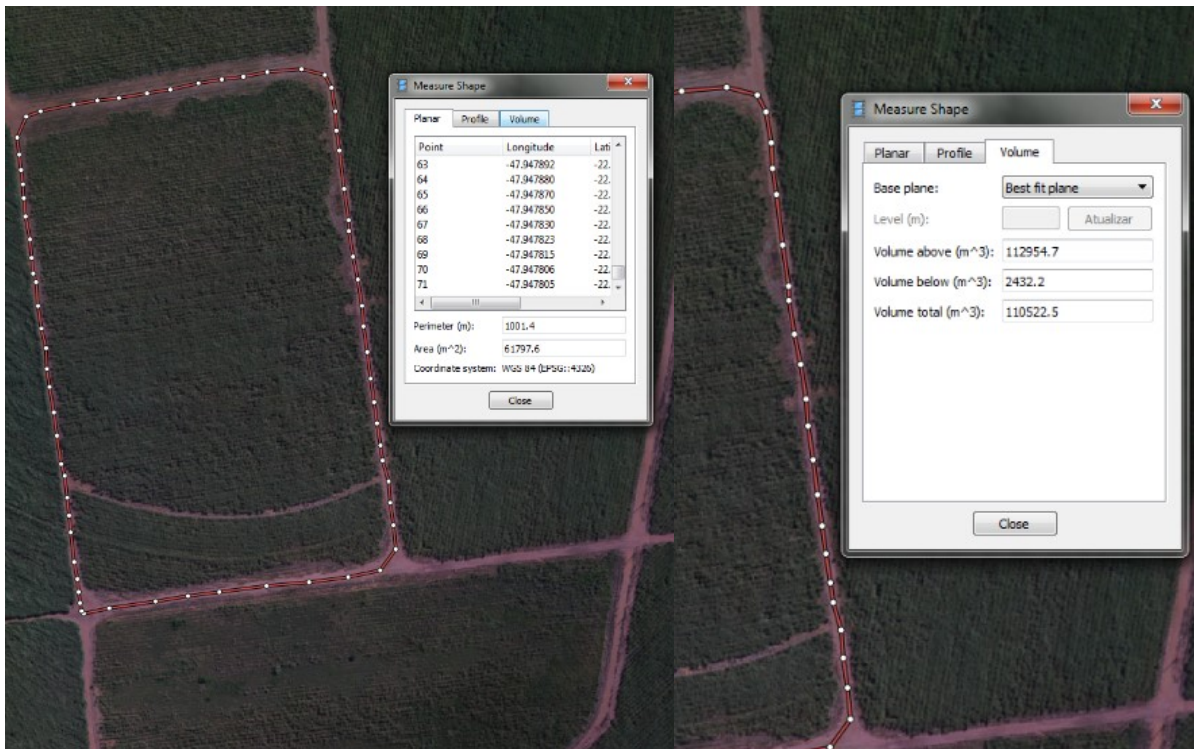
Fonte: O autor.

Após gerado o MDS os cálculos se sucederam em duas áreas distintas e bem definidas, a fim de realizar a delimitação e gerar um nível de base aproximado do MDT real. Como a qualidade do processamento foi elevada em função de uma boa fototriangulação sem perda de dados o adensamento da nuvem de pontos foi elevado, não sendo observados quaisquer irregularidades. Desta forma, partiu-se para o cálculo dos volumes.

A primeira etapa consistiu a delimitação das áreas limítrofes a fim de definir o nível de base para cálculos, sendo que cada um dos vértices representa um dado a mais no cálculo do MDT gerado. Para uma boa representatividade do terreno foi fixado a utilização de no mínimo 10 pontos a cada hectare de área. Sendo assim, a primeira área teve sua delimitação em 70 pontos, por apresentar mais de 6 ha e a segunda por 110 pontos, se tratando de uma área pouco acima de 10 ha. A definição da quantidade de pontos se deu de maneira arbitrária já que apenas a delimitação dos vértices principais já gerava mais que o dobro de diferença entre os cálculos realizados.

Os dados a seguir então representam o cálculo de volume pelos dois *softwares*, primeiramente o PhotoScan (Figura 23).

Figura 23 – Cálculo de área e volume pelo PhotoScan.



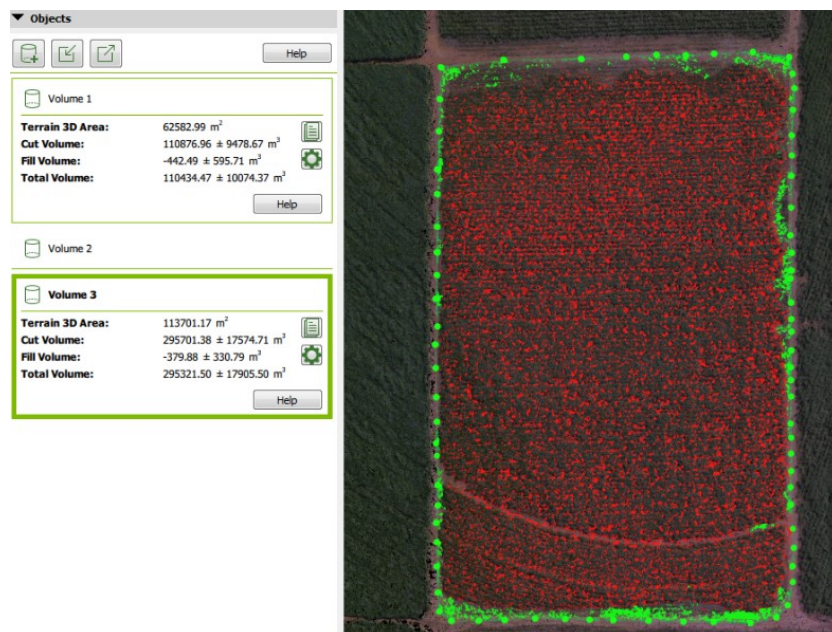
Fonte: O autor.

Com base nos dados utilizados para a conversão do volume em metros cúbicos para toneladas, será considerada outra vez a média de 167,71 t/ha, ou 16,771 kg/m², a lembrar que essa é uma média de valores colhidos entre 5 variedades diferentes, de irrigado ou não irrigado e em situação de pré colheita. Como entendemos que cada metro quadrado apresenta valores variados de volume conforme a altura da cana, e que para tal levantamento não foi realizada tomadas de medidas em campo será considerada a média encontrada na tabelas das 5 variedades, por isso 4,25m em média. Com posse desses valores sabemos que a cada metro cúbico encontramos 3,95 kg/m³ que multiplicados à quantidade de metros cúbicos totais resulta em 436,135 t na área total e 43,613 t/ha.

Considerando que informação de campo apontam uma produção de 85t/ha essa área apresentou então um erro absoluto de 41,39 toneladas e um relativo de 48,69% que representa a quantidade que ainda falta para a maturação e colheita dessa área já que como ideal foi considerada uma altura das plantas em média de 4,25 m e o estágio de desenvolvimento diz que esta ainda está medindo por volta de 3 metros de altura, uma diferença de 1,25 metros.

Com processamentos no *software* Pix4D foram alcançados resultados próximos onde com a mesma quantidade de pontos limitrofes se alcançou uma área de 6,258299 ha e um volume total de 110434,47 m³ e um erro de 10074,37 m³ como ilustrado na Figura 24 a seguir.

Figura 24 – Cálculo de área de volume pelo Pix4D.

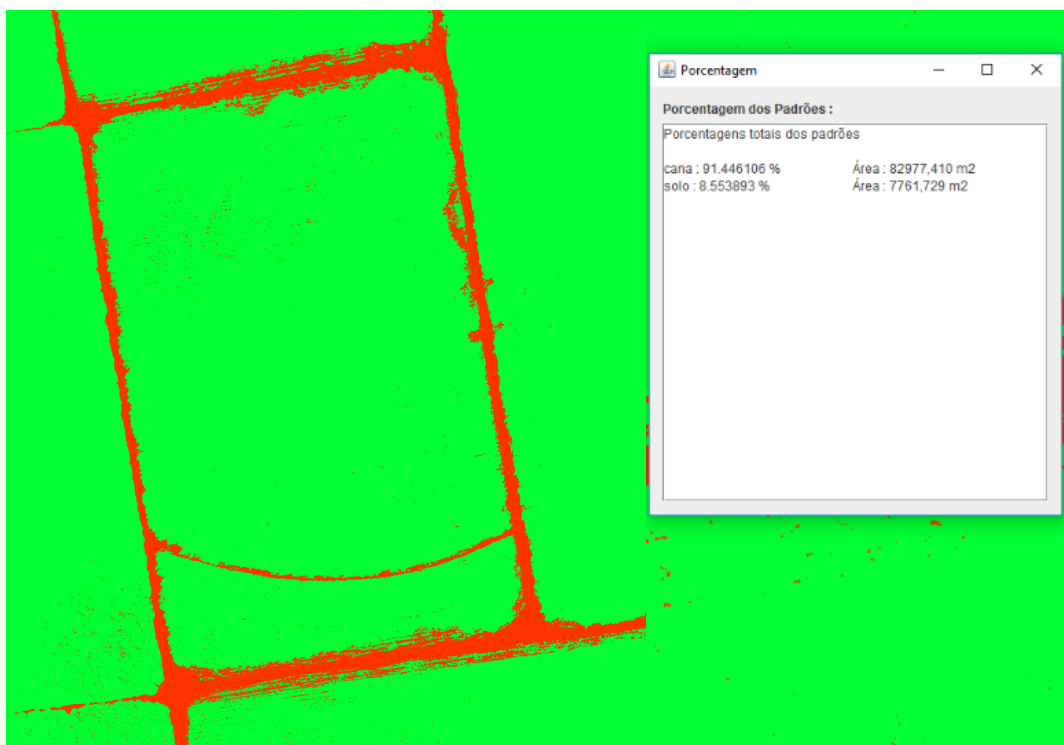


Fonte: O autor.

Como na primeira área, o processamento também foi realizado no programa da Embrapa

o SisCob. O produto gerado e os correspondentes resultados da classificação estão representados na Figura 25 a seguir:

Figura 25 – Classificação gerada pelo SisCob.



Fonte: O autor.

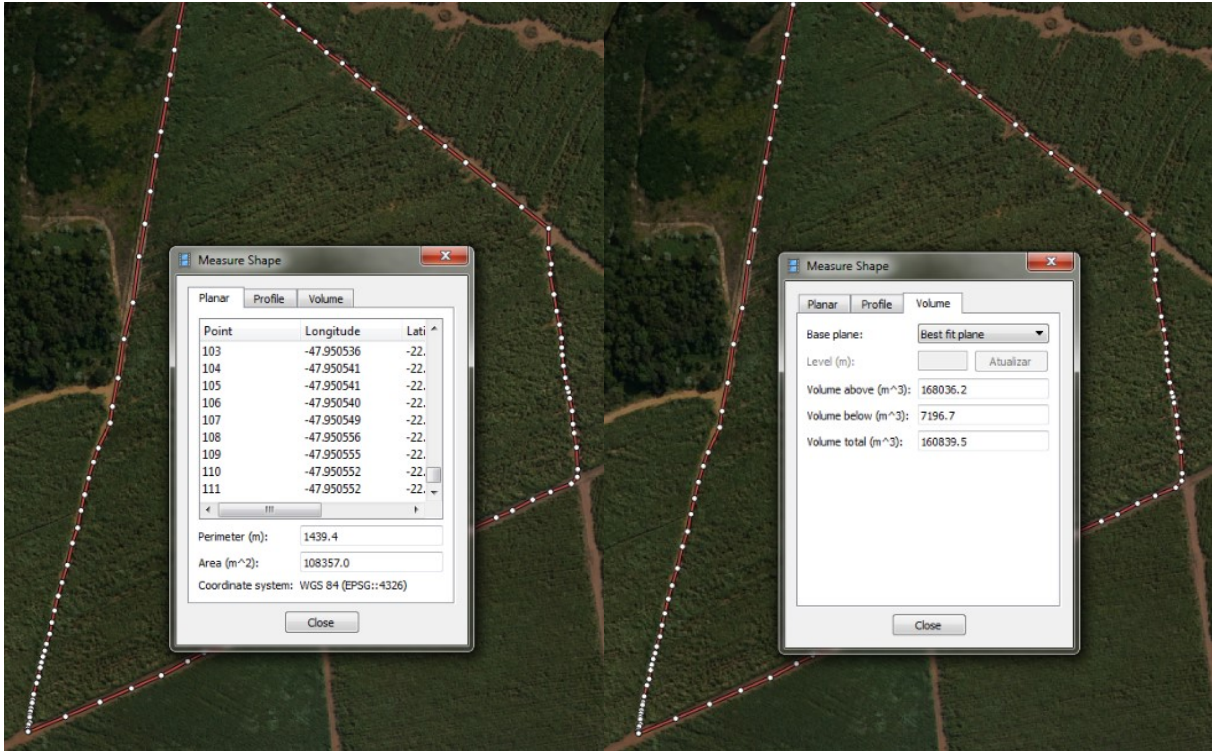
A classificação desta vez foi feita apenas em duas classes, cana e solo, já que a área plantada não assume nenhuma outra variável, nem área com presença de pastagem entre os talhões, tão pouco de reserva. A classificação considerou uma porcentagem de 91,45% de cana, resultando em uma área de 8,3 ha que a uma altura média de cultivo de 4,25 metros resulta em 352653,99 m³ de plantação. Considerando que a média de produção da cana-de-açúcar em um metro cúbico é de 3,95 kg, temos 1392983,27 kg totais de toda a área se resumindo à 167,87t/ha considerando a área de 8,2977 ha. O erro absoluto encontrado para tal área agora representa 82,87 toneladas e o erro relativo de 97,5%.

6.3 Fazenda Tombamento (Área 02)

A segunda área utilizada para testes, também localizada na Fazenda Tombamento, consistiu em uma região um pouco maior de aproximadamente 10,84 ha, sendo assim, foi definido uma quantidade de 110 pontos para delimitação da área a fim de representar bem a

base de cálculos. O cálculo da área e volume estão dispostos a seguir:

Figura 26 – Cálculo de área e volume pelo PhotoScan.

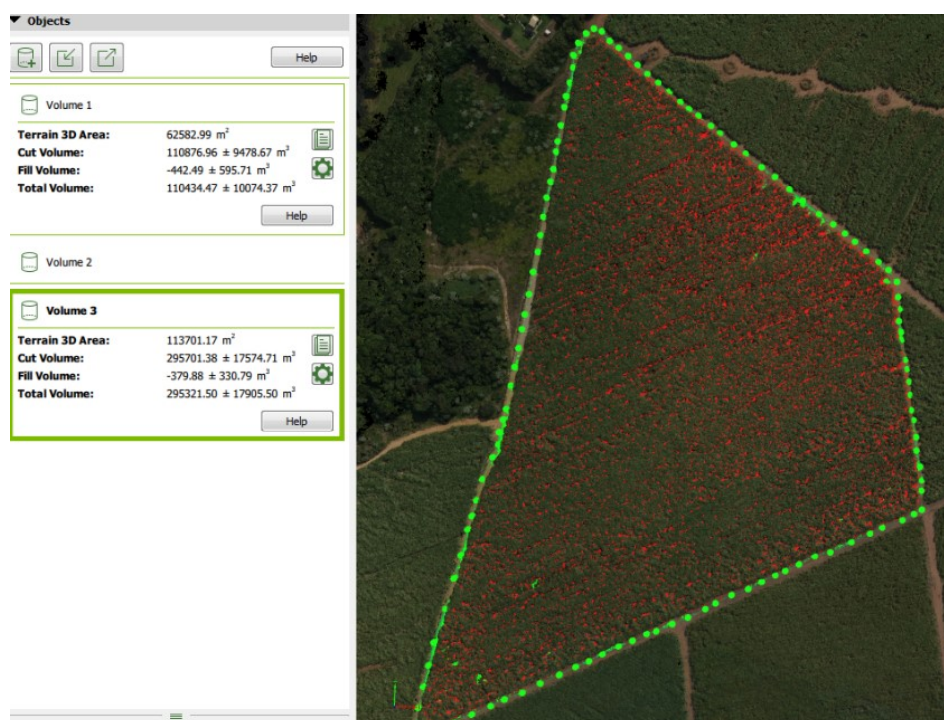


Fonte: O autor.

Tendo base que a média é de 16,771 kg/ e que 4,25m é a altura ideal média de cinco variedades diferentes de cana temos que a cada metro cúbico encontramos 3,95 kg/m³ que replicado à quantidade total de metros cúbicos obtemos o valor de 635,316 t na área total e 58,63 t/ha.

Considerando que informações de campo apontam uma produção de 85t/ha essa área apresentou então um erro absoluto de 26,37 toneladas e um erro relativo de 31,02%. Na apresentação desses resultados fica evidente que a cana está em um estágio acima de maturação pois se encontra mais perto de chegar à um erro absoluto e por consequencia relativo tendendo a zero. Quando essa taxa chegar a zero quer dizer que ela chegou na época de colheita e que a variedade realmente chega à altura média estipulada para efeito de cálculos e comparação.

Figura 27 – Cálculo de área e volume pelo Pix4D.



Fonte: O autor

Apesar dos levantamentos na primeira área da fazenda Tombamento apresentarem baixíssima diferença entre volumes calculados, apenas 88 m³, no levantamento da segunda área notou-se uma diferença muito grande, de 134482,5 m³.

Se esta for a estimativa que mais se aproxima ao resultado teríamos assim um volume total de 1166,52 toneladas e por consequência 102,59 t/ha. O erro absoluto de 17,59 toneladas e o relativo de 20,7% aumento em mais de 10% para a mesma área calculada no *software* PhotoScan. Para a investigação desse fato é necessário confrontar os resultados com dados de levantamento campo que aponte qual deles pode ter feito estimativas equivocadas ou menos precisas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade da determinação e controle da produção vem se tornando cada vez mais indispensável. Desta forma, os produtos de maior relevância para a economia nacional, assim como a cana-de-açúcar, a muito que busca aprimorar as técnicas e cuidados com seu desenvolvimento. Esse fato ainda se intensifica por esta matéria prima desempenhar papel importantíssimo e estar diretamente ligado às usinas e destilarias sucroalcooleiras. Porém, os

levantamentos ainda se caracterizam por um alto nível de subjetividade, causando insegurança tanto ao agricultor como também a aqueles que depende do produto.

A aplicação dos RPAs para esta finalidade assim como no monitoramento ao longo das safras vem se desenvolvendo a larga escala, além do que para a aplicação dessa tecnologia é necessário desprender de poucos recursos para alcançar uma boa eficiência, principalmente em aplicações no campo. Os métodos utilizados para a aplicação nesse projeto se mostraram promissores, afirmando a hipótese de quantificação do volume produzido por meio desses veículos. Porém, há a necessidade de se conhecer mais sobre os parâmetros morfológicos da planta associada a área, suas peculiaridades, o seu desenvolvimento, clima em que está inserida, sua variedade, dentre tantos fatores que entram no cálculo após todo o processo de mapeamento e quantificação por meio do *software*.

O resultado se mostrou satisfatório visto que, aplicadas as características corretas de altura de plantas e quantidade produzida por área, chega-se a erros relativos de 20% dos resultados colhidos em campo, levando em consideração que a aplicação contou com talhões ainda não completamente desenvolvidos e que a variedade não foi inserida com precisão induzindo a chegada de resultados porcentagens altas.

O método ainda otimiza quantificação real de plantas pela detecção e exclusão de falhas, fomentando o desenvolvimento de aplicações de baixo custo principalmente por intermédio da iniciativa de organização como a Embrapa pela disponibilização de *softwares* como o SisCob, dada a atenção necessária para a quantidade de amostras a serem coletadas. Outras alternativas similares ainda podem ser consideradas explorando as respostas dadas pelo vegetal ao mapeamento associando a câmaras que captam além da banda do visível, passível de geral uma classificação automática.

Finalmente, este estudo visa contribuir para a cultura do monitoramento no Brasil, especialmente pelo avanço e popularização dos RPAs como plataformas imageadoras assumindo a sua associação com câmaras não métricas de baixo custo. A aplicação serve como uma forma para prever a época certa de colheita, visto que, até que o erro absoluto, e por consequência o relativo, não se aproxime efetivamente de zero a plantação não estará preparada para a colheita, deixando de se explorar o seu máximo potencial.

REFERÊNCIAS

- BENDIG, J.; WILLKOMM, M.; TILLY, N.; GNYP, M. L.; BENNERTZ, S.; QIANG, C.; MIAO, Y.; BARETH, G. **Very high resolution crop surface models (CSMs) from UAV-based stereo images for rice growth monitoring In Northeast China**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XL, n. p. 4–6, 2013.
- BARBOSA, Edilene Alves. **Avaliação fitotécnica de cinco variedades de cana-de-açúcar para o município de Salinas-MG**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.
- BATISTA, Getulio Teixeira; DIAS, Nelson Wellausen. **Introdução ao sensoriamento remoto e processamento de imagens**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 04-02, 2005.
- BENVENUTI, Fernando Aparecido et al. **Relação de índices espectrais de vegetação com a produtividade da cana-de-açúcar e atributos edáficos**. 2005.
- BRYNS, Leonardo Monteiro. **Página dinâmica para aprendizado do sensoriamento remoto**. 2008.
- COELHO, Luiz; BRITO, Jorge Nunes. **Fotogrametria digital**. EdUERJ, 2007.
- CANASAT. **Mapeamento da cana via imagens de satélite e observação da Terra**. <<http://150.163.3.3/canasat/intro.php>>. (acesso em 01 junho 2018).
- CARVALHO, Glauco Rodrigues; OLIVEIRA, C. de. **O setor sucroalcooleiro em perspectiva**. Embrapa Monitoramento por Satélite-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2006
- CONAB. **Geotecnologia**. Disponível em:<<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=533&t=1>> (acesso em 01 junho 2018)
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Primeiro Levantamento - Safra 2017/2018**, 2017.
- CRUZ, C. B. M.; Barros, R. S.; Cardoso, F. V.; Reis, F. B.; Rosário, L. S.; Barbosa, S. S.; Rabaco, L. M. L.; Lourenço, J. S. Q. **Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba: INPE 2011. p. 5463, 2011.
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. Yield response to water – **Irrigation and Drainage Paper 33**. Rome: FAO, 172p, 1979.
- ESQUERDO, J. C. D. M. **Utilização de perfis multi-temporais do NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no oeste do Paraná**. Campinas, SP. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas. 2007.

FERNANDES, Jeferson Lobato et al. **Monitoramento da cultura de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo por meio de imagens SPOT Vegetation e dados meteorológicos.** 2009.

Figueira, S. R. **Os programas de álcool como combustíveis nos EUA, no Japão e na União Européia e as possibilidades de exportação do Brasil.** 2005. 245 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005. Disponível na biblioteca digital de teses e dissertações da USP: <<http://www.teses.usp.br/>>. Acesso em mar/2006.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélites para estudos ambientais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations.** 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/home/en/>>. Acesso em: abr. 2016.

FORTES, Caio. **Discriminação varietal e estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar pelo sensor orbital ETM+/Landsat 7.** 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

FORTES, C.; DEMATTÊ, J. a. M. **Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data.** International Journal of Remote Sensing, v. 27, n. September 2014, p. 1395–1412, 2006.

GARCIA, G. J. **Sensoriamento remoto: princípios e interpretação de imagens.** Editora Nobel, UNESP, Campos de Rio Claro (SP), p. 248-293, 1982.

GOLDEMBERG, José. **Ethanol for a sustainable energy future.** science, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007.

GOLDEMBERG, J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. **Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy.** Energy Policy, v. 69, p. 14–18, jun. 2014.

GÓMEZ-CANDÓN, D.; DE CASTRO, A. I.; LÓPEZ-GRANADOS, F. **Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat.** Precision Agriculture, v. 15, n. 1, p. 44–56, 2014.

GREGO, Célia Regina et al. **Agricultura de precisão em cana-de-açúcar.** Embrapa Monitoramento por Satélite-Capítulo em livro científico (ALICE), 2014.

GRIPP JR, Joel. **Ortorretificação de imagens de alta resolução para aplicação no cadastro técnico rural e mapeamento de área de preservação permanente e reservas legais.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. 2009.

HOLMAN, F. H.; RICHE, A. B.; MICHALSKI, A.; CASTLE, M.; WOOSTER, M. J.; HAWKESFORD, M. J. **High Throughput Field Phenotyping of Wheat Plant Height and Growth Rate in Field Plot Trials Using UAV Based Remote Sensing.** 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisas Agropecuárias. Série Relatórios Metodológicos.** Volume 6, 2 edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

IPPOLITI-RAMILO, Gabriela Alexandra et al. **Sensoriamento remoto orbital como meio auxiliar na previsão de safras**. Agricultura em São Paulo, v. 46, p. 89-101, 1999.

Joaquim, A. C. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara-SP, através de análise de nível de cinza em imagens LANDSAT/TM**. 1998. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

JENSEN, J.R. 1949. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ed por: EPHIPHANIO, J.C.; FORMAGGIO, A.R.; SANTOS, A.R.; RUDORFF, B.F.T.; ALMEIDA, C.M.; GALVÃO, L.S. São José dos Campos/SP: Parêntese, 598p, 2009.

KOFFLER, N.F. **Técnicas de sensoriamento remoto orbital aplicadas ao mapeamento da vegetação e uso da terra**. Geografia, c.17, n.2, p14-17, outubro, 1992.

LIMA, E. M.; THOMAZ, T. A. M.; SEVERO, T. C. **Mapeamento aerofotogramétrico digital utilizando fotografias de médio formato. Monografia (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Instituto de Geociências**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010

LUCCHESI, A.A. **Ecofisiologia de Culturas Extrativas: Cana-de-açúcar, Seringueira; Coqueiro; Dendzeiro e Oliveira**. In: CASTRO, P.R.C. e KLUGE R.A. (Coord). Cana-de-açúcar, STAB, Cosmópolis, p. 13-39, 2001.

MAGALHÃES, A. c. **Análise quantitativa do crescimento**. In: FERRI, M. . (Ed.). Fisiologia Vegetal. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 1985. p. 331–350.

MAGALHÃES, P. S. G.; SANCHES, G. M.; MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; KOLLN, O. T.; DUFT, D. G. **Potential Solution to Contribute for Sugar Cane Spatial Variability Management**. EFITA-WCCA-CIGR Conference “Sustainable Agriculture through ICT Innovation”, Turin, Italy, 2013, p. 24–27, 2013.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar : uma introdução ao procedimento prático**. Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 29 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 168).

MAROTTA, G. S.; CICERELLI, R. E.; FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; ABREU, M. A. De. **AVALIAÇÃO POSICIONAL DE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DERIVADO DE CÂMARA DE PEQUENO FORMATO Positional Evaluation of Digital Super ficial Model Generated by Small Format Camera**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 67/7, p. 1467–1477, 2015.

MARTELLO, Maurício. **Estimativa da altura e produtividade da cana-de-açúcar utilizando imagens obtidas por aeronave remotamente pilotada**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MENEZES R. P; ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília. 2012.

MORAES, Rafael Aldighieri et al. **Monitoramento e estimativa da produção da cultura de cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de dados espectrais e agrometeorológicos**. 2012.

NASA. **Earth Observations and the Role of UAVs**. 2006

NOVO, Evelyn M. L. de Moraes. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2010. 387 p.

PHOTOSCAN. **Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.0**. Agisoft. 2014. Disponível em: http://www.agisoft.ru/pdf/photoscan_pro_1_0_en.pdf

PICOLI, Michelle Cristina Araújo. **Estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar utilizando agregados de redes neurais artificiais: estudo de caso usina Catanduva**. São José dos Campos, 2006.

PIX4D. **Pix4d Training**. Apresentação PPT. 2013a. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/uav.pix4d.com/examples/training/Pix4D+training.pdf>

PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação**. In: **Sensoriamento Remoto – Reflectância dos alvos naturais**. Editora UnB, Embrapa, Brasília (DF), p. 157-199, 2001.

PORTZ, G.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. **Measuring Sugarcane Height in Complement To Biomass Sensor for Nitrogen Management**. n. March 2016, p. 9, 2012a.

REDWEIK, Paula. **Fotogrametria aérea**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa. Pág. v. 3, 2007.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Unesp Botucatu, Instituto de Biociências, Botucatu, 1995.

ROKHMANA, C. A. **The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia**. Procedia Environmental Sciences, v. 24, p. 245–253, 2015.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, 1973. Proceedings... Washington: NASA, 1974, v.1, p.309-317, 1973.

SANTANA, M. S. De; OLIVEIRA, F. J. De; MELO, L. J. O. T. De. **Correlações genéticas em alguns clones RB e em variedades de cana-de-açúcar**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 5, n. 4, p. 460–467, 2010.

SATO, S.S. **Sistema de controle de qualidade dos processos fotogramétricos digitais para produção de dados espaciais**. 2003. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SEGALLA, A. L. **Variedades de cana-de-açúcar**. In: Instituto Agrônômico - Estação Experimental de Piracicaba, 50 anos, PLANALSUCAR, Piracicaba, p. 19-34, 1978.

SCHIMIDT, E.J.; Gers, C.; Narciso, G.; Frost, P. **Remote sensing in the south African Sugar Industry**. In International Society of Sugarcane Technologists Congress, 2001. Brisbane. Proceedings... Brisbane, v. 2, p. 241-246. Disponível em: <http://www.sasa.org.za/sasri/ageng/pub/CG/ISSCT2001.pdf>. Acesso em junho/2018.

SILVA, M. de A.; JERONIMO, E. M.; LÚCIO, A. D. **Perfilamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 43, n. 8, p. 979–986, ago. 2008.

União da Agroindústria Canavieira de São Paulo – UNICA. **Geração descentralizada de emprego e renda**. Disponível em: http://www.unica.com.br/pages/sociedade_mercado1.asp. Acesso em jun/2018

VIANA, C. D. **Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de structure from motion : aplicação em mina a céu aberto** - Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

VICENTE, José R. **Uma aplicação de métodos multivariados na previsão de rendimento do milho**. Agricultura em São Paulo, São Paulo, v.41, t.1, p.125-147, 1994.

WOLF, P.R.; DEWITT, B.A. **Elements of Fotogrammetry: with Application in GIS**. 3rd edition. USA: McGraw-Hill, 2004.

ZANETTI, Juliette et al. **Influência do número e distribuição de pontos de controle em ortofotos geradas a partir de um levantamento por VANT**. 2017.