

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA - FAENG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS - PGRN**

DEIVES GABRIEL BORTOLANZA E SANTOS

**ESTIMATIVA DA BIOMASSA DE PLANTAS DE COBERTURA DO
SOLO USANDO VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)**

CAMPO GRANDE/MS

2019

DEIVES GABRIEL BORTOLANZA E SANTOS

**ESTIMATIVA DA BIOMASSA DE PLANTAS DE COBERTURA DO
SOLO USANDO VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO (VANT)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (PPGRN – UFMS), para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Diovany Doffinger Ramos – UFMS.

Co-orientador: Prof. Dr. José Marcato Junior – FAENG/UFMS.

CAMPO GRANDE – MS

2019

SUMÁRIO

SUMÁRIO	II
AGRADECIMENTOS	III
LISTA DE ABREVIACÕES	IV
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VII
1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO GERAL	11
2.1. Objetivos Específicos	11
3. REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1. Plantas de Cobertura de Solo	14
4. MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1 Local de estudo	16
4.2 Delineamento experimental	17
4.3 Amostragem de biomassa	21
4.4 Procedimento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)	21
4.5 Análise de correlação/regressão	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1. Validação do Modelo	34
6. CONCLUSÕES	39
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

AGRADECIMENTOS

À FUNDECT e CNPq pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da UFMS, pela disposição de materiais e excelentes profissionais que, de alguma forma, apoiaram esta pesquisa.

Ao meu orientador professor Dr. Diovany Doffinger Ramos e co-orientador professor Dr. José Marcato Junior pela disposição de ensinar e orientar.

A todo o pessoal do Laboratório de Geomática – UFMS.

À CEPAER/AGRAER, que através da Dra. Ana Cristina, disponibilizou a área para este estudo.

A todos os familiares e amigos pelo apoio em todos os momentos desta pesquisa.

LISTA DE ABREVIACÕES

AGRAER: Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural.

AP: Altura da Planta.

AP ref.: Altura da Planta de referência.

AP msc.: Altura da Planta do modelo de superfície de cultura.

CEPAER: Centro de Pesquisa e Capacitação da AGRAER.

Ca: calopogônio.

CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

C+G: consórcio (crotalária+guandu).

DAS: Dias Após a Semeadura.

EP: Erro Padrão.

E: estilosante.

FP: feijão de porco.

FUNDECT: Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul.

G: guandu

GNSS: Global Navigation Satellite System.

GCPs: Ground Control Points.

msc.: Modelo de superfície de cultura.

NSE: coeficiente de eficiência modelo Nash-Sutcliffe.

NDVI: índice de vegetação da diferença normalizada.

NRCS: Sigla para Equipe Nacional de Saúde e Sustentabilidade do Solo do departamento de agricultura dos Estados Unidos.

GNDVI: índice de vegetação verde diferenciado e normalizado.

RGB: Vermelho (Red), Verde (Green) e. Azul (Blue).

RMSE: erro médio quadrático.

RTK: Real Time Kinematic.

VANT(s): Veículo(s) Aéreo(s) Não Tripulado(s).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo – CEPAER/ AGRAER. Fonte: Qgis 2.18.13, elaborado por: Autor, 2019.....	16
Figura 2. Croqui do experimento com as parcelas de cada espécie e metragem total do terreno (15 m x 39 m). Ca: Calopogônio; E: Estilozante campo grande; FP: Feijão de Porco; G: Guandu; C+G: Consórcio Crotalária + Guandu. Fonte: Autor, 2018.	17
Figura 3. Sementes quantificadas e separadas em sacos transparentes, prontas para serem semeadas. Fonte: Autor, 2018.....	18
Figura 4. Área do experimento antes da semeadura. Fonte: Autor, 2018.	19
Figura 5. Semeadura em linhas espaçadas por 0,5 m. Fonte: Autor, 2018.	19
Figura 6. (1) Espaçamento entre as linhas de semeadura e área para análises com VANT (cor cinza). (2) Imagem aérea delimitando a distância entre cada parcela. (3) Modelo gráfico de cada parcela e suas medidas. Fonte: Autor, 2018.	20
Figura 7. Avaliação de altura da planta. Fonte: Autor, 2018.	21
Figura 8. (1) Massa verde identificada recém cortada. (2) Massa verde sendo pesada. (3) Amostras na estufa prontas para secagem. Fonte: Autor, 2018.....	21
Figura 9. VANT modelo DJI Phantom 4 Advanced. Fonte: Autor, 2018.....	24
Figura 10. Modelo Digital de Terreno. Fonte: QGIS 2.18.13/ Elaboração: Autor, 2018.	24
Figura 11. (1) e (2) Instalação dos suportes para os GCPs. (3) Posicionamento do receptor GNSS – Global Navigation Satellite System/RTK – Real Time Kinematic para coleta dos pontos de altimetria de cada GCP. Fonte: Autor, 2018.....	25
Figura 12. Sobrevoos aos 21, 42, 63, 84, 105 e 126 DAS. Fonte: Autor, 2018.	25
Figura 13. Gráficos de regressão linear com AP ref. versus AP msc. para todas as espécies estudadas. Para todos os gráficos (n = 96). R^2 = coeficiente de determinação. Fonte: Autor, 2019.....	30
Figura 14. Gráficos de regressão linear e exponencial para AP msc. versus Biomassa fresca. Fonte: Autor, 2019.....	32
Figura 15. Gráficos de regressão linear e exponencial para AP msc. versus Biomassa seca. Fonte: Autor, 2019.....	33

Figura 16. Gráficos de validação para biomassa fresca observada versus biomassa fresca derivada de msc., conforme modelo de regressão da Tabela 04. Fonte: Autor, 2019..... 37

Figura 17. Gráficos de validação para biomassa seca observada versus biomassa seca derivada de msc., conforme modelo de regressão da Tabela 04. Fonte: Autor, 2019.... 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Detalhes das campanhas de voo para a elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT), Modelo Superfície de Cultura (msc.), data da semeadura e das avaliações da biomassa destrutiva (Biomassa) determinada a campo.....	23
Tabela 2. Estatística descritiva da altura da planta do msc (AP msc), altura da planta de referência do solo (AP ref) e biomassa fresca e seca acima do solo para todas as parcelas (n = 24). EP = erro padrão; n = número de amostras.	29
Tabela 3. Coeficiente de determinação (R^2) para altura de plantas (AP) (msc. e ref.) e biomassa fresca (BF) e seca (BS) acima do solo. Para altura de planta (n = 96) e para biomassa fresca e seca (n = 24); lin. = linear, exp. = exponencial.	31
Tabela 4. Características de regressão da biomassa observada versus estimada. n = número de amostra do conjunto de dados de validação; R^2 = coeficiente de determinação; RMSE: erro médio quadrático; NSE: coeficiente de eficiência modelo Nash-Sutcliffe.....	34

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as extensas áreas rurais existentes no planeta, vem passando por constantes mudanças, seja na diversidade de produção, quanto na utilização de recursos tecnológicos favoráveis à praticidade de se qualificar e quantificar a produção. O uso da geotecnologia, como sensores remotos por exemplo, está cada vez mais presente para tais finalidades.

Sabe-se que para se analisar extensas áreas agrícolas, produtores podem levar até dias se o trabalho for realizado no campo físico. Para isso, há a possibilidade de facilitar este processo utilizando Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Os benefícios baseiam-se na economia de tempo, facilidade de identificar problemas e quantificá-los, além de mensurar a produção – processos que facilitam tomadas de decisões no campo.

Inicialmente, a ideia de se construir veículos aéreos não tripulados (VANT) surgiu da necessidade que militares sentiam de se protegerem frente ao cumprimento de suas missões aéreas, o que muitas vezes ofereciam riscos à vida humana. Entretanto, o uso de VANT pode ser destinado a diversas aplicações.

Atualmente, a utilização de VANT se concentra em estudos científicos e de uso civil, apresentando suas vantagens econômicas e técnicas (como maior resolução espacial e baixo custo para se ter acesso às imagens de alta resolução, por exemplo) para diferentes áreas de aplicação.

Em suas diversas aplicações, os VANTs têm servido como ferramentas de acoplagem de sensores remotos para se obter dados da superfície terrestre.

Vale ressaltar que os VANTs não são os únicos meios para se fazer uso de sensores remotos, uma vez que as plataformas orbitais (satélites) ainda são altamente empregadas no que diz a respeito da captação de dados na superfície terrestre. Porém, o VANT possibilita maior detalhamento do objeto de estudo, uma vez que o piloto remoto estabelece com quantos metros se quer sobrevoar a área no momento que lhe for preciso, eliminando os impasses de possíveis eventos naturais, como condições climáticas e presença de nuvens, que possam contribuir para melhor qualidade dos dados.

Diversos estudos foram realizados relacionando características de recursos naturais com as geotecnologias, como por exemplo Gates et al. (1965) que investigaram as propriedades espectrais de plantas e suas evoluções, Hunt Jr. et al. (2010) testaram o sistema de câmera de um VANT sobre dois campos fertilizados de trigo de inverno a fim de encontrar uma correlação entre o índice de área foliar e o índice de vegetação

verde diferenciado e normalizado (GNDVI), já Knippling (1970) que discutiu os aspectos físicos e de base fisiológica para a reflexão do visível e do infravermelho próximo de folhas de diferentes plantas e copas de vegetação, afim de obter informações sobre diferentes culturas agrícolas e florestas.

Buscando aprimorar os estudos voltados a esta temática, neste trabalho priorizou-se utilizar espécies de plantas para cobertura de solo. Denominadas como adubos verdes, estas espécies cumprem o papel de nutrir e preservar o solo de eventos que possam causar prejuízo ao proprietário de uma terra, como eventuais erosões por exemplo.

O uso de culturas de cobertura é considerado uma prática agroecológica aplicada com a finalidade de se reduzir o uso de insumos e fertilizantes químicos e reduzir os riscos de contaminação da água ao diminuir o risco de lixiviação (Scholberg et al. 2010) e conseqüentemente a erosão. Os benefícios ainda se baseiam na liberação de compostos de carbono lábil, o que promove o crescimento microbiano e melhora a estrutura do solo (Shepherd et al., 2002).

A integração de culturas de cobertura na rotação envolve automaticamente a diversificação de culturas (Wezel et al., 2014), isto promove o aumento da atividade biológica do solo e ao se utilizar leguminosas, há o fornecimento de nitrogênio para a próxima atividade agrícola (Birkhofer et al. 2008; Steenwerth e Belina 2008). O uso de leguminosas é considerada uma alternativa sustentável para fixação de nitrogênio facilmente absorvível para outras culturas na rotação devido à sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico (Fustec et al., 2010).

Armezin et al (2005) e Dufour et al (2014) reforçam que as culturas de cobertura leguminosas promovem a fixação do nitrogênio atmosférico e reduzem o uso de energia que a quantidade de nitrogênio fixado está diretamente relacionada à quantidade de matéria seca produzida pela cultura de cobertura. Além de fornecer cobertura do solo, as culturas de cobertura aumentam o conteúdo de matéria orgânica, melhoram a estrutura do solo e ajudam a suprimir as ervas daninhas.

Outros propósitos das culturas de cobertura destacados por Dufour et al (2014) e reconhecidos pelo padrão NRCS (sigla para Equipe Nacional de Saúde e Sustentabilidade do Solo do departamento de agricultura dos Estados Unidos) são: redução da erosão pelo vento e pela água; captura e reciclagem ou redistribuição de nutrientes no perfil do solo; aumento da biodiversidade; gerenciamento da umidade do solo; minimização e redução da compactação do solo, e dependendo da finalidade,

fornecimento de forragem suplementar. Os mesmos autores apontam ainda que uma vantagem do plantio de misturas de culturas de cobertura, ou culturas de cobertura rotativas, é evitar o acúmulo de patógenos de plantas ou populações de nematóides parasitas no solo.

O presente trabalho visa não somente investigar a aplicação do VANT na estimativa de biomassa de plantas para cobertura do solo através de Modelo Digital de Superfície (neste trabalho, denominado como Modelo de Superfície de Cultura (msc.)), mas também fomentar referências na temática de plantas de cobertura de solo, uma vez que o local de estudo se faz presente em uma das maiores regiões de produção agrícola do país – estado do Mato Grosso do Sul.

2. OBJETIVO GERAL

Determinar a biomassa de plantas para cobertura de solo, usando modelos de superfície de cultura (msc.) derivados de imagens coletadas por VANT.

2.1 Objetivos Específicos

Determinar a altura e biomassa fresca e seca de plantas de cobertura do solo a campo;

Estimar a altura das plantas de cobertura do solo usando VANT;

Correlacionar as alturas estimadas a partir de VANT com a biomassa determinada *in loco*, de modo a propor equações que possibilitem a estimação de biomassa com VANT para as diferentes culturas estudadas.

3. REVISÃO DA LITERATURA

O uso de imagens de sensoriamento remoto na agricultura tem diversas finalidades. Os helicópteros de controle remoto, por exemplo, foram usados para gerar mapas de status de colheita (Sugiura, et al., 2005) e modelos de aeronaves foram utilizados como plataforma para remoção remota da cultura e status de biomassa e nitrogênio (Hunt Jr, et al., 2005). Além disso, foi utilizado um veículo aéreo não tripulado para monitorar o rendimento da cultura de café e a proliferação de ervas daninhas entre as linhas de produção (Herwitz, et al., 2004).

Para Jannoura et al. (2015), a partir de imagens com cores reais é possível determinar a biomassa de uma cultura e criar mapas que podem prever o rendimento de um campo inteiro.

Segundo Hatfield et al. (2008), a aplicação do sensoriamento remoto em estudos agronômicos permitiu que se criassem novos métodos para o manejo das lavouras, bem como a criação de oportunidades de se descrever quantitativamente parâmetros agronômicos. Porém, ainda há a necessidade de se aprofundar os estudos voltados à esta temática através da criação e utilização de novos algoritmos que permitem uma compreensão maior do que se busca dentro de um espaço (em diferentes campos, diferentes paisagens e regiões, em determinadas situações climáticas, diferentes localizações geográficas, etc.) e tempo (entre estações sazonais, diferentes momentos do dia, em diferentes períodos durante o crescimento de uma planta, etc).

Para Shanahan et al. (2001), o sensoriamento remoto é capaz de fornecer informações espaciais e temporais, através de objetos de plataformas remotas, como as aeronaves, satélites ou barreiras terrestres. Além disso, ressalta a importância destes dados adquiridos para o gerenciamento de culturas específicas do local a ser estudado.

Bendig et al. (2014) investigaram o uso de índices radiométricos na estimativa de biomassa. Os autores verificaram correlação média da biomassa com os índices, e concluíram que a altura de planta estimada por VANT apresenta correlação maior com a biomassa.

Bernardi et al. (2014), menciona que o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), por ser um índice de fácil aplicação e que possibilita rápida e eficiente detecção de variações na vegetação (Rouse et al., 1973) é usado para avaliar a sanidade, a área de plantio, a biomassa e o teor de nutrientes das plantas (Freeman et al., 2007; Hatfield et al., 2008, Vicente et al., 2012). E que, além disso, alguns outros

índices podem ser calculados a partir dessas faixas espectrais obtidas com sensores ativos, como índice de área foliar, teor de clorofila, biomassa, densidade, temperatura foliar e umidade (Hatfield et al., 2008).

Diversos estudos já foram realizados visando à estimativa da biomassa através de técnicas de Sensoriamento Remoto (Bendig et al. 2014; Kulmar, et al., 2001; Migdall, et al., 2009; Koppe et al., 2012; Yang et al., 2008; Jang et al., 2006; Hoyos-Villegas et al., 2013; Jensen et al., 1990). No entanto, Lamb et al. (2001) ressalta que VANTs, a partir de seus sensores, podem oferecer uma flexibilidade muito maior do que apenas as plataformas de satélites, uma vez que se pode operar em condições de nuvens e mesmo assim, obter imagens com alta resolução espacial.

A determinação da biomassa fresca e seca pode ser obtida a partir da altura da planta (AP) medida manualmente e através dos sensores aéreos (VANT) através de cálculos de índices de vegetação (Bendig et al., 2014).

O sensoriamento remoto possibilita a extração de informações de culturas em áreas extensas sem a necessidade de se ter muitos dados coletados a campo. Sendo assim, com índices de vegetação coletados via satélite é possível avaliar a biomassa das culturas de planta para cobertura de solo (Bernardi et al., 2014).

Hoffmeister et al. (2010) apresentaram uma abordagem com dados de varredura a laser que é usada para estimar parâmetros de cultura, estimando Modelos de Superfícies de Culturas (MSC) e Modelos de Volume de Culturas (MVC), bem como parâmetros de rugosidade multitemporal em um campo de beterraba na Alemanha.

Bareth et al. (2016) compararam os dados de altura de plantas derivados de imagens de VANT e de varreduras a laser terrestre (VLT). Se dedicaram também a métodos de reamostragem mantendo estatísticas descritivas dos dados de altura de plantas como uma medida de densidade. Utilizaram MSCs gerados a partir de um experimento de cevada. Foram analisados dados dos estágios inicial, médio e tardio para ambos métodos. No início da estação de crescimento as diferenças são maiores do que nas fases posteriores de crescimento após o fechamento do dossel. Diferentemente do esperado, o padrão de altura das plantas dentro das parcelas parece ser muito diferente entre os dois métodos em todos os três estágios de crescimento. O coeficiente de variação mostrou que os valores de altura da planta do método com VANT variam menos em comparação com os dados de TLS em todas as parcelas e nos três estágios de crescimento.

Possoch et al. (2016) investigaram o potencial de sistemas de VANT de baixo custo para aquisição de imagens RGB para determinar de forma espacial a altura das plantas e a massa de forragem em pastagens manejadas. Dessa forma, investigaram a transferência do conceito de Modelos de Superfície de Cultivo para resultar a altura de planta como um estimador para massa de forragem, e além disso, aplicaram o índice de vegetação para o domínio visível desenvolvido por Bendig et al. (2015), que pode ser combinado com a altura de plantas. O experimento utilizou dois crescimentos em um ano, onde toda a área foi sobrevoada por um VANT para geração de imagens RGB e 18 parcelas de amostragem foram medidas por um espectrômetro e depois foram colhidas para análise de biomassa. Os dados RGB multi-temporais foram utilizados para calcular os índices de vegetação, que foram comparados às medidas espectrais e aos parâmetros de plantas amostradas. Uma análise de correlação foi usada para quantificar a força da relação entre a altura da planta e a biomassa. Uma alta correlação ($R^2 = 0.85$) foi alcançada definindo a altura da planta do Modelo de Superfície da Cultura em metros em relação à matéria seca em toneladas por hectare.

3.1 Plantas de Cobertura de Solo

Uma das revisões mais completa sobre a adubação verde, é o livro *Green manuring: principles and practice* (Pieters, 1927), o qual conta a história da adubação verde na China, Grécia e em Roma, na Europa Medieval, na Alemanha, na Inglaterra e nas Américas, em diferentes épocas. A partir destes estudos, sabe-se que a civilização chinesa foi a primeira a empregar a adubação verde utilizando os restos de cultura e vegetação natural dos campos cultivados. Enquanto gregos e romanos empregavam o uso de leguminosas como rotação de culturas.

No Brasil, a primeira referência que se têm, refere-se ao Livro *Adubos verdes: sua produção e modo de emprego* (D'utra, 1919). Nas décadas de 1920 a 1940 a adubação verde começa a ser reconhecida como um benefício à fertilidade dos solos (a partir de sua importância para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo), como um adubo econômico que traz melhorias às terras inclinadas e que promove a fertilização de terras “cansadas”.

Já na década de 1950, começa-se os resultados de pesquisas das publicações de artigos, teses, boletins técnicos e livros acerca dos benefícios dos adubos verdes, além das secretarias de agricultura começarem a incentivar tal prática, produzindo materiais que incentivassem produtores. Nas décadas de 1960 e 1970 (Século XIX), inicia-se a sintetização dos adubos verdes, através de fertilizantes artificiais. Consequentemente, no

Século XX, a matéria orgânica começa a ser desconsiderada do sistema produtivo. E, então, somente nas décadas de 1980 a 1990 retoma-se e expansão da adubação verde, a partir de encontros nacionais sobre adubação verde promovidos por quem ainda via benefício no uso de adubos verdes para fertilização dos solos. Com isso, retomou-se também a produção de materiais de incentivos destacando a importância dos adubos verdes para os solos brasileiros.

A temática da adubação verde inicia o Século XXI trazendo os males dos chamados, “pacotes tecnológicos”, divulgando a adubação verde como ferramenta de sustentabilidade através de estudos que comprovam os benefícios dos adubos verdes e incentiva o não uso de fertilizantes químicos. Além disso, começa-se a mencionar o cultivo e corte de plantas imaturas, em plena floração, de preferência espécies leguminosas (fabáceas), por sua capacidade de fixação de nitrogênio, com a finalidade de aumento, preservação e/ou restauração da fertilidade do solo.

Ao se pensar em preservação do solo, buscou-se a utilização dos adubos verdes para a realização do presente estudo, pois a utilização de insumos agrícolas favoráveis a manter os nutrientes dos solos é cada vez mais frequente em áreas agrícolas.

Uma das maneiras de se manter a qualidade de um solo é o plantio de adubo verde ou plantas de cobertura para cultivos em sistemas de plantio direto. Sabe-se que no Brasil, a adubação verde apresenta excelentes resultados nas mais diversas condições de produção (Wutke, 1993).

Os resíduos dos adubos verdes interferem positivamente na capacidade de infiltração e contenção de água, na consistência do solo, na sua densidade, na porosidade e aeração, no aumento do teor de matéria orgânica do solo, na elevação do pH do solo e diminuição de sua acidez, além da alta capacidade de reciclar e mobilizar nutrientes que possam ser lixiviados ou de difícil solubilidade (Silva et al., 1999).

Mensurar a biomassa de plantas para cobertura de solo permite prever o rendimento das culturas subsequentes. O monitoramento da biomassa fresca e seca de plantas para cobertura (a partir da sua altura e peso) e através de modelos de superfície de cultura (MSCs) via VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado (Bendig et al., 2014) busca integrar produção com preservação ambiental.

Diante das referências utilizadas como base para a elaboração deste projeto, nota-se que inexistem estudos nesse sentido no Brasil, especificamente em Mato Grosso do Sul.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local de estudo

O cultivo das plantas para cobertura de solo foi desenvolvido no Centro de Pesquisa e Capacitação da Agência de Desenvolvimento Agrário e Extensão Rural (CEPAER – AGRAER) (50°37'N, 6°59'E, altitude 186 m), em Campo Grande, MS (Figura 01).

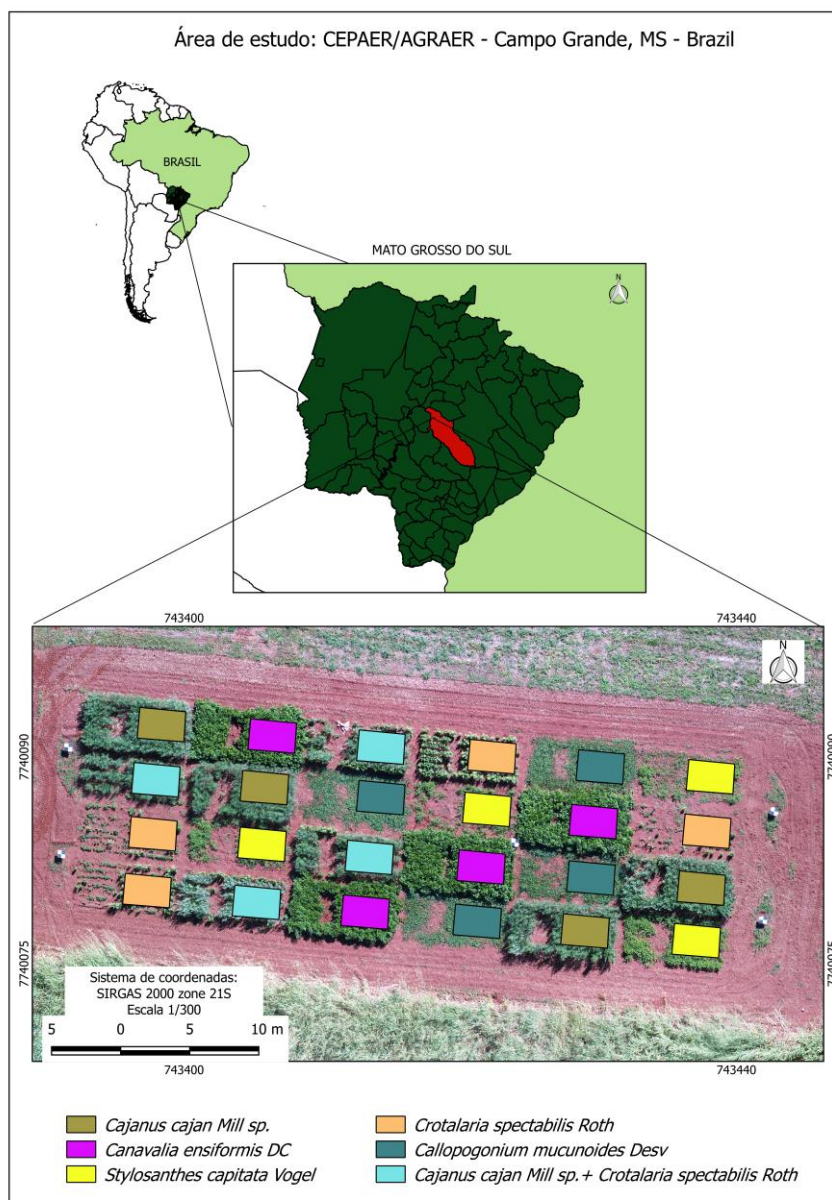


Figura 1. Localização da área de estudo – CEPAER/ AGRAER. Fonte: Qgis 2.18.13, elaborado por: Autor, 2019.

A topografia do local é plana e o solo, originalmente sob vegetação de Cerrado, é o tipo Latossolo Vermelho Distroférico (EMBRAPA, 2006). As análises físicas e químicas do solo revelaram os seguintes resultados: Areia = 550 g/kg; Silte = 140 g/kg;

e Argila = 310 g/kg; pH (H₂O) = 5,07; pH (CaCl₂) = 4,46; P = 2,92 mg/dm³; MO = g/dm³ = 34,48; K = 0,09 cmol/dm³; Ca = 1,40 cmol/dm³; Mg = 0,60 cmol/dm³; Ca+Mg = 2,00 cmol/dm³; Al = 0,34 cmol/dm³; H = 4,40 cmol/dm³; Al+H = 4,74 cmol/dm³; S = 2,09 cmol/dm³; T = 6,83 cmol/dm³; V (%) = 30,60; relações: Ca/Mg = 2,33; Ca+Mg/K = 22,22; Ca/K = 15,56; Mg/K = 6,67; saturação (%): Ca = 20,50; Mg = 8,78; K = 1,32; m = 13,99; H = 64,4.

O clima da região é classificado como clima tropical de monções – Am (Alvares et al., 2013). As temperaturas (°C) máximas e mínimas e dados de precipitação pluviométrica (mm) para os meses de fevereiro a junho de 2018 variaram entre: fevereiro (33 °C e 16 °C, 200 mm); março (34 °C e 16 °C, 35 mm); abril (33 °C e 18 °C, 90 mm); maio (34 °C e 6 °C, 37 mm); e junho (31 °C e 9 °C, 11 mm) respectivamente.

4.2 Delineamento experimental

O experimento consistiu no uso de cinco espécies de adubos verdes: feijão de porco (*Canavalia ensiformis* DC), calopogônio (*Calopogonium mucunoides* Desv), estilozante campo grande (*Stylosanthes capitata* Vogel), crotalária (*crotalária spectabilis* Röth), guandu (*Cajanus cajan* Millsp) e o consórcio crotalária + guandu (c + g), as quais foram arranjadas no delineamento experimental de blocos ao acaso, com 4 repetições, em uma área de 15 x 39 metros, conforme Figura 02.

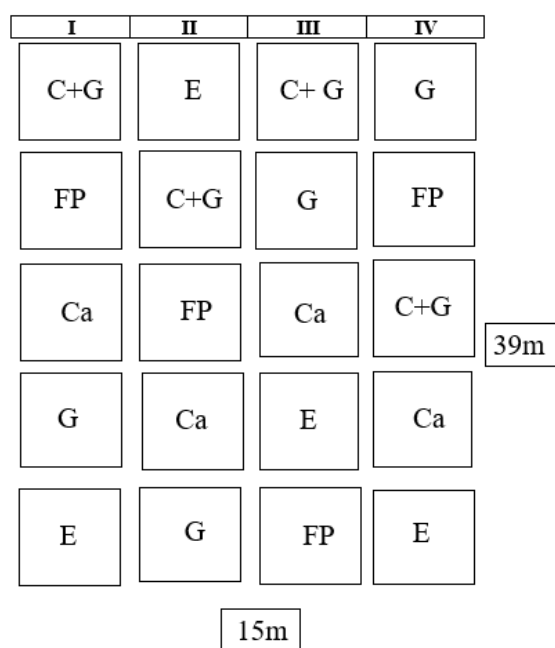


Figura 2. Croqui do experimento com as parcelas de cada espécie e metragem total do terreno (15 m x 39 m). Ca: Calopogônio; E: Estilozante campo grande; FP: Feijão de Porco; G: Guandu; C+G: Consórcio Crotalária + Guandu. Fonte: Autor, 2018.

As etapas do planejamento do experimento, consistiram na definição da área de estudo; separação dos seguintes materiais: sementes, 140 sacos transparentes (6 cm x 12 cm), 140 estacas de madeira (85 cm), 1 kg de barbante branco, trenas, marretas, enxadas, 1 fardo de sacos de papel pardo (24 cm x 60 cm), tesouras de poda, trator com grade para abertura das linhas de plantio e automóvel para transporte das amostras até o laboratório. Diante disso, as sementes foram quantificadas e inseridas em sacos transparentes para que a quantidade exata fosse semeada em cada linha das parcelas (Figura 03). Posteriormente, os materiais foram levados a campo para a montagem do experimento (Figura 04).

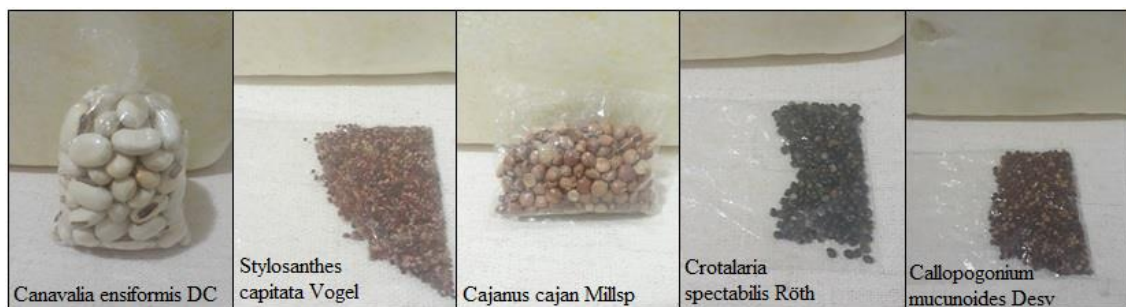


Figura 3. Sementes quantificadas e separadas em sacos transparentes, prontas para serem semeadas. Fonte: Autor, 2018.



Figura 4. Área do experimento antes da semeadura. Fonte: Autor, 2018.

Os adubos verdes foram semeados em linhas espaçadas em 0,5 m e densidade preconizada por Calegari et al. (2014) (Figura 05), sendo 10 sementes/m linear para feijão de porco, 30 sementes/m linear de calopogônio, 50 sementes/m linear de estilósante e 25 sementes/m linear para crotalária e guandu.

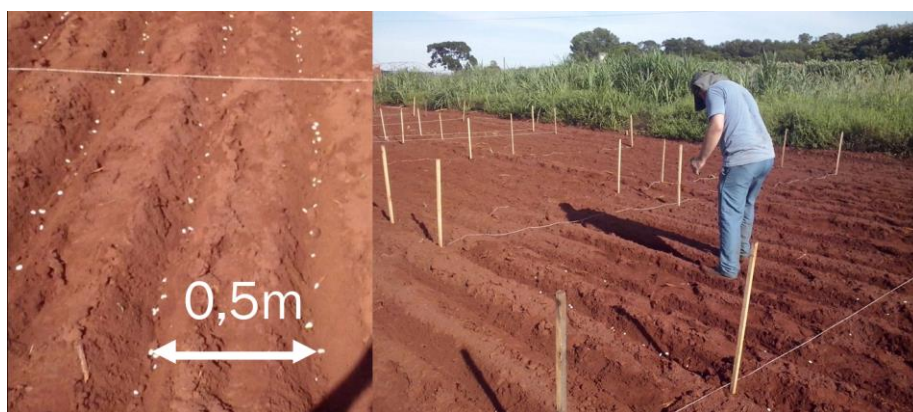


Figura 5. Semeadura em linhas espaçadas por 0,5 m. Fonte: Autor, 2018.

As parcelas tiveram área total de 3 m × 7 m. Cada parcela foi dividida em uma área de medição de 3 m × 4 m e uma área de amostragem de 3 m × 3 m (Figura 06).

Além disso, a altura de referência da planta (AP ref.) foi medida manualmente em cada parcela.

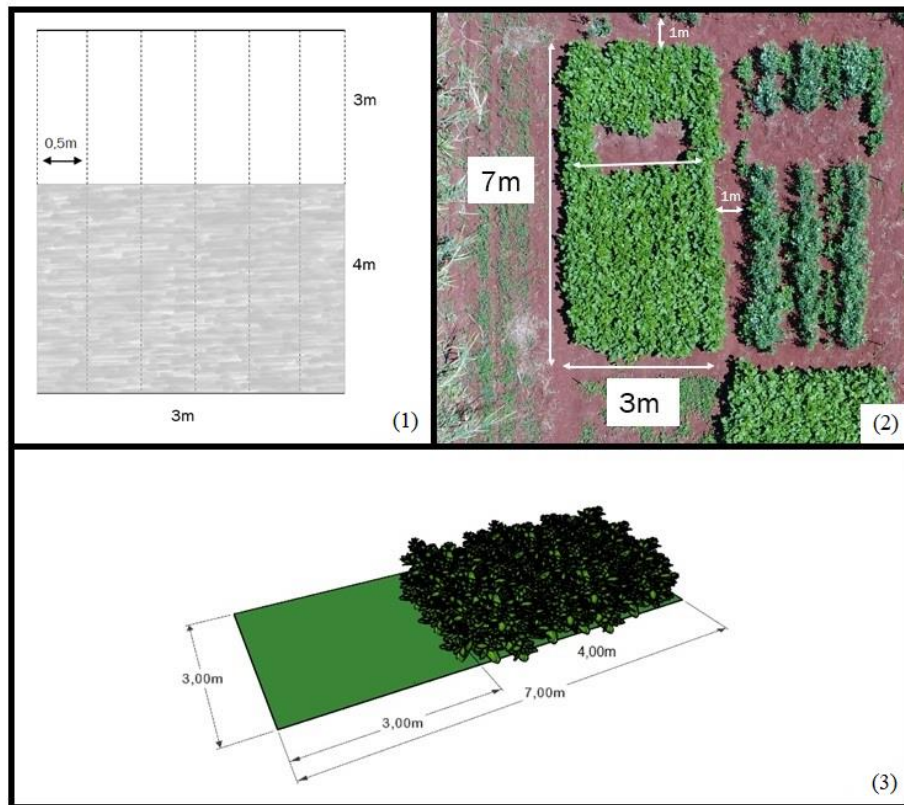


Figura 6. (1) Espaçamento entre as linhas de semeadura e área para análises com VANT (cor cinza). (2) Imagem aérea delimitando a distância entre cada parcela. (3) Modelo gráfico de cada parcela e suas medidas. Fonte: Autor, 2018.

As avaliações de altura da planta de referência (Figura 07), altura estimada por modelo de superfície e biomassa fresca e seca das plantas foram realizadas a cada 21 dias até os adubos verdes começarem o estágio final de florescimento e início da formação de grãos (como há uma variedade de espécies, o experimento cumpriu 126 dias após a semeadura (DAS), onde a maioria das espécies já estavam em fase de florescimento e/ou formando grãos).



Figura 7. Avaliação de altura da planta. Fonte: Autor, 2018.

4.3 Amostragem de biomassa

A amostragem da biomassa destrutiva foi realizada para 4 espécies + consórcio (C + G). Para a determinação da biomassa verde e seca, realizou-se o corte das plantas de cobertura rente ao solo dentro das áreas de amostragem de cada parcela, amostrando-se 1 m² de área útil. Na sequência, a massa verde foi acondicionada em sacos de papel devidamente identificados, onde posteriormente, no mesmo dia, foram pesadas separadamente através de balança de precisão portátil, para medição da biomassa fresca.

Após esta etapa, as amostras foram levadas à estufa de ventilação forçada a 65°C + 2°C, até massa constante, onde permaneceram por no mínimo 72 horas. Em seguida, as amostras foram pesadas novamente para a obtenção da biomassa seca.



Figura 8. (1) Massa verde identificada recém cortada. (2) Massa verde sendo pesada. (3) Amostras na estufa prontas para secagem. Fonte: Autor, 2018.

Em ambas as etapas, os dados de AP ref. e biomassa fresca e seca, foram devidamente anotados em planilhas impressas e posteriormente, foram organizadas no *software* Microsoft® Excel 2016.

4.4 Procedimento com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)

Para análise sensorial, foram realizados sete sobrevoos entre 08 de fevereiro e 12 de junho de 2018 a 30 metros do solo (Tabela 01). Para tanto, utilizou-se VANT

modelo *DJI Phantom 4 Advanced* (Figura 09), a partir de solicitações de voo e mediante autorização do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), para cada sobrevoo na área. Este procedimento se deu por meio de um plano de voo simples onde o piloto remoto especifica a área a ser sobrevoada e as demais características do voo, a cada aerolevanteamento. A atividade de aerolevanteamento é regulada pelo Decreto – Lei nº 1.177/1971, Decreto nº 2.278/1997 e Portaria nº 953/2014 do Ministério da Defesa.

Tabela 1. Detalhes das campanhas de voo para a elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT), Modelo Superfície de Cultura (msc.), data da semeadura e das avaliações da biomassa destrutiva (Biomassa) determinada a campo.

Tipo	Data	Dias de Amostragem	Número de Imagens Coletadas	Sobreposição*¹	GSD*² (cm/pixel)
Semeadura	08/02/2018	0 dias			
(MDT)	08/02/2018	0 dias	18	0	0,83 cm
(msc.)	28/02/2018	21 dias	27	>5	0,82 cm
Biomassa	28/02/2018	21 dias			
(msc.)	21/03/2018	42 dias	27	>5	0,86 cm
Biomassa	21/03/2018	42 dias			
(msc.)	11/04/2018	63 dias	27	>5	0,82 cm
Biomassa	11/04/2018	63 dias			
(msc.)	02/05/2018	84 dias	27	>5	0,81 cm
Biomassa	02/05/2018	84 dias			
(msc.)	22/05/2018	105 dias	25	>5	0,79 cm
Biomassa	22/05/2018	105 dias			
(msc.)	12/06/2018	126 dias	21	>5	0,77 cm
Biomassa	12/06/2018	126 dias			

*¹ Sobreposição: número de imagens que cobriram a mesma parte da área de interesse (sobreposição de imagem); *² GSD (cm/pixel): (Ground Sample Distance) variação do pixel da imagem no terreno para amostragem do solo.

Com o VANT, foram capturadas entre 18 e 27 imagens em cada data a 30 m de altura de vôo, a sobreposição foi maior que 5 para todos os voos e GSD de 0,77 cm a 0,83 cm (Tabela 1). O local do estudo foi sobrevoado com câmera com sensor de 20 megapixels (FC6310_8.8_5472x3648 RGB) acoplada ao VANT *DJI Phantom 4 Advanced*.

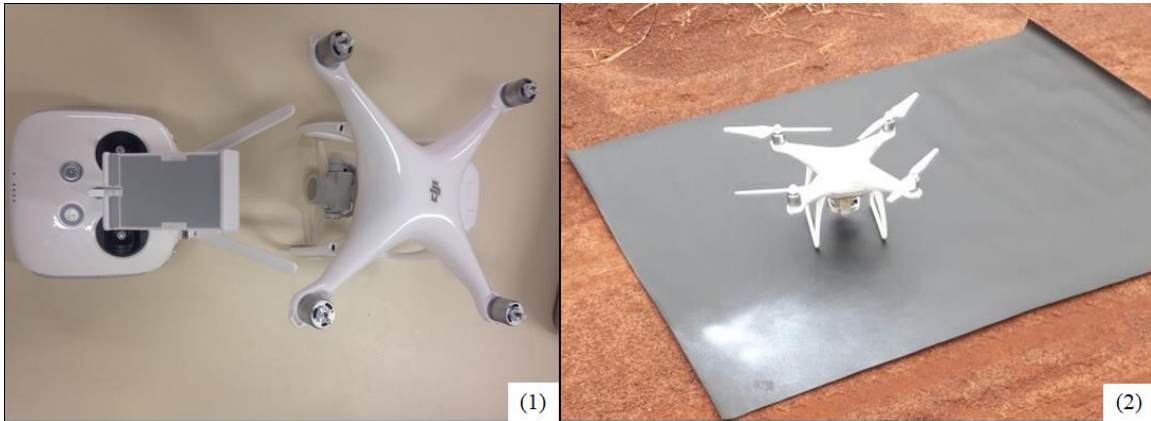


Figura 9. VANT modelo DJI Phantom 4 Advanced. Fonte: Autor, 2018.

Durante os sobrevoos, a posição, a altitude, e as imagens foram registradas automaticamente em um dispositivo móvel, no aplicativo do *software* Microsoft® *Pix4Dmapper*, onde todo o voo era registrado.

Primeiramente, foi realizado um sobrevoo logo após o plantio das espécies das plantas mencionadas neste estudo, onde o solo ainda estava exposto, de modo a permitir a elaboração do modelo digital de terreno (MDT) da área (Figura 10). Para tanto, foram usados cinco pontos de controle no solo (*Ground Control Points – GCPs*), levantados em campo com receptores GNSS – *Global Navigation Satellite System/RTK – Real Time Kinematic*, de modo a possibilitar acurácia centimétrica na elaboração do msc. (Figura 11).

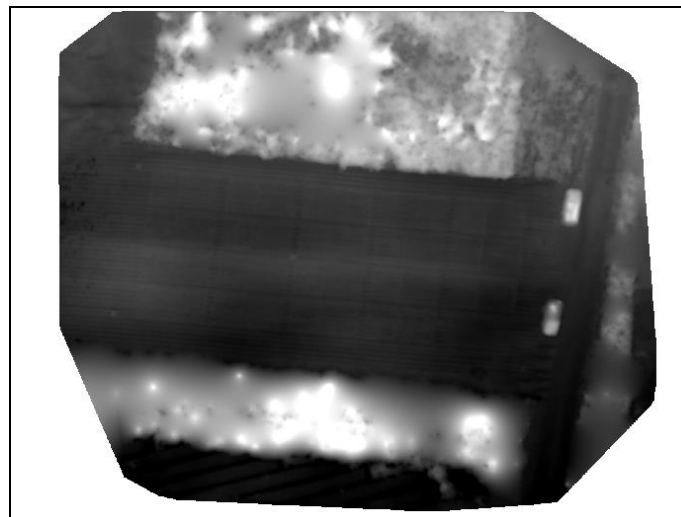


Figura 10. Modelo Digital de Terreno. Fonte: QGIS 2.18.13/Elaboração: Autor, 2018.

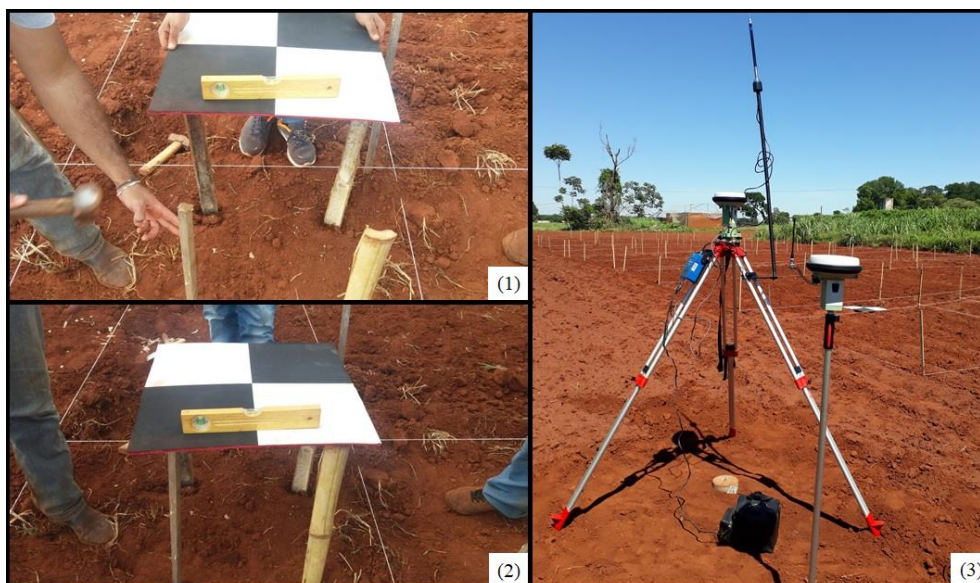


Figura 11. (1) e (2) Instalação dos suportes para os GCPs. (3) Posicionamento do receptor GNSS – Global Navigation Satellite System/RTK – Real Time Kinematic para coleta dos pontos de altimetria de cada GCP. Fonte: Autor, 2018.

Os demais sobrevoos na área foram realizados a cada 21 dias, de modo a estimar dados de AP msc. e biomassa das culturas utilizadas em cada parcela. Isso permitiu acompanhar a altura das plantas aos 21, 42, 63, 84, 105 e 126 dias após a semeadura – DAS (Figura 12) e a partir disso correlacionar sua altura e biomassa (msc.) com os dados de altura e biomassa (ref.) determinados em campo.

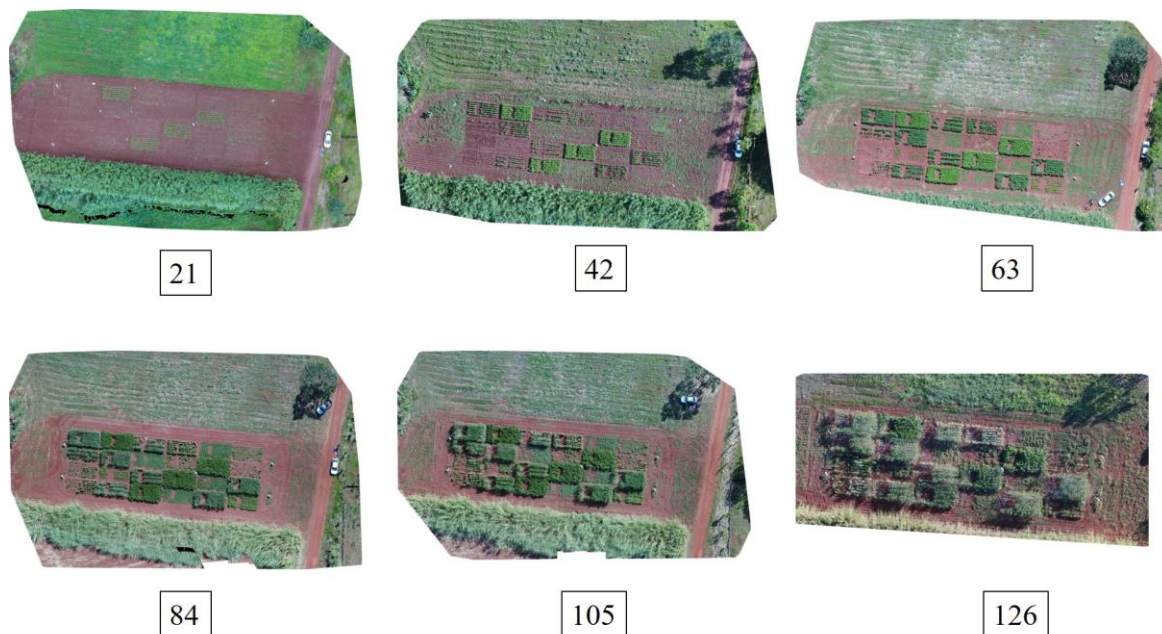


Figura 12. Sobrevoos aos 21, 42, 63, 84, 105 e 126 DAS. Fonte: Autor, 2018.

A geração do msc. requer a subtração do modelo digital de superfície pelo MDT, para que se obtenha a altura estimada da planta (AP msc.), para cada dia avaliado. Conforme equação 1:

$$AP_{msc.} = AP_{ms} - MDT \quad (1)$$

Inicialmente, os mosaicos foram gerados a partir do conjunto de imagens coletadas durante o voo, mais os pontos de GCPs, carregados no *software* comercial Microsoft® *Pix4Dmapper*, amplamente empregado no contexto de processamento de imagens de VANT, o qual a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul possui licença.

No *software Qgis 2.18.13* os mosaicos foram carregados, cada parcela foi recortada, gerando o *shape* da área de interesse (3 x 4 m). Para que os efeitos de limite não influenciasses, as parcelas foram reduzidas em 0,5 m em cada extremidade, e as áreas onde a amostragem de biomassa destrutiva foi realizada, foram desconsideradas.

Na etapa seguinte, o modelo digital de superfície é subtraído do MDT para obter a AP (msc.). A média de AP (msc.) foi calculada para cada parcela e utilizada para estimativa da biomassa com modelo de regressão. Este processo foi repetido para o modelo digital de superfície de cada data. Ou seja, ao final, obteve-se dados de altura média (AP ref.) e biomassas fresca e seca determinadas em campo, altura média estimadas por VANT (AP msc.).

A metodologia do presente projeto foi baseada em um estudo realizado na estação de pesquisa agrícola Campus Klein-Altendorf, na Alemanha. Neste estudo, foi introduzido um método para estimar a biomassa com base na altura da planta derivada dos modelos de superfície da cultura. Em primeiro lugar, foi demonstrado que as imagens ópticas vermelhas, verdes, azuis (RGB) baseadas em veículos aéreos não tripulados são altamente adequadas para derivar a altura da planta de cevada a partir de modelos de superfície de cultura multi-temporais (MSCs) com uma resolução alta de 1 cm na escala de campo. A altura da planta pode ser modelada com uma precisão muito alta para diferentes estágios de crescimento usando imagens de alta resolução baseadas em VANT ($R^2 = 0,92$). Os MSCs cobrem mais detalhes do que as medições pontuais do solo, onde se obtém uma altura da planta média por parcela (Bendig et al., 2014).

4.5 Análise de correlação/regressão

As análises de regressão e correlação foram desenvolvidas no *software* Microsoft® Excel 2016. As médias da altura de plantas obtidas por parcela para AP msc. foram avaliadas contra as médias AP ref. Os resultados foram apresentados em gráficos com equações de regressão.

Equações de regressão linear e exponencial foram derivadas para AP msc. versus biomassa fresca e AP msc. versus biomassa seca para os conjuntos de dados avaliados pelo seu coeficiente de determinação (R^2). Os modelos de regressão resultantes foram aplicados aos conjuntos de dados de validação e analisados por correlação linear entre a biomassa observada e a biomassa estimada.

Para verificar a qualidade dos ajustes dos modelos, foi realizada uma análise de correlação, juntamente com uma análise de resíduos dos modelos. Portanto, usamos o coeficiente de correlação (R^2), erro médio quadrático (RMSE) (Moriasi et al., 2007) (Eq. (2)) e Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash e Sutcliffe, 1970). (Eq. (3)). Nestas equações, Y_{obs} representa os dados observados, Y_{est} os dados estimados através dos modelos, n o número de observações e \bar{Y}_{obs} a média aritmética das observações, como mostrado:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est})^2}{n}} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2} \quad (3)$$

Valores de RMSE de 0 indicam um ajuste perfeito (Moriasi et al., 2007). O NSE varia entre $-\infty$ e 1,0 (1 inclusive), com $NSE = 1$ sendo o valor ótimo. Valores entre 0,0 e 1,0 são geralmente vistos como níveis aceitáveis de desempenho, enquanto valores $< 0,0$ indicam que o valor médio observado é um melhor preditor do que o valor estimado, o que indica um desempenho inaceitável (Nash e Sutcliffe, 1970; Moriasi et al., 2007).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao comparar a altura de plantas derivada do msc. (AP msc.) com a altura da planta de referência (AP ref.), conforme Tabela 2 e Figura 13, a AP msc. média variou entre 0,08 m e 0,25 m mais baixo que AP ref., com exceção do consórcio (crotalária + guandu), uma vez que o msc. representa todo o relevo da superfície da cultura, não apenas os pontos mais altos das plantas. Além disso, Grenzdoerffer (2014) utilizando o método da diferença entre o modelo de superfície de cultivo e um modelo digital de terreno existente para determinar a altura do dossel destaca que a vantagem deste método é que a superfície de referência é sempre a mesma, assim, a medição da altura da superfície da planta é considerada mais precisa e confiável durante toda a estação de crescimento. Porém, o autor reforça que um pré-requisito para utilizar este método é a disponibilidade de um modelo digital de terreno de referência de alta precisão.

De acordo com a Tabela 02, as médias de biomassa fresca (e seca) variaram entre: 0,135 e 5,339 (0,025 e 1,634) com erro padrão de 0,291 (0,096) para feijão de porco, já para calopogônio, a média variou entre: 0,001 e 2,139 (0,000 e 0,831) com erro padrão de 0,131 (0,048). O estilosante apresentou sua média entre: 0,002 e 1,727 (0,000 e 0,636) e erro padrão de 0,121 (0,043). Para o consórcio (crotalária + guandu), obteve-se: 0,022 e 4,142 (0,005 e 1,671) e erro padrão de 0,288 (0,114), e por fim, para a espécie do guandu, a média variou entre: 0,028 e 5,213 (0,007 e 1,974) com erro padrão de 0,324 (0,127).

Observa-se que para biomassa fresca e seca, os menores valores de erro padrão foram registrados para estilosante e os maiores valores foram registrados para guandu.

Tabela 2. Estatística descritiva da altura da planta do msc (AP msc), altura da planta de referência do solo (AP ref) e biomassa fresca e seca acima do solo para todas as parcelas (n = 24). EP = erro padrão; n = número de amostras.

Feijão de Porco				
	AP ref. (m)	AP msc. (m)	Biomassa fresca (kg/m ²)	Biomassa seca (kg/m ²)
Mínimo	0,175	0,059	0,135	0,025
Máximo	1,423	1,011	5,339	1,634
Médio	0,765	0,679	2,036	0,614
EP	0,073	0,072	0,291	0,096
N	96	96	24	24
Calopogônio				
Mínimo	0,025	0,000	0,001	0,000
Máximo	0,585	0,366	2,139	0,831
Médio	0,308	0,181	0,667	0,231
EP	0,043	0,027	0,131	0,048
N	96	96	24	24
Estilosante				
Mínimo	0,023	0,000	0,002	0,000
Máximo	0,598	0,474	1,727	0,636
Médio	0,339	0,207	0,658	0,219
EP	0,043	0,038	0,121	0,043
N	96	96	24	24
Crotalária + Guandu				
Mínimo	0,068	0,000	0,022	0,005
Máximo	1,218	1,594	4,142	1,671
Médio	0,554	0,767	1,567	0,575
EP	0,075	0,117	0,288	0,114
N	96	96	24	24
Guandu				
Mínimo	0,183	0,033	0,028	0,007
Máximo	1,860	1,867	5,213	1,974
Médio	1,137	0,888	1,930	0,690
EP	0,125	0,127	0,324	0,127
N	96	96	24	24

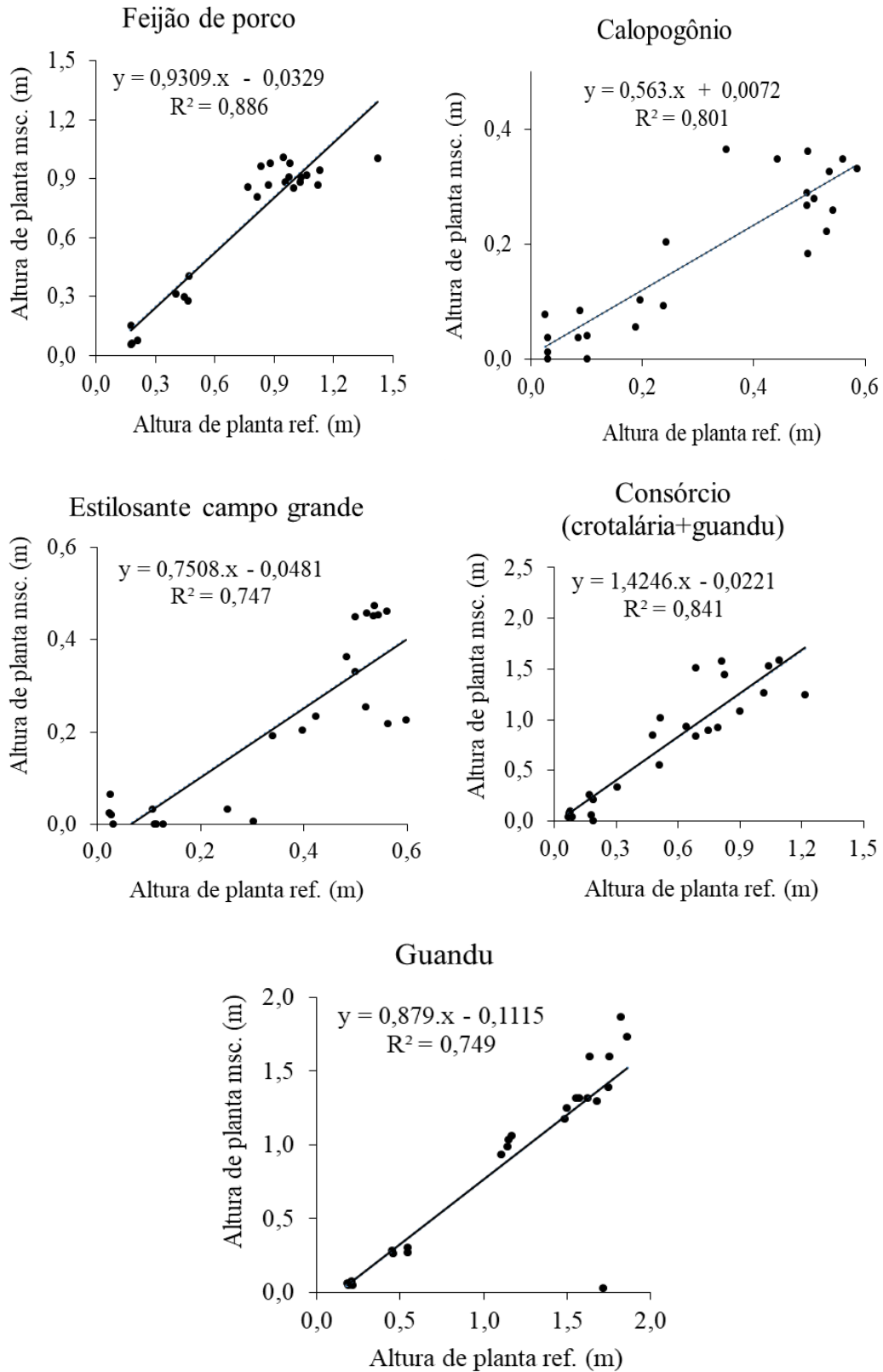


Figura 13. Gráficos de regressão linear com AP ref. versus AP msc. para todas as espécies estudadas. Para todos os gráficos (n = 96). R² = coeficiente de determinação. Fonte: Autor, 2019.

Os coeficientes de determinação foram classificados a seguir como altos ($R^2 > 0,7$), médios ($0,5 < R^2 < 0,7$) e baixos ($R^2 < 0,5$), conforme Bendig et al., 2014.

As equações de regressão linear e exponencial ajustadas entre AP msc. e AP ref. e biomassa fresca apresentaram uma alta correlação $R^2 = 0,897$ (exp.) e $0,903$ (exp.) para Feijão de Porco. A espécie do Calopogônio apresentou para AP msc. e biomassa fresca uma média correlação $R^2 = 0,572$ (exp.), já para AP ref. e biomassa fresca, apresentou alta correlação $R^2 = 0,750$ (lin.). A correlação para Estilosante é considerada alta, apresentando $R^2 = 0,824$ (lin.) e $0,903$ (exp.). No Consórcio (C + G) a correlação foi considerada alta para AP msc. apresentando $R^2 = 0,873$ (lin.) e baixa para AP ref. com $R^2 = 0,746$ (exp.). Para a espécie do Guandu, a correlação é considerada média para AP msc., com $R^2 = 0,640$ (exp.), e alta correlação para AP ref., com $R^2 = 0,895$ (exp.) (Tabela 3, Figura 14).

Tabela 3. Coeficiente de determinação (R^2) para altura de plantas (AP) (msc. e ref.) e biomassa fresca (BF) e seca (BS) acima do solo. Para altura de planta (n = 96) e para biomassa fresca e seca (n = 24); lin. = linear, exp. = exponencial.

	Feijão de Porco			
	AP ref. (m)	AP msc. (m)	BF (kg/m ²)	BS (kg/m ²)
AP ref. (m)	1			
AP msc. (m)	0,886 (lin.)	1		
BF (kg/m ²)	0,903 (exp.)	0,897 (exp.)	1	
BS (kg/m ²)	0,917 (exp.)	0,929 (exp.)	0,973 (lin.)	1
	Calopogônio			
	AP ref. (m)	AP msc. (m)	BF (kg/m ²)	BS (kg/m ²)
AP ref. (m)	1			
AP msc. (m)	0,801 (lin.)	1		
BF (kg/m ²)	0,750 (lin.)	0,572 (exp.)	1	
BS (kg/m ²)	0,711 (exp.)	0,585 (exp.)	0,967 (lin.)	1
	Estilosante			
	AP ref. (m)	AP msc. (m)	BF (kg/m ²)	BS (kg/m ²)
AP ref. (m)	1			
AP msc. (m)	0,747 (lin.)	1		
BF (kg/m ²)	0,903 (exp.)	0,824 (lin.)	1	
BS (kg/m ²)	0,918 (exp.)	0,776 (lin.)	0,988 (lin.)	1
	Crotalária + Guandu			
	AP ref. (m)	AP msc. (m)	BF (kg/m ²)	BS (kg/m ²)
AP ref. (m)	1			
AP msc. (m)	0,841 (lin.)	1		
BF (kg/m ²)	0,746 (exp.)	0,873 (lin.)	1	
BS (kg/m ²)	0,765 (exp.)	0,857 (lin.)	0,993 (lin.)	1
	Guandu			
	AP ref. (m)	AP msc. (m)	BF (kg/m ²)	BS (kg/m ²)
AP ref. (m)	1			
AP msc. (m)	0,749 (lin.)	1		
BF (kg/m ²)	0,895 (exp.)	0,640 (exp.)	1	
BS (kg/m ²)	0,897 (exp.)	0,644 (exp.)	0,976 (lin.)	1

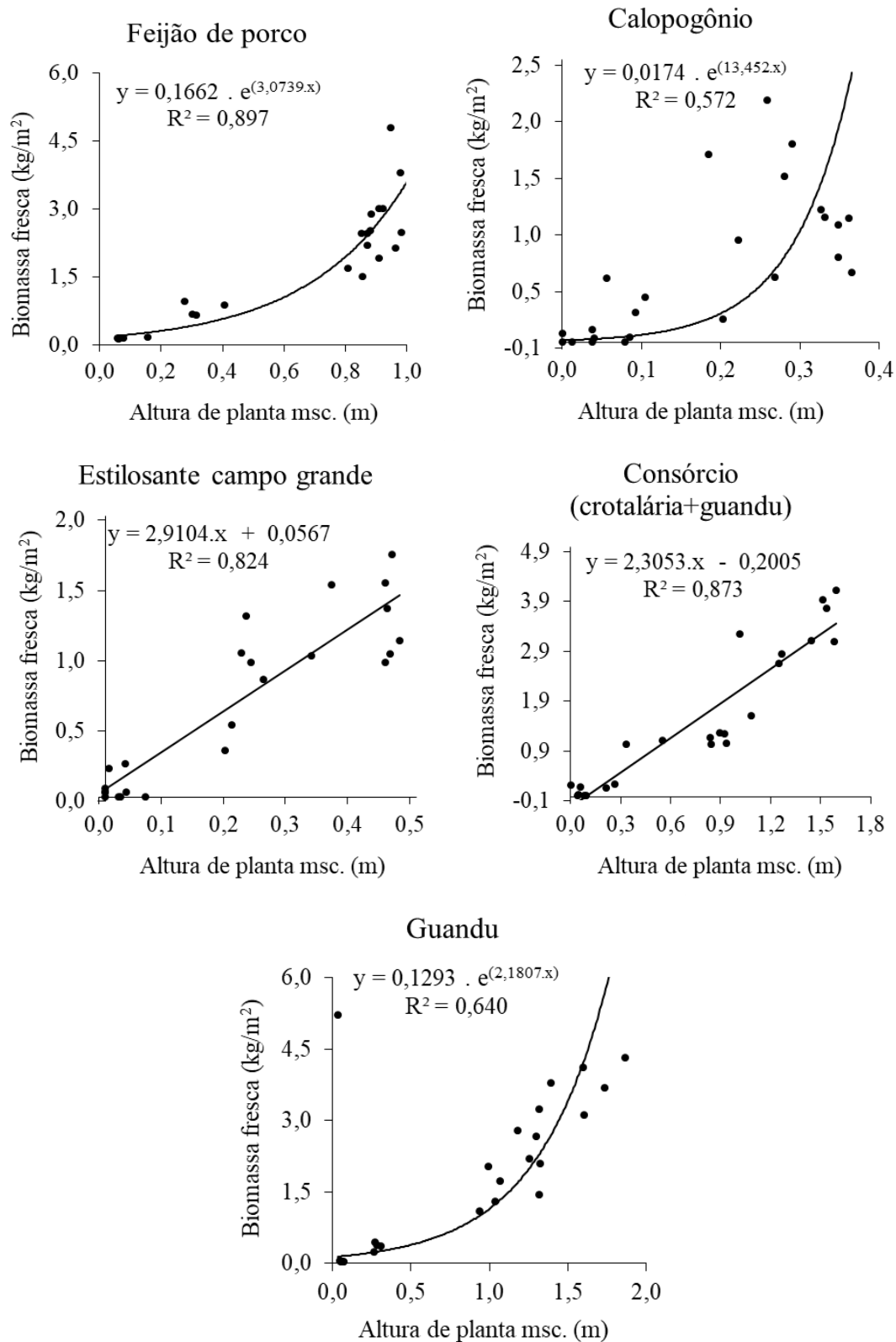


Figura 14. Gráficos de regressão linear e exponencial para AP msc. versus Biomassa fresca. Fonte: Autor, 2019.

A correlação foi similar para biomassa seca, ao compara-las com AP msc., apresentando alta correlação, com $R^2 = 0,929$ (exp.) e $0,917$ (exp.) para Feijão de Porco, média correlação para AP msc. com $R^2 = 0,585$ (exp.), e alta correlação para AP ref. com $R^2 = 0,711$ (exp.) para Calopogônio. Para Estilosante e Consórcio (C + G) a correlação é considerada alta, com $R^2 = 0,776$ (lin.) e $0,918$ (exp.) e $R^2 = 0,857$ (lin.) e $0,765$ (exp.). Já para Guandu, a correlação foi média para AP msc., com $R^2 = 0,644$ (exp.) e alta para AP ref., com $R^2 = 0,897$ (exp.), conforme Tabela 3, Figura 15.

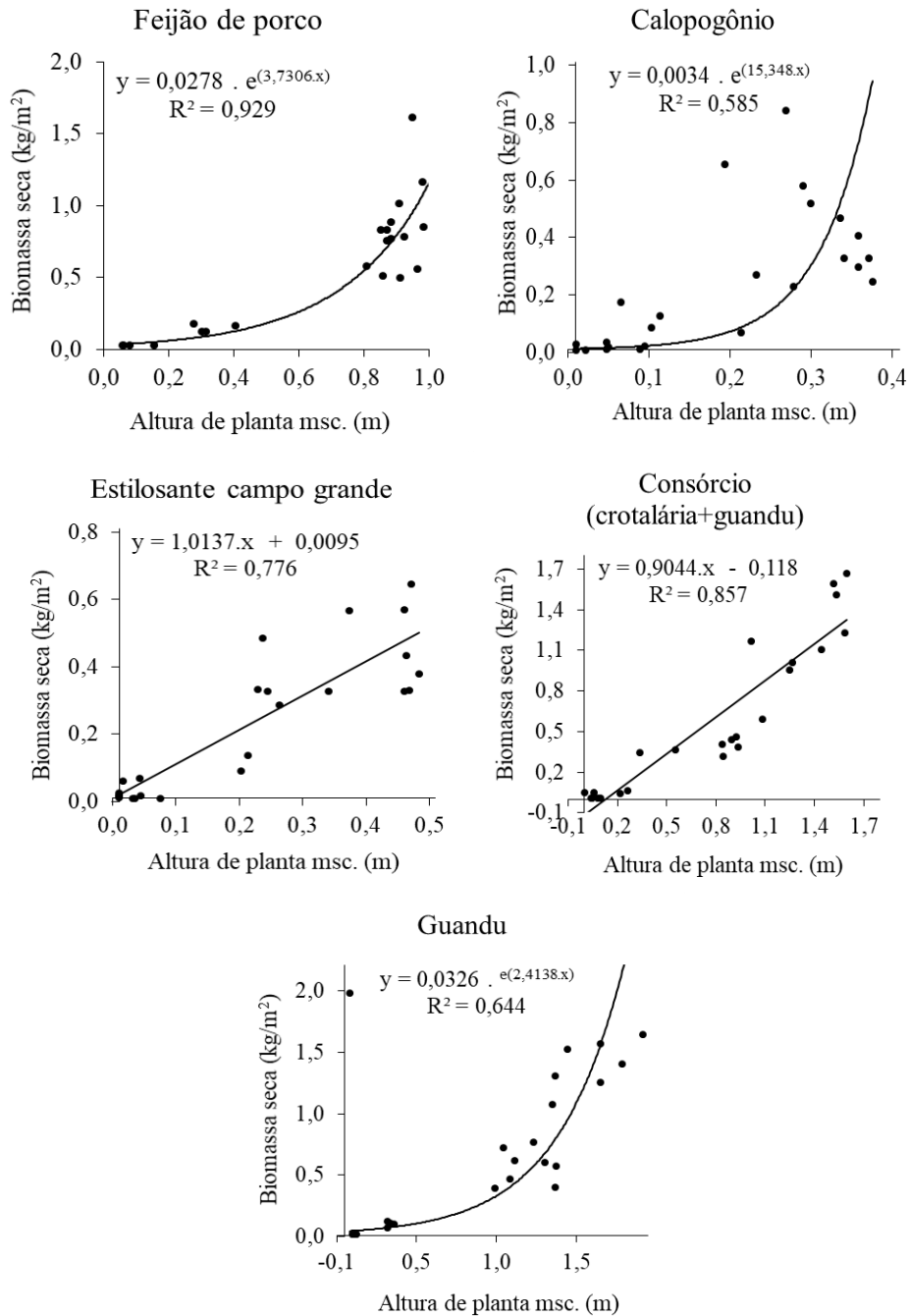


Figura 15. Gráficos de regressão linear e exponencial para AP msc. versus Biomassa seca. Fonte: Autor, 2019.

a. Validação do Modelo

Tabela 4. Características de regressão da biomassa observada versus estimada. n = número de amostra do conjunto de dados de validação; R² = coeficiente de determinação; RMSE: erro médio quadrático; NSE: coeficiente de eficiência modelo Nash-Sutcliffe.

Validação dos dados	Modelo de regressão	n	Erro padrão (kg/m ²)	R ²	RMSE (kg/m ²)	NSE
Biomassa fresca						
FP	BIOM = 0,1662 x e ^(3,0739 x AP)	24	0,291	0,764	0,680	0,763
Ca	BIOM = 0,0236 x e ^(12,322 x AP)	24	0,131	0,227	0,686	-0,194
E	BIOM = 2,8175 x + 0,0892	24	0,121	0,824	0,244	0,822
C+G	BIOM = 2,3048 x - 0,2	24	0,228	0,873	0,492	0,873
G	BIOM = 0,1293 x e ^(2,1807 x AP)	24	0,324	0,835	1,468	0,108
Biomassa seca						
FP	BIOM = 0,0278 x e ^(3,7306 x AP)	24	0,096	0,731	0,240	0,729
Ca	BIOM = 1,0884 x + 0,043	24	0,048	0,180	0,269	-0,346
E	BIOM = 0,9805 x + 0,021	24	0,043	0,776	0,099	0,775
C+G	BIOM = 0,9043 x - 0,1178	24	0,114	0,857	0,207	0,857
G	BIOM = 0,0326 x e ^(2,4138 x AP)	24	0,127	0,461	0,551	0,176

Os modelos de regressão foram aplicados aos dados de validação para todas as espécies estudadas. A correlação entre biomassa fresca observada e a biomassa fresca estimada está apresentada na Tabela 04 e Figura 16. Podemos observar que a estimativa de biomassa fresca teve o maior valor de R² (0,873) para o consórcio (crotalária+guandu). As espécies guandu, estilosante e feijão de porco também apresentaram altos valores de R² (0,835; 0,824 e 0,764, respectivamente). Por outro lado, o calopogônio apresentou baixo valor de R² (0,227).

A correlação entre biomassa seca observada e seca estimada (apresentada na Tabela 04 e Figura 17), mostra que a estimativa de biomassa seca teve o maior R² (0,857) para o consórcio (crotalária+grandu). As espécies feijão de porco e estilosante também apresentaram altos valores de R² (0,731 e 0,776). As espécies calopogônio e guandu apresentaram baixos valores de R² (0,180 e 0,461), sendo o

menor valor para o calopogônio. Para Bendig et al. (2014), os ajustes da qualidade do modelo geralmente são menores para a biomassa seca.

A biomassa fresca obteve melhores resultados por abranger maior número de espécies com altos valores de R^2 . A nível de biomassa seca, observa-se duas espécies com baixos valores de R^2 . Em ambas análises, nota-se que a espécie calopogônio obteve baixos valores de R^2 .

O calopogônio é uma espécie trepadeira e rastejante, sua altura é baixa (média: 0,308 m, conforme Tabela 2) o tempo para crescimento é mais lento quando comparado as demais espécies utilizadas neste estudo. Possoch et al. (2016) relata que nos últimos anos a biomassa foi diretamente modelada usando informações de altura da planta. Os autores mencionam que a altura de plantas derivadas de VANT a partir de MSC multi-temporais pode servir como um bom estimador para massa de forragem. No entanto, o mesmo autor destaca que esse método apresentou fragilidades para baixas alturas de plantas, devido aos erros relacionados serem comparativamente altos.

A partir dos cálculos das equações para valores de RMSE e NSE, observa-se que para biomassa seca os valores de RMSE variaram entre 0,244 e 1,468. Neste caso, apenas o guandu apresentou um ajuste imperfeito, uma vez que os valores de RMSE são considerados perfeitos quando são próximos a 0 (Moriassi et al., 2007). Já os valores de NSE variaram entre -0,194 e 0,873. Valores menores a 0,0 são consideráveis desempenho inaceitável, neste caso, o calopogônio apresentou o valor negativo (-0,194). Os demais valores se enquadram em níveis aceitáveis de desempenho, sendo o único valor próximo a 1 (considerado como um valor ótimo) foi o consórcio (crotalária + guandu) com NSE 0,873.

Para biomassa seca os valores de RMSE variaram entre 0,099 e 0,55. Neste caso todos os valores estão próximos ao ajuste perfeito (0,0). Já para valores de NSE o calopogônio se destaca novamente com valor negativo (-0,346), os demais valores se enquadram em níveis aceitáveis de desempenho, sendo o único valor próximo a 1, novamente, foi o consórcio (crotalária + guandu) com NSE 0,857.

Os testes aplicados ao consórcio (crotalária + guandu) obtiveram resultados precisos, além de se obter valores próximos a qualidade dos ajustes do modelo (RMSE e NSE), destaca-se o consórcio (crotalária + guandu) com altos valores de R^2 , (0,873; 0,857) para biomassa fresca e seca, respectivamente.

Para biomassa fresca e seca, as espécies que melhor se desempenharam foram estilosante e o consórcio, pois apresentam valores de R^2 , RMSE e NSE próximos dos

desejáveis (estilosante: $R^2 = 0,824$; RMSE = 0,244 e NSE= 0,822); (consórcio: $R^2 = 0,873$; RMSE = 0,492 e NSE = 0,873) para biomassa fresca, e (estilosante: $R^2 = 0,776$; RMSE = 0,099 e NSE = 0,775); (consórcio: $R^2 = 0,857$; RMSE = 0,207 e NSE = 0,857) para biomassa seca.

O consórcio (crotalária + guandu) se destaca por não haver uma uniformidade de AP em suas parcelas, uma vez que ambos foram semeados de maneira intercalada, ou seja, as plantas estavam sujeitas a competição e suas alturas variaram dentro de uma mesma parcela. Isso mostra a qualidade das imagens obtidas via VANT, pois até mesmo havendo esta variação de alturas, os resultados foram satisfatórios especificamente para este consórcio.

Os dados de biomassa fresca e seca, levando em consideração o R^2 , RMSE e NSE, variaram para a espécie do guandu (0,835; 1,468 e 0,108, respectivamente) para biomassa fresca e (0,461; 0,551 e 0,176, respectivamente) para biomassa seca. Embora o coeficiente de determinação do guandu tenha sido alto, o valor do erro quadrático não permite afirmar que o ajuste é perfeito para biomassa fresca. Já para biomassa seca, o próprio R^2 determina que o mesmo é um valor baixo. Neste estudo, a AP msc. representa a altura média da planta (AP) de todos os pixels de 0,01 m em uma parcela. Como resultado, não apenas o topo da planta é medido, mas também as partes inferiores. Consequentemente, os detalhes da AP msc. são maiores quando comparado com a AP ref., porque a AP msc. apresenta mais de um pixel por planta e, portanto, não apenas a altura máxima. Outro fator importante consiste na influência do movimento das culturas pelo vento. O vento causa principalmente uma mudança na direção x-y ao avaliar a AP msc. e não influencia significativamente as medidas de AP ref.

A espécie guandu, ao apresentar alto valor de R^2 para biomassa fresca, não justificou seu bom desempenho para valores de RMSE. A morfologia da planta sempre irá influenciar para tais valores, uma vez que, devido ao vento, esta espécie não manteve uma estatura ereta a todo o momento (valores médios de AP ref.: 1,137 m e AP msc.: 0,888 m para guandu, conforme Tabela 02).

O feijão de porco apresentou desempenho aceitável para valores de R^2 , RMSE e NSE. Para biomassa fresca (0,764; 680 e 0,763, respectivamente) e (0,731; 0,240 e 0,729, respectivamente) para biomassa seca. Neste estudo, esta espécie obteve um bom desempenho ao apresentar valores próximos aos excelentes ou dentro dos parâmetros avaliados.

Para biomassa fresca e seca, as espécies que corresponderam com valores aceitáveis para R^2 , RMSE e NSE foram as espécies feijão de porco, estilosante e o consórcio (crotalária + guandu). Para estas espécies, os valores do R^2 (coeficiente de determinação) e NSE (coeficiente de eficiência) foram muito próximos.

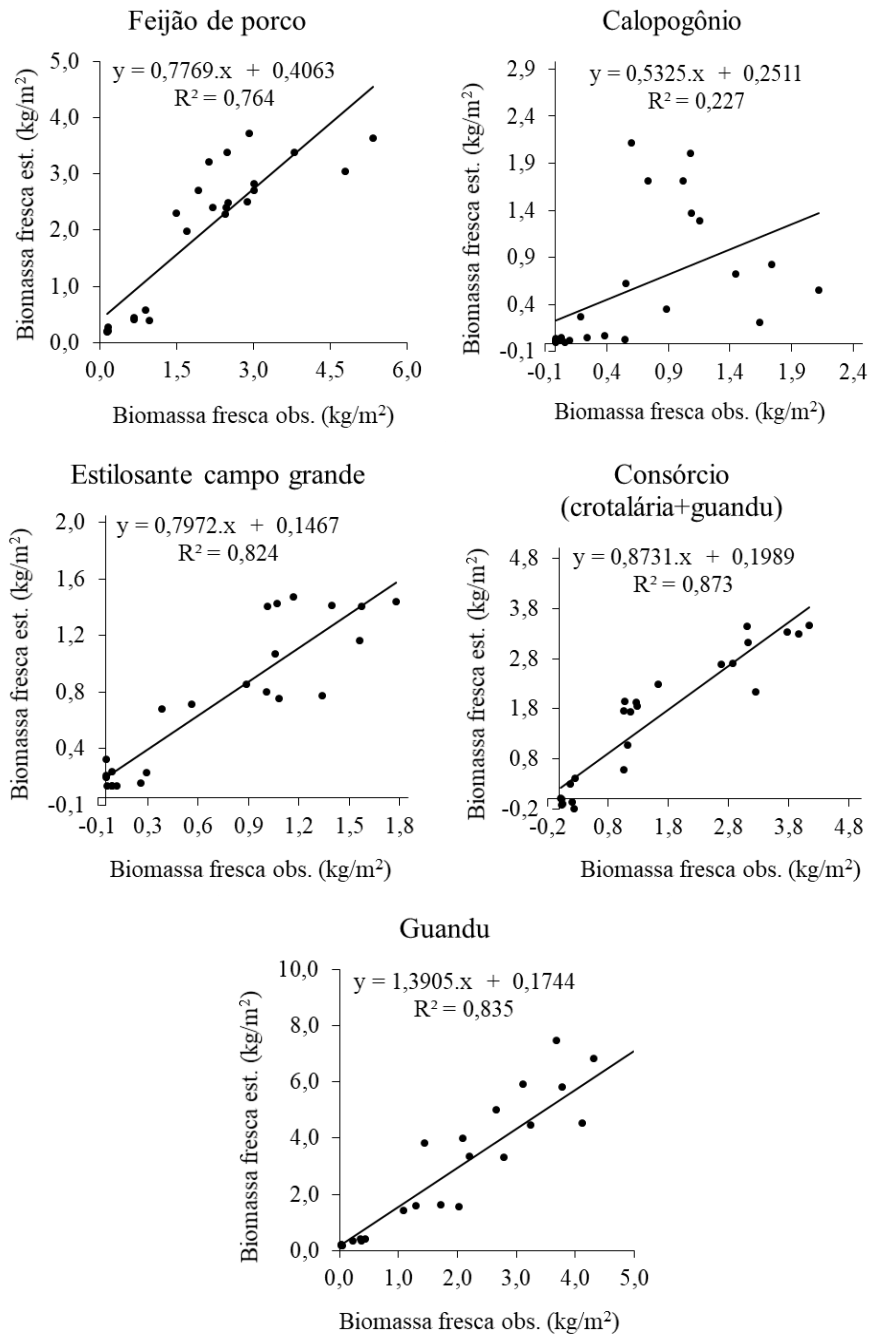


Figura 16. Gráficos de validação para biomassa fresca observada versus biomassa fresca derivada de msc., conforme modelo de regressão da Tabela 04. Fonte: Autor, 2019.

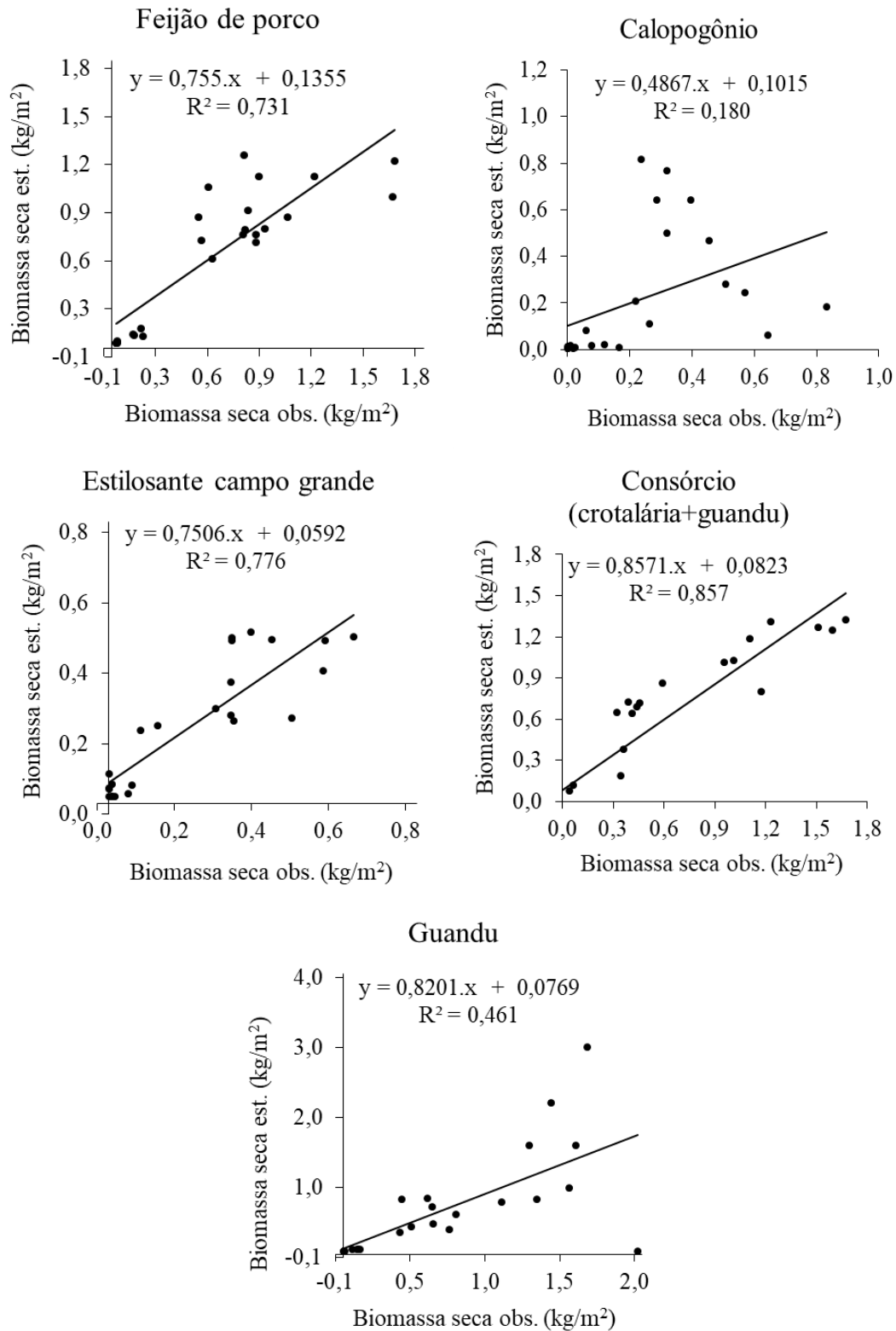


Figura 17. Gráficos de validação para biomassa seca observada versus biomassa seca derivada de msc., conforme modelo de regressão da Tabela 04. Fonte: Autor, 2019.

6. CONCLUSÕES

Este estudo permitiu introduzir um método simples para estimar a biomassa com base na altura da planta derivada de msc. Os coeficientes de determinação (R^2) demonstram que a AP derivada de imagens baseadas em VANT é um indicador adequado para biomassa, no entanto, a morfologia da planta é extremamente significativa como fator de influência sob estes dados – como é o caso de espécies rastejantes e trepadeiras, onde neste estudo, através da espécie calopogônio, não foi possível validar satisfatoriamente os dados.

Trabalhar com diversidade de espécies na aplicação de um único método, permite a avaliação das variações espacial na AP, no crescimento das plantas e, conseqüentemente, na biomassa e o rendimento a serem identificados.

Os modelos de regressão para estimativa de biomassa mostram que todos os modelos apresentam desempenhos diferentes. A partir dos dados de validação do modelo, o maior R^2 ocorre para a biomassa fresca.

Os resultados aqui apresentados precisam ser avaliados para estudos em escala de campo de vários anos para verificar a transferibilidade. Vários fatores, como a disponibilidade hídrica e temperatura, tipo do solo, que são comumente considerados em modelos de crescimento de culturas, não são investigados aqui. Neste sentido, o método deve ser mais investigado, pois usamos apenas dados de um único experimento em um ano.

A AP pode ser modelada com uma precisão muito alta para diferentes estágios de crescimento usando VANT e imagens de alta resolução. Os coeficientes de determinação (R^2) demonstram que a AP derivada de imagens baseadas em VANT é um indicador adequado para biomassa.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMECIN, R.B., *et al.* Effect of leguminous cover crops on the growth and yield of abaca (*Musa textilis* Nee). *Industrial Crops and Product*. V. 21: p. 317-323. 2005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669004000780>. Acesso em: 22/03/2019.
- ALVARES, C. L. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BARETH, G., *et al.* A Comparison of UAV- and TLS-derived Plant Height for Crop Monitoring: Using Polygon Grids for the Analysis of Crop Surface Models (CSMs). *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation*. V. 2. 2016
- BENDIG, J., *et al.* Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. *Remote Sensing*. V. 6, p. 10395-10412. 2014.
- BENDIG, J., *et al.* Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. V.39. p. 79-87. 2015
- BERNARDI, A. C. C. *et al.* Variabilidade espacial de parâmetros físico-químicas do solo e biofísicos de superfície em cultivo do sorgo. *Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande*. V. 18, n. 6. p. 623-630. 2014.
- BRASIL. Decreto – Lei n. 1.177/1971, de 21 de jun. de 1971. Dispõe sobre aerolevantamentos no território nacional, e dá outras providências. Brasília, DF, jun 1971.
- BRASIL. Decreto n. 2.278/1997, de 17 de jul. de 1997. Regulamenta o Decreto-Lei nº 1.177, de 21 de junho de 1971, que dispõe sobre aerolevantamentos no território nacional e dá outras providências. Brasília, DF, jul 1997.
- BRASIL. Portaria n. 953/2014 do Ministério da Defesa, de 16 de abr. de 2014. Dispõe sobre a adoção de procedimentos para a atividade de aerolevanteamento no território nacional. Brasília, DF, abr 2014.
- BIRKHOFFER K., *et al.* Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biol Biochem*. V. 40. p. 2297–2308. 2008.
- CALEGARI, A. Perspectivas e estratégias para a sustentabilidade e o aumento da biodiversidade dos sistemas agrícolas com o uso de adubos verdes. In: LIMA FILHO O. F., AMBROSANO E. J., ROSSI, CARLOS J. D. A. (Ed.) *Adubação Verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática*. Brasília, DF: Embrapa. p.21-36, 2014.
- DUFOUR, A.R., *et al.* Cover Crop (340) in Organic Systems: Kentucky Implementation Guide. National Center for Appropriate Technology (NCAT). 2014.
- D'UTRA, G. R. P. Adubos verdes sua produção e modo de emprego. Sao Paulo: Secretaria da Agricultura Comercio e Obras Publicas do Estado de Sao Paulo. V 76 p. il. 1919.

- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- FREEMAN, K. W., *et al.* By-plant prediction of corn forage biomass and nitrogen uptake at various growth stages using remote sensing and plant height. *Agronomy Journal*. V.99. p. 530-536. 2007.
- FUSTEC J., *et al.* Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agron Sustain Dev*. V. 30. p. 57– 66. 2010
- GATES, D.M., *et al.* Spectral properties of plants. *Applied optics*. V. 4.1: p. 11-20. 1965.
- HATFIELD, J. L. *et al.* Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. *Agronomy Journal*, V. 100, p. 117-131, 2008.
- HERWITZ, S.R., *et al.* Imaging from an unmanned aerial vehicle: agricultural surveillance and decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, V. 44 (1), p. 49-61. 2004.
- HOYOS-VILLEGAS, V.; FRITSCHI, F. B. Relationships among vegetation indices derived from aerial photographs and soybean growth and yield. **Crop Science**, V. 53, n. 6, p. 2631-2642, 2013.
- HUNT E.R. Jr, *et al.* Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*. V. 6, n. 4, p. 359-378, 2005.
- HUNT E.R. Jr, *et al.* Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. *Remote Sens*. V. 2, no. 1. p. 290-305. 2010.
- HOFFMEISTER, D., *et al.* High-resolution Crop Surface Models (CSM) and Crop Volume Models (CVM) on field level by terrestrial laser scanning. *Proc. SPIE 7840, Sixth International Symposium on Digital Earth: Models, Algorithms, and Virtual Reality*, 78400E. 2010.
- JANNOURA, R. *et al.* Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems engineering*. V. 129. p. 341-351. 2015.
- JENSEN, A., *et al.* Estimativa radiométrica do teor de biomassa e nitrogênio da cevada cultivada em diferentes níveis de nitrogênio. *Int. J. Remote Sens*. V. 11 , 1809-1820. 1990.
- JANG, Gab-Sue *et al.* Relating hyperspectral image bands and vegetation indices to corn and soybean yield. *Korean journal of remote sensing*, V. 22. n. 3. p. 183-197. 2006.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote sensing of environment*. V. 1, no. 3. p. 155-159. 1970.
- KOPPE, W., *et al.* Detecção remota de hiperespectral e radar multitemporal para estimar a biomassa de trigo de inverno na planície do norte da China. *Fotogramm. Fernerkund. Geoinf*. V. 3. p. 281-298. 2012.

- KULMAR, L., *et al.* Espectrometria de imagem e ciência da vegetação. Na Espectrometria de Imagem; Van der Meer, FD, Jong, SMD, Eds. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, Holanda. p. 111-155. 2001.
- LAMB, D.W., Brown, R.B. Remote-sensing and mapping of weeds in crops. *Journal of Agricultural Engineering Research*, V. 78 (2). p. 117-125. 2001.
- MIGDALL, S., *et al.* Inversion of a canopy reflectance model using hyperspectral imagery for monitoring wheat growth and estimating yield. *Precision Agriculture*, V. 10. n. 6. p. 508, 2009.
- MORIASI, D.N., *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50, 885–900. 2007.
- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models: part 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* V. 10. p. 282–290. 1970.
- POSSOCH, M., *et al.* Multi-temporal crop surface models combined with the rgb vegetation index from uav-based images for forage monitoring in grassland. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. V. XLI-B1. 2016.
- PIETERS, A. J., *Green Manuring Principles And Practice*. 1927.
- ROUSE, J. W., *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: *Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium*. Washington: NASA, Goddard Space Flight Center. V.1. p. 309-317. 1973.
- SILVA, J. A. A., *et al.* Adubação verde em citros. Jaboticabal: Funep, 1999.
- SHANAHAN, John F. *et al.* Use of remote sensing images to estimate the yield of corn grains. *Agronomy Journal* V. 93. no. 3. p. 583-589. 2001.
- SUGIURA, R., NOGUCHI, N., ISHII, K., 2005. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems Engineering*, 90 (4), 369-379.
- STEENWERTH K., BELINA K.M. Cover crops and cultivation: impacts on soil N dynamics and microbiological function in a Mediterranean vineyard agroecosystem. *App Soil Ecol* V. 40. p. 370–380. 2008.
- Scholberg J.M.S., *et al.* Cover crops for sustainable agrosystems in the Americas. In: Lichtfouse E (ed) *Genetic engineering, biofertilisation, soil quality and organic farming*. Springer, Dordrecht. p. 23–58. 2010.
- Shepherd M. A., *et al.* Managing soil organic matter: implications for soil structure on organic farms. *Soil Use Manag.* V. 18. p. 284–292. 2002.
- THENKABAIL, PS., *et al.* Índices de vegetação hiperspectral e suas relações com as características das culturas agrícolas. *Remote Sens. Environ.* V. 71. p. 158-182. 2000.
- VICENTE, L. E., *et al.* Séries temporais de NDVI do sensor SPOT Vegetation e algoritmo SAM aplicados ao mapeamento de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, p.1337-1345. 2012
- WEZEL, A., *et al.* Agroecological practices for sustainable agriculture. *Agron. Sustain. Dev.* V. 34: p. 1–20. 2014. Disponível em: <https://link-springer-com.ez51.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007/s13593-013-0180-7.pdf>. Acesso em: 25/04/2019.

WUTKE, E.B. Adubação verde: manejo da fitomassa e espécies utilizadas no Estado de São Paulo. Curso sobre adubação verde no instituto agrônomo. Campinas: Instituto Agrônomo V. 1. p.17-29. 1993.

YANG, C., *et al.* Estimativa de imagens hiperespectrais utilizando o mapeador de ângulo espectral (SAM). Trans. ASABE. V 51. p. 729-737. 2008.