



Foto: Pexels

COMUNICADO  
TÉCNICO

133

Campinas, SP  
Dezembro/2019



## Protocolo de campo para investigação, calibração e validação de métodos para estimativa de massa de forragem baseados em sensoriamento remoto orbital e proximal

Gustavo Bayma-Silva  
Célia Regina Grego  
Luciano Vieira Koenigkan  
Sandra Furlan Nogueira  
José Ricardo Macedo Pezzopane  
Renata Carvalho dos Santos  
Patricia Menezes Santos  
Thiago Teixeira Santos  
Celina Maki Takemura

# Protocolo de campo para investigação, calibração e validação de métodos para estimativa de massa de forragem baseados em sensoriamento remoto orbital e proximal<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Gustavo Bayma-Silva, geógrafo, mestre em Sensoriamento Remoto, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP. Célia Regina Grego, engenheira agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP. Luciano Vieira Koenigkan, cientista da computação, mestre em Engenharia Elétrica, analista da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP. Sandra Furlan Nogueira, engenheira agrônoma, doutora em Química na Agricultura e no Ambiente, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP. José Ricardo Macedo Pezzopane, engenheiro agrônomo, doutor em Física do Ambiente Agrícola, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP. Renata Carvalho dos Santos, aluna de graduação em Engenharia Agrônoma, Universidade Brasil, Descalvado, SP, Bolsista do Projeto Pecuária do Futuro, Embrapa Pecuária Sudeste, SP. Patricia Menezes Santos, engenheira agrônoma, doutora em Ciência Animal e Pastagens, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP. Thiago Teixeira Santos, cientista da computação, doutor em Ciências da Computação, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP. Celina Maki Takemura, cientista da computação, doutora em Ciências da Computação, pesquisadora da Embrapa Territorial, Campinas, SP.

## Resumo

A massa de forragem é uma informação de grande importância no manejo de pastagens e de animais em sistemas produtivos. Infelizmente, ainda não existem metodologias bem estabelecidas e fundamentadas para a estimativa dos valores de massa de forragem em larga escala, que permitam sua ampla adoção nos sistemas pecuários e melhora dos processos decisórios e de gestão. Neste trabalho, apresentamos um protocolo de campo para o levantamento de dados necessários ao desenvolvimento de metodologias para estimativa de massa de forragem a partir de sensoriamento remoto orbital e proximal, realizado com

o uso de imagens de satélite e Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) respectivamente. O presente protocolo descreve os procedimentos de campo e de pré-processamento de dados, ilustrados com exemplos oriundos de estudos em curso na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). O conjunto de dados gerados por esses procedimentos será empregado na calibração do modelo agrometeorológico SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*), para estimação de massa de forragem por sensoriamento orbital, e no desenvolvimento de novos métodos fotogramétricos para estimação de massa de forragem em alta resolução com o uso de VANTs.

# 1. Introdução

O sensoriamento remoto se apresenta como uma ferramenta viável para mensuração e estimativa de parâmetros biofísicos em escala apropriada à distribuição das pastagens no território nacional. Neste contexto, as pastagens plantadas têm sido investigadas com diversos objetivos, dentre eles a identificação da sua distribuição na superfície terrestre (TerraClass, 2015), a discriminação entre pastagens plantadas e naturais (Silva et al., 2011) e qualificação da qualidade das pastagens por meio da estimativa multitemporal de seus parâmetros biofísicos (Numata et al., 2007; Bayma-Silva et al., 2016). O presente trabalho apresenta um protocolo de campo para a investigação, calibração e validação de métodos para estimativa de massa de forragem obtida via *modelagem agrometeorológica* por espectroscopia e por técnicas de *visão computacional* a partir de imagens aéreas próximas, caracterizando assim a abordagem em dois níveis, *orbital* e *proximal*.

A espectroscopia envolve o estudo das interrelações entre os atributos biofísicos de determinados alvos e suas características espectrais. Quando aplicados à vegetação, esses estudos buscam o refinamento de modelos que possam estimar atributos biofísicos a partir da radiação eletromagnética refletida pelos dosséis (ou pela vegetação) que é medida por sensores remotamente situados. No presente contexto, as informações de massa de forragem obtidas em campo são essenciais para a validação e calibração do atributo biofísico massa ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), estimado a partir de a partir da

modelagem agrometeorológica.

De forma geral, modelos agrometeorológicos utilizam algoritmos para converter medidas radiométricas em fluxos de energia e, conseqüentemente, valores como a evapotranspiração e a biomassa do alvo estudado. O *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving – SAFER* (Teixeira et al., 2014) será o modelo agrometeorológico espectral adotado para estimar a massa de forragem em unidades experimentais. Este modelo baseia-se na modelagem da razão entre evapotranspiração atual e evapotranspiração de referência ( $ET/ET_0$ ) e é caracterizado pela não obrigatoriedade da utilização da banda termal, uma vantagem quando comparado a outros modelos, como *Surface Energy Balance Algorithm for Land – SEBAL* (Bastiaanssen et al., 1998) e *Surface Energy Balance System – SEBS* (Su, 2002). Além da não necessidade da identificação de condições hidrológicas extremas em uma imagem (pixel quente e pixel frio), o SAFER pode ser aplicado utilizando-se satélites e sensores, e.g. Landsat, MODIS, RapidEye e Sentinel-2. O *primeiro objetivo* do presente protocolo é a obtenção dos dados necessários à calibração do modelo SAFER.

Recentemente, uma nova forma de sensoriamento por imagem vem se tornando comum: os *Veículos Aéreos Não-Tripulados* (VANTs) se tornaram uma opção viável para o sensoriamento no meio rural. Embora não apresentem uma escala de cobertura comparável a do sensoriamento por satélite e necessitem da operacionalização de voos nas fazendas, apresentam a vantagem de uma maior resolução espacial, que pode ser inferior a 1 GSD (1 cm/pixel), e maior re-

solução temporal, já que os voos podem ser realizados conforme a necessidade de dados. Outra vantagem do imageamento por VANTs é não ser afetado pela oclusão de nuvens. Porém, modelos para estimativa de massa de forragem a partir de imagens de VANTs são uma área nova de pesquisa (Von Bueren et al., 2015; Possoch et al., 2016; Forsmo et al., 2018; Rueda-Ayala et al., 2019) e ainda não existem modelos consagrados ou validados para pastagens tropicais e suas forrageiras. Neste trabalho, apresentamos protocolos de campo para a investigação de duas alternativas de estimativa de massa por sensoriamento próximo: fotogrametria 3-D e análise morfológica de padrões em imagens 2-D.

O sensoriamento próximo por VANTs é o resultado da união de duas tecnologias que se tornaram maduras nos últimos 10 anos: os veículos multirrotor (Yang et al., 2017) e a fotogrametria por *structure-from-motion* (Westoby et al., 2012; Granshaw, 2016). Neste protocolo, as imagens utilizadas são imagens RGB no espectro visível, obtidas pela câmera do VANT durante uma missão, a rota de voo planejada para o veículo durante o mapeamento da área. Na literatura recente, estimativas de biomassa têm sido realizadas com o uso de modelos de altura de dossel (*Canopy Height Model* – CHM) (Zhang et al., 2018; Viljanen et al., 2018) e modelos de superfície de cultura (*Crop Surface Model* – CSM) (Possoch et al., 2016; Lussem et al., 2018). Tais modelos são por sua vez derivados de modelos tridimensionais obtidos por fotogrametria baseada em *structure-from-motion*. Estimada a altura, pela diferença entre a superfície do terreno e o topo do dossel, técnicas

de regressão são aplicadas para estimar a biomassa a partir de amostras coletadas em campo. Para que seja possível relacionar as amostras a sua localização espacial nos modelos, é necessário um registro apropriado. O *segundo objetivo* deste protocolo é apresentar os procedimentos necessários para o imageamento das áreas e registro espacial das amostras de forma que seja possível:

- obter a estrutura tridimensional da área em alta resolução, permitindo a produção de DEMs, DTMs<sup>1</sup> e ortomapas, necessários à estimativa da altura (CHMs e CSMs);
- estabelecer a ligação entre os pontos de coleta e sua localização em imagens, mapas e modelos.

O presente trabalho detalha o protocolo utilizado, exemplificado pelos estudos em campo conduzidos durante sua construção. Tal protocolo será utilizado no desenvolvimento de metodologias para estimação de massa de forragem, ainda em curso. O desenvolvimento conjunto visa estabelecer a complementariedade entre o sensoriamento orbital (larga cobertura, baixa resolução) e o sensoriamento proximal (baixa cobertura, alta resolução) e sua integração em sistemas para monitoramento da massa de forragem em pastagens.

O restante do texto é organizado da seguinte forma. Na Seção 2, descrevemos a área de estudo. O protocolo de campo, descrevendo os processos de amostragem, corte e voo com

1. Modelo digital de elevação (*digital elevation map* – DEM) e modelo digital de terreno (*digital terrain map* – DTM), ver Granshaw (2016).

VANTS é descrito na Seção 3. A Seção 4 descreve os procedimentos de pré-processamento dos dados coletados, que produzem as bases de dados necessárias aos estudos de estimativa de massa de forragem por sensoramento remoto. A Seção 5 apresenta então algumas considerações finais.

## 2. Área de estudo

O protocolo foi desenvolvido e vem sendo conduzido na Fazenda Canchim, sede da Embrapa Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos, SP, entre as coordenadas geográficas 21°54', 21°59' Sul, 47°48' e 47°52' Oeste. A fazenda possui uma área de 2.662 ha.

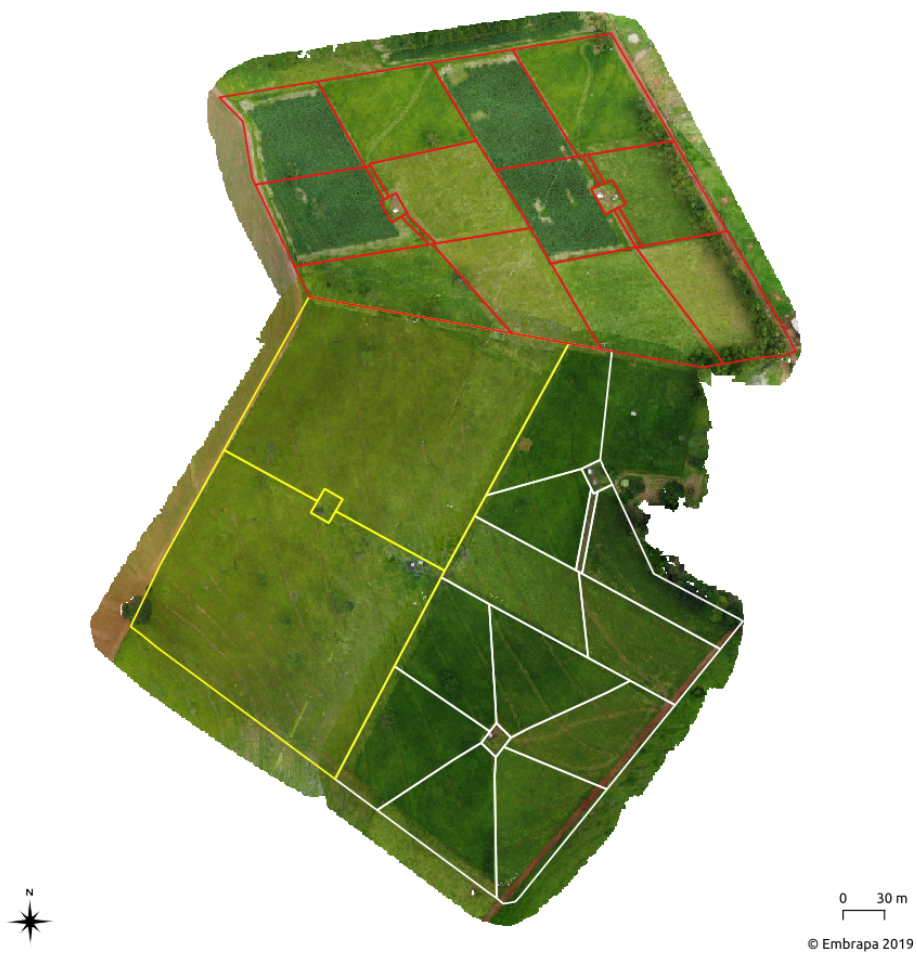
O meio físico da fazenda pode ser caracterizado pela predominância de declividades entre 2 e 10 graus (1.629 ha) e de Latossolos Vermelho-Escuro e Vermelho-Amarelo (1.550 ha). A região encontra-se em domínio fitogeográfico de Cerrado, com inclusões de Mata Mesófila Semidecídua (fragmentos de Mata Atlântica), sob influência de clima Mesotérmico Brando. O clima é classificado como Cwa (Köppen), com duas estações bem definidas: estação seca – abril a setembro, com temperatura e precipitação médias de 19,9°C e 250 mm, respectivamente; estação chuvosa – outubro a março, com temperatura e precipitação médias de 23,0°C e 1.100 mm, respectivamente (Calderano Filho et al., 1998).

As informações de campo que estão sendo avaliadas no estudo para o qual o presente protocolo foi desenvolvido foram obtidas em três sistemas de produ-

ção conduzidos na fazenda e descritos a seguir: a) *Sistema Intensivo* (INT), sistema com lotação rotacionada; b) *Sistema de integração-lavoura-pecuária* (iLP), sistema com lotação rotacionada e rotação de cultura anual em um dos piquetes em ciclos de 4 anos (três anos com pastagens e um ano com milho); c) *Sistema Extensivo* (EXT), sistema com lotação contínua (Figura 1).

As pastagens nos sistemas INT e iLP foram estabelecidas em 2012 com *Urochloa* (sin. *Brachiaria*)<sup>2</sup> *brizantha* (Hochst ex A. Rich.) Stapf cv. Piatã. Cada um dos sistemas é composto por duas repetições de áreas de pastagens, cada uma com aproximadamente 3 ha, divididas em 6 piquetes, manejadas sob sistema de pastejo por lotação rotacionada. A pastagem do sistema EXT foi estabelecida em 2007 com *Urochloa* (sin. *Brachiaria*) *decumbens* (Stapf) R. Webster, sem ter sido fertilizada desde então. O sistema extensivo possui duas áreas de pastagens, com 2,85 ha cada, manejadas sob sistema de pastejo por lotação contínua. Maiores detalhes sobre os manejos realizados nos sistemas de produção são apresentados na Tabela 1

2. Na notação científica, o gênero foi reclassificado recentemente. A notação "(sin. *Brachiaria*)" indica que *Urochloa* e *Brachiaria* são sinônimas.



**Figura 1:** Área experimental inserida na Fazenda Canchim - Área Experimental de Pecuária Intensiva (INT - em branco) - Área Experimental de Integração Lavoura Pecuária (iLP - em vermelho) - Área Experimental de Pecuária Extensiva (EXT - em amarelo).

Ilustração: Thiago Teixeira Santos



## 3. Protocolos de amostragens em campo

### 3.1. Determinação da massa de forragem

Idealmente, para se quantificar a massa de forragem (MF) de uma pastagem, toda forragem do piquete deve ser cortada ao nível do solo, secada e pesada (Pedreira, 2002), mas isto seria inviável operacionalmente. Assim, o método escolhido para medir a MF foi o método indireto da dupla amostragem, descrito por Wilm et al. (1944). Este método consiste em relacionar medidas não destrutivas (altura do dossel) com amostragens destrutivas (massa de forragem). A determinação do número de pontos amostrais para a obtenção da altura da forragem foi orientada de forma a melhor representar espacialmente a variabilidade da cobertura vegetal dos sistemas pecuários.

Apesar da altura do dossel ser uma característica da vegetação altamente relacionada com a MF, existe um problema relativo à densidade da vegetação, que não é constante ao longo dos estratos. Portanto, a altura do dossel como medida indireta é melhor relacionada com a massa de forragem se a densidade do dossel for uniforme e constante ao longo de todo o perfil. Como isso é improvável, mesmo nos dosséis mais homogêneos, a MF será, não raramente, superestimada quanto mais alto for o dossel, porque as maiores densidades são frequentemente encontradas nos estratos inferiores, próximo à base da vegetação (Pedreira, 2002).

No caso das avaliações realizadas nas

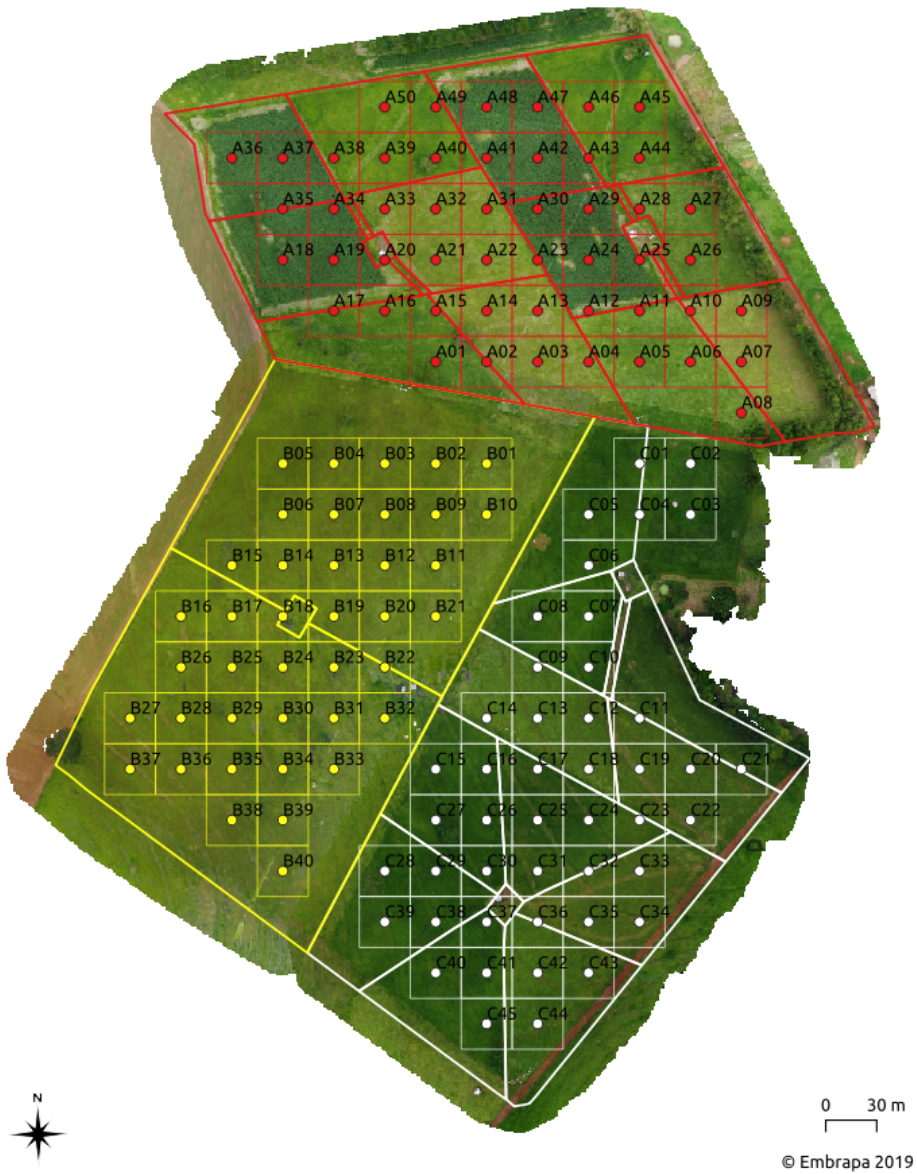
pastagens de *Urochloa brizantha* cv. Pitã e *Urochloa decumbens*, duas ações foram tomadas ao longo do período para diminuir os problemas em superestimar a massa da forragem: 1) as equipes de campo foram orientadas para evitar levar em consideração as inflorescências no momento de medida de alturas e 2) os diferentes regimes de pastejos - lotação contínua (extensivo) e rotacionada (pastejo, pré-pastejo, pós-pastejo, em crescimento) - foram avaliados separadamente e bimestralmente para a análise de regressão entre altura e massa de forragem e posterior calibração.

#### 3.1.1. Medidas de altura do dossel de forragem

O número de pontos amostrais para a obtenção da altura do dossel considerou a grade de pixels da imagem Landsat, quadrantes de 900 m<sup>2</sup>, projetadas na superfície do solo nos sistemas de produção Intensivo, iLP e Extensivo (Figura 2). Os centroides dos pixels projetados foram demarcados por estacas numeradas. A forma utilizada para definir a localização dos centroides foi a triangulação por trenas e distâncias previamente conhecidas, baseada no mapa planimétrico digital da fazenda. As cercas e os mourões foram usados como referência inicial.

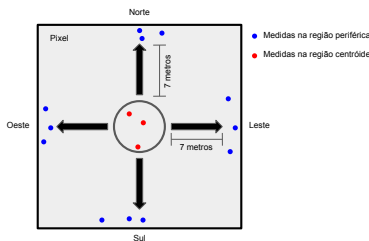
A periodicidade das coletas de altura do dossel deve considerar a resolução temporal do satélite escolhido. No estudo, o satélite escolhido foi o Landsat-8, que revisita a mesma área a cada 16 dias (Tabela 2). Assim, em função da viabilidade operacional, foi definido o período de 32 dias para as campanhas de campo. No caso das datas de ima-





**Figura 2:** Projeção dos pixels do satélite Landsat-8 nos Sistemas iLP, Intensivo e Extensivo e de seus centroides, orientadores para a medidas das alturas da forragem.

Ilustração: Thiago Teixeira Santos



**Figura 3:** Ilustração do esquema de Medições de altura do dossel de forragem em relação ao pixel da imagem de satélite.

Ilustração: Luciano Vieira Koenigkan

geamento que ocorreram em sábados, domingos e feriados, as coletas de altura foram realizadas em datas próximas como segue na Tabela 3.

Para cada pixel projetado são realizadas 15 medições de altura do dossel da forragem: 3 medições próximas ao centro do pixel e as demais em regiões periféricas a 7 metros do centro, nas direções norte, sul, leste e oeste (Figura 3).

Para cada situação que será avaliada (sistema de produção/piquetes), a quantidade de pixels sobre os piquetes irá depender do seu formato e tamanho. Na Tabela 4 são apresentados os números de pixels projetados em cada piquete estudado, assim como o número de medições de altura registrados a cada 32 dias. É importante ressaltar que todas as medições devem ser tomadas dentro do piquete mesmo que a área do pixel ultrapasse a área do piquete.

As alturas foram medidas com o auxílio de uma régua quadrangular e uma lâmina de acetato, medida conhecida como altura não comprimida. A altura da forragem foi mensurada pela posição

onde a lâmina de acetato foi suspensa pelo dossel da forragem, a partir do nível do solo, como mostra a imagem da Figura 4.

### 3.1.2. Coletas destrutivas de massa de forragem

Para a obtenção de uma análise de regressão e com isso a calibração das alturas medidas a cada 32 dias nos sistemas pecuários, medições de alturas variadas do dossel e depois o corte da forragem (método direto) devem ser realizadas de forma a contemplar a variação temporal e espacial da massa de forragem.

Durante o estudo, essas coletas foram realizadas bimestralmente, no período de dezembro de 2017 a dezembro de 2019. A estrutura do dossel (relação altura  $\times$  massa) irá se modificar ao longo do ano hidrológico e essas mudanças precisam ser monitoradas. Além disso, a avaliação deve considerar diferentes espécies de forragens, sistemas de produção, situações de manejo e as variações de altura da forragem no momento da coleta. O método preconiza a escolha de áreas homogêneas (no mesmo piquete) com alturas “baixas”, alturas “médias” e alturas “altas” de dossel da pastagem.

No estudo em questão, quadrantes de  $0,25 \text{ m}^2$  de área (que podem variar de tamanho, ocorrendo até  $1 \text{ m}^2$ ) foram posicionados nos sistema de produção Extensivo (capim *Urochloa decumbens*) em três situações de altura de forragem (baixa, média e alta), e em 10 pontos em cada uma delas. No sistema de produção Intensivo (capim *Urochloa brizantha* cv. Piatã) os quadrantes foram posicionados em 3 pontos em cada uma das três situações de altura de forra-

**Tabela 2:** Datas de imageamento do satélite Landsat na Fazenda Canchim no período de dezembro de 2017 a dezembro de 2019.

Ano	Datas							
2017	dez. 08	dez. 24						
2018	jan. 09	jan. 25	fev. 10	fev. 26	mar. 14	mar. 30	abr. 15	mai. 01
	mai. 17	jun. 02	jun. 18	jul. 04	jul. 20	ago. 05	ago. 21	set. 06
	set. 22	out. 08	out. 24	nov. 09	nov. 25	dez. 11	dez. 27	
2019	jan. 12	jan. 28	fev. 13	mar. 01	mar. 17	abr. 02	abr. 18	mai. 04
	mai. 20	jun. 05	jun. 21	jul. 07	jul. 23	ago. 08	ago. 24	set. 09
	set. 25	out. 11	out. 27	nov. 12	nov. 28	dez. 14	dez. 30	

**Tabela 3:** Datas de coleta de altura do dossel da forragem nas áreas de estudo da Fazenda Canchim no período de setembro de 2017 a dezembro de 2019.

Ano	Datas							
2017	dez. 08							
2018	jan. 09	fev. 08	mar. 14	abr. 16	mai. 17	jul. 20	ago. 21	set. 21
	out. 24	nov. 26	dez. 27					
2019	jan. 28	mar. 01	abr. 02	mai. 03	jun. 05	jul. 08	ago. 08	set. 09
	out. 11	nov. 12	dez. 13					

**Tabela 4:** Número de pixels demarcados e números de alturas medidas em cada um dos piquetes de cada sistema avaliado.

Nºdo Piquete	iLP (Sistema 1)	iLP.1 (Sistema 2)	Int (Sistema 3)	Int.1 (Sistema 4)	Ext (Sistema 5)	Ext.1 (Sistema 6)
Nº de pixels/Nº alturas medidas mês <sup>-1</sup>						
1	3/45	5/75	5/75	4/60	18/270	22/330
2	3/45	5/75	5/75	3/45		
3	3/45	5/75	3/45	4/60		
4	3/45	4/60	4/60	4/60		
5	7/105	5/75	2/30	5/75		
6	5/75	2/30	1/15	5/75		



**Figura 4:** Medida de altura da forragem através da régua quadrangular e lâmina de acetato.

gem (baixa, média e alta) nas condições distintas de pré-pastejo, pós-pastejo, em pastejo e em crescimento (intermediário) encontradas no sistema. O sistema iLP não foi utilizado para as coletas destrutivas pois apresentava a mesma espécie de capim e lotação rotacionada como no sistema Intensivo.

Recomenda-se que o número de coletas destrutivas, por contexto específico (espécie de capim, situações de pastejo, etc) deve ser maior que 3 pontos (alto, médio e baixo) e em quantia adequada às possibilidades de corte, pesagem e processamento da equipe de investigação (número de coletores, material de coleta, espaço em estufa, etc). Quanto maior o número de amostras para a realização de uma análise de regressão, maior a chance de obtenção de um bom modelo preditivo.

Após as demarcações, a determinação das alturas nos quadrantes foi re-

alizada por meio da régua quadrangular e da folha de acetato e a forragem foi cortada ao nível do solo e pesada para obtenção da massa de matéria fresca total (MFT), como visto na Figura 5. Uma porção desse material (alíquota 1), com massa conhecida, foi retirada para secagem em estufa de circulação de ar a 65°C por 72 horas, até peso constante. No sistema Extensivo, uma amostra composta (alíquota 2) para cada uma das alturas (10 amostras por altura) foi separada e no sistema Intensivo, uma amostra composta para cada uma das alturas (3 amostras por altura) foi separada. As amostras compostas foram então destinadas à separação botânica (separação em lâminas foliares (LF), bainha + colmo (BC) e material morto (MM)), com nova pesagem de cada fração, posterior secagem e nova pesagem.

Das variáveis que serão correlaciona-

das com os valores estimados pelo modelo SAFER, a massa fresca total (MFT) foi determinada de forma direta pelo método destrutivo. A massa seca obtida a partir da alíquota 1 (massa fresca inicial conhecida), foi utilizada para o cálculo da variável massa seca total (MST). As variáveis massa verde fresca (MVF) e massa morta fresca (MMF) foram calculadas a partir das frações: lâminas foliares (LF), bainha + colmo (BC) e material morto (MM) (alíquota 2 ou amostra composta) pesadas em momento anterior a secagem. A MVF foi calculada, fundamentalmente, em função do modelo SAFER, pois neste a estimativa dos parâmetros biofísicos são originados a partir do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Como este índice é sensível à presença de clorofila na folha, quanto mais verde, maior a presença de clorofila, sendo esta a melhor forma de correlacionar a massa de forragem estimada em campo com a estimada no modelo SAFER.

Pelas etapas acima é possível realizar as análises de regressão entre as alturas não comprimidas e as massas de forragem em diferentes situações de pastejo. A partir das análises de regressão, equações de calibração são geradas e usadas para estimar a massa de forragem diária ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) com os valores das alturas mensais medidas nos sistemas pecuários. As curvas de calibração somente são utilizadas para cálculos das massas de forragens de medidas de alturas de forragens do mês atual, anterior e subsequente.

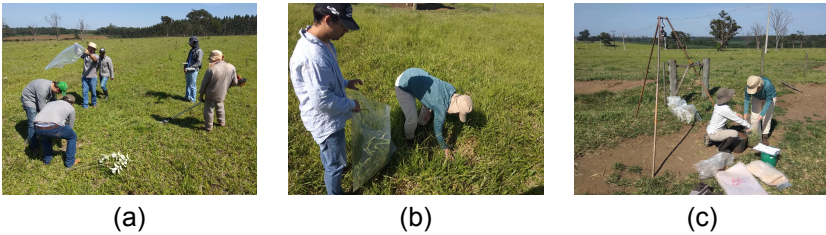
### 3.1.3. Coletas destrutivas de massa de forragem específicas para VANT

O protocolo para coleta de amostras para sensoriamento remoto próximo apresenta particularidades devido à alta resolução, inferior a 1 cm/pixel. As amostras precisam ser coletadas e registradas nas imagens com precisão de centímetros pois, caso contrário, irregularidades como segmentos de solo exposto ou espaços entre touceiras podem prejudicar severamente as estimativas. Para tanto são utilizados marcadores com dimensões  $20 \times 20$  cm que podem ser identificados nos orto-mapas gerados com as imagens de VANT (Santos; Koenigkan, 2018). Cada marcador apresenta um padrão único, associado a um identificador numérico (Figura 6). Em um voo de VANT após o corte, o marcador é posicionado no centro da área de  $0,25 \text{ m}^2$  onde o corte foi realizado (Figura 7).

## 3.2. Protocolo para imageamento por VANTs

A realização de voos para aquisição de imagens segundo as orientações deste protocolo pode ser feita com o uso de modelos de VANT dotados de câmera RGB com especificações suficientes para estabelecer a resolução espacial das imagens em pelo menos 1 GSD, resultante da relação entre resolução da câmera (considerando as características de seu sensor e lentes) e a altura de voo em que as imagens serão tomadas.

O imageamento deve ser realizado com a câmera apontada para o ponto



**Figura 5:** a) Corte da forragem no quadrante. b) Coleta: a forragem cortada é inserida em um saco numerado. c) Os sacos numerados são levados para pesagem, separação e secagem.

no solo definido pela projeção vertical da posição da aeronave (direção *Nadir*), com foco ajustado para o infinito e demais ajustes, considerando as condições de iluminação encontradas sempre procurando obter imagens nítidas, livres de borramento por movimento, exposição adequada, permitindo a visualização do contorno das estruturas da pastagem. Em dias com nuvens esparsas o uso da câmera no modo de exposição automática pode ser uma alternativa prática uma vez que nessas condições a iluminação do ambiente pode variar consideravelmente ao longo do voo.

O plano de voo deve ser ajustado para aquisição de imagens com GSD de pelo menos 1 cm/pixel e 70% de sobreposição vertical e horizontal entre as imagens. A criação do plano de voo a ser utilizado no imageamento envolve os seguintes passos:

- Determinar os limites da área imageada e sua representação em um arquivo vetorial no formato KML (Keyhole Markup Language), por

meio do uso do Sistema de Informação Geográfica, QGIS;

- Importar o arquivo com os limites da área de estudo para um aplicativo de planejamento de voo que suporte entradas em KML como o Drone Harmony (aplicativo para dispositivo móvel Android) ou o DJI GS (aplicativo para dispositivos móveis iOS) - alternativamente, os limites da área podem ser definidos diretamente nos aplicativos de planejamento de voo, ver Santos e Koenigkan (2018) para opções;
- Criar plano de voo com os parâmetros adequados para obtenção das imagens com as especificações pretendidas.

O plano de voo criado pode ser utilizado para realização dos imageamentos subsequentes da mesma área, desde que se deseje manter as mesmas características de GSD e sobreposição. Uma vez que se tenha o plano definido, é possível sair a campo para realização do voo



Foto: Luciano Vieira Koenigkan

**Figura 6:** Marcador é posicionado dentro da área do quadrante após o corte para que a área seja identificada.

para aquisição das imagens. Após a realização do voo, a etapa de aquisição de imagens está finalizada tendo início a etapa de pré-processamento de imagens de VANT descrita na Seção 4.2.

Nas datas em que ocorreram coletas destrutivas específicas para desenvolvimento e calibração do método de estimativa, a partir de imagens obtidas com o uso de VANT descrita na Seção 3.1.3, são realizados dois voos sobre a área de interesse, sendo um voo feito antes do corte e outro posterior ao corte.

A realização de dois voos se faz necessária, pois no primeiro voo são obtidas imagens da pastagem sendo essas imagens que serão correlacionadas com os dados obtidos na coleta destrutiva e o segundo voo serve para identificar os pontos de coleta por meio dos marcadores dispostos exatamente sobre os locais onde foram realizados os cortes.

Mais informações sobre o planejamento de voos e sua execução para fins

de aquisição de imagens podem ser obtidas em Santos e Koenigkan (2018), incluindo referências para as normas de segurança que sempre devem ser observadas durante a condução desse tipo de atividade.

Para a aquisição de imagens durante os voos realizados na área de estudo foi utilizado um quadricóptero DJI Phantom 4 Pro, dotado dos sistemas de posicionamento GPS e GLONASS, autonomia de até 30 minutos e velocidade máxima de 50 km/h no modo de voo utilizado. A câmera embarcada na aeronave possui sensor de 1" CMOS com resolução de 20 Megapixels, FOV (campo de visão) de 84°, obturador mecânico de 8 - 1/2000s, obturador eletrônico 8 - 1/8000s, faixa de ISO para fotos de 100 - 3200 (auto); 100 - 12800 (Manual) e está acoplada por meio de um *gimbal* ativo para estabilização das imagens. Para a câmera utilizada no imageamento da área de estudo de forma a se obter o GSD desejado de



**Figura 7:** (Esquerda) Conjunto de marcadores posicionados após o corte e coleta da forragem em um piquete da área do intensivo. (Direita) Detalhe exibindo seis marcadores.

1 cm/pixel, os voos foram feitos a uma altura de 30 metros do solo (a partir do ponto de decolagem).

Os voos para imageamento da área de estudo foram realizados nas datas de passagem do satélite Landsat-8 e nos dias em que a passagem do satélite ocorreram em sábados, domingos e feriados as aquisições de imagens foram realizadas em datas próximas. Quando a data pretendida apresentou condições climáticas que impossibilitaram o voo, como chuva, o imageamento ocorreu em data próxima subsequente com condições adequadas para a realização do voo.

## 4. Protocolo de pré-processamento dos dados

### 4.1. Pré-processamento de dados de massa de forragem nas coletas destrutivas

A quantificação da massa de forragem a cada 32 dias é baseada em amostragens indiretas (medidas de altura do dossel) que devem ser calibradas contra valores reais de massa de forragem medidos por amostragem direta (destrutiva).

Desta forma, a calibração deve ser feita abrangendo toda a variação de valores de massa de forragem, ou seja,



contemplar as espécies de capins existentes, a sazonalidade, os tipos de sistemas de produção e as situações de pastejo. No caso do estudo foram feitas coletas destrutivas bimestrais por dois anos hidrológicos, em dois sistemas de produção (cada um com uma espécie de capim) e em cinco situações de pastejo da forragem.

Pelas situações avaliadas é possível, então, por uma análise de regressão (equação de calibração), estabelecer a relação funcional entre a leitura fornecida pelo método indireto e a massa de forragem, o que envolve a avaliação dos parâmetros da regressão como coeficiente de determinação e erro padrão da regressão (raiz quadrada do quadrado médio do resíduo).

A Figura 8, como exemplo, apresenta as datas em que foram feitas as amostragens destrutivas e os resultados dos coeficientes de determinação obtidos a partir das análises de regressão dos dados de MFT, MST, MFV e MMF para o sistema Extensivo. Esses coeficientes de determinação são oriundos das relações entre as massas de forragem e as alturas determinadas em campo para a geração das curvas de calibração que irão conduzir as estimativas das massas de forragens a partir das alturas medidas no campo. Os coeficientes de determinação para MMF apresentaram resultados inferiores pois esse parâmetro varia bastante nas amostras, ou seja, a massa morta na forragem é variável numa mesma data. De maneira geral, pelos coeficientes de determinação obtidos (todos os sistemas), 70% deles acima de 0,7, as equações de regressões obtidas foram capazes de modelar (explicar) com uma magnitude de 70 a

93% as massas em campo por medidas de alturas das forragens.

## 4.2. Pré-processamento de imagens de VANT

Há duas tarefas de pré-processamento necessárias após a realização do imageamento por VANTs: a construção de orto-mapas digitais e o registro entre imagens e pontos de coleta, identificados pelos marcadores apresentados na Seção 3.1.3. Um orto mapa digital é um mapa produzido com uma *ortofoto*, uma imagem obtida pela projeção ortogonal da superfície imageada no plano do mapa. A superfície é obtida por *structure from motion* e visão estéreo múltipla (Westoby et al., 2012) e a projeção ortogonal compensa distorções causadas por diferenças de orientação da câmeras e pelo relevo. Tal superfície ainda é utilizada na produção de mapas de elevação como DEMs e DTMs, utilizados na estimativa de altura da vegetação (Possoch et al., 2016; Lussem et al., 2018).

Orto-mapas, mapas de elevação e modelos tridimensionais da área sensorada podem ser produzidos a partir das imagens RGB capturadas por VANTs de acordo com o protocolo descrito na Seção 3.2. Sistemas gratuitos e de código aberto como o OpenDroneMap (Toffanin, 2019) e o MicMac (Rupnik et al., 2017) podem ser empregados para este fim, além de alternativas comerciais como Pix4D<sup>3</sup> e Agisoft<sup>4</sup>. Em Santos e Koenigkan (2018), apresentamos um tutorial detalhado do uso do OpenDrone-

3. Disponível em: <<https://www.pix4d.com>>.

4. Disponível em: <<https://www.agisoft.com>>.



**Figura 8:** Valores dos coeficientes de determinação obtidos nas análises de regressão de variáveis do sistema Extensivo.

Map para produção de orto-mapas, nuvens de pontos 3-D (*point clouds*), DSMs e DTMs. Seguidas as instruções daquele tutorial e da Seção 3.2 deste protocolo, obtêm-se arquivos GeoTIFF contendo mapas de alta resolução (GSD inferior a 1 cm/pixel) que podem ser visualizados e manipulados em sistemas GIS como o ArcGIS e o QGIS.

A etapa seguinte é localizar os pontos de coleta das amostras de forragem, identificando corretamente sua posição nas imagens obtidas pelo VANT. Considere um orto-mapa  $O_p$  obtido a partir de um conjunto  $S_p$  de imagens aéreas coletadas antes da realização dos cortes (coleta das amostras). A coleta é então realizada e os marcadores devidamente posicionados (Seção 3.2). Após a coleta, um novo voo é realizado, obtendo-se um conjunto de imagens  $S_c$ , utilizado para produzir um segundo orto-mapa,  $O_c$ .

Os orto mapas  $O_p$  e  $O_c$  devem estar alinhados, de forma que marcadores localizados em  $O_c$  sejam corretamente mapeados para as devidas posições em  $O_p$ . O alinhamento é realizado com o uso de pontos de controle em solo (*ground control points* - GCPs). Se conhecidos antes da produção dos orto-mapas, o OpenDroneMap pode empregar os GCPs de forma que  $O_p$  e  $O_c$  já estejam devidamente alinhados. Caso os GCPs sejam identificados após a produção dos orto-mapas, a transformação afim que alinha os dois orto-mapas pode ser estimada e aplicada com o uso de sistemas GIS ou da biblioteca para manipulação de dados geoespaciais GDAL<sup>5</sup>.

Considere os marcadores devidamente localizados no orto-mapa  $O_c$ . Como os orto-mapas estão alinhados,

5. Ver `GCPsToGeoTransform` na documentação da GDAL, disponível em <<https://gdal.org>>.

podemos identificar o local de amostragem antes do corte no orto-mapa  $O_p$ , de forma que podemos rapidamente extrair *recortes* dos orto-mapas que correspondem a uma amostra antes e após o corte. O objetivo é compor uma base de dados na qual há uma imagem de cada amostra antes do corte, posteriormente associada às medidas de massa de forragem obtidas após corte, separação e pesagem. Contudo, há um problema em extrair tais imagens diretamente do orto-mapa: o *pipeline* de visão estéreo, triangularização, mapeamento de textura e projeção ortográfica executado na produção do orto-mapa pode produzir alguns artefatos indesejados, como ilustrados na Figura 9.

Recomendamos aqui que os recortes sejam extraídos das imagens originais obtidas pelo VANT, livres de qualquer artefato introduzido pelo pipeline de fotogrametria. O procedimento consiste em localizar a imagem de VANT mais próxima do local da amostra, o alinhamento da imagem com o orto-mapa por uma transformação afim e, finalmente, a extração do recorte a partir de sua localização correta na imagem. Como um exemplo, considere a Figura 10 (a). Os pontos em laranja exibem os locais nos quais foram identificados os marcadores e o ponto em vermelho exibe a posição de um marcador em particular: o marcador associado à amostra de número 61. Os marcadores em “x” mostram a posição do VANT no momento da aquisição das imagens, sendo a imagem armazenada no arquivo DJI\_0219.JPG a mais próxima do local do marcador 61 (Figura 10 (a) e (b)). A imagem é então alinhada com o fragmento do orto-mapa ao redor do marcador (Figura 10 (c)), seguindo o pro-

cesso de extração e casamento de características proposto por Lowe (2004) com o uso de uma transformação afim (Figura 10 (d)). As Figuras 10 (f), (g) e (h) exibem respectivamente a vizinhança do marcador na imagem alinhada, no orto-mapa pré-corte  $O_p$  e no orto-mapa pós-corte  $O_c$ .

Finalmente, um recorte pode ser extraído, correspondendo à área de corte e sua vizinhança próxima e associado às medidas de massa de forragem obtidas para a amostra. A Figura 11 exibe um conjunto de 134 recortes e o valor da massa de forragem da parte aérea ( $g/0,25\text{ m}^2$ ) encontrado para a amostra associada, exibidos em ordem decrescente de massa.

Dessa forma, ao final do execução do protocolo de campo e pré-processamento, têm-se para a área imageada:

- um conjunto de imagens digitais RGB, armazenadas em arquivos JPG, e as posições do VANT no momento da aquisição de cada imagem;
- um modelo tridimensional da área na forma de uma nuvem de pontos e de uma malha poligonal georreferenciada, armazenadas em arquivo no formato PLY;
- um orto-mapa e mapas de elevação associados (DEM e DTM) com resolução de 1 GSD, armazenadas em arquivos no formato GeoTIFF;
- pontos de coleta das amostras, armazenados em arquivos vetoriais (SHP);
- um conjunto de recortes, imagens do local de coleta de cada amostra,

Foto: Thiago Teixeira Santos



**Figura 9:** Artefato indesejados produzidos pelo *pipeline* fotogramétrico. É possível ver que, no processo de fusão de imagens e mapeamento de texturas, parte do animal foi cortada. Artefatos similares ocorrem também na pastagem.

com resolução de 1 GSD, armazenados em arquivos no formato JPG;

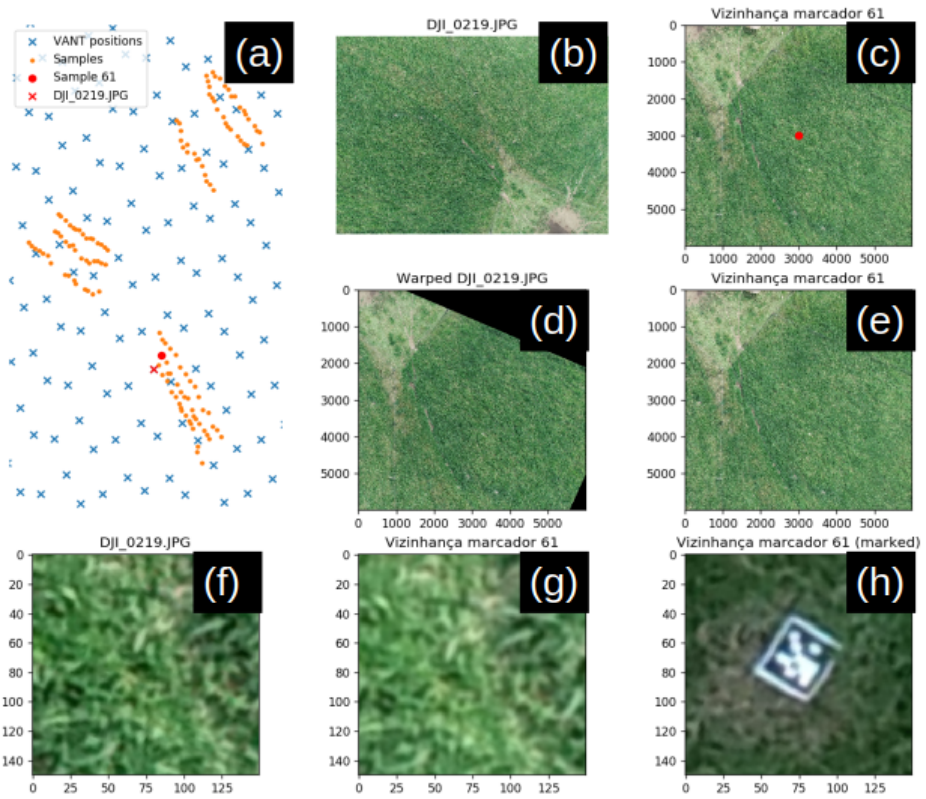
- valores de massa de forragem registrados para cada amostra e devidamente associados aos respectivos recortes, na forma de tabelas (armazenadas como arquivos CSV ou Excel).

Tal base de dados pode ser então empregada no desenvolvimento de sistemas para estimativa de massa de forragem por métodos fotogramétricos e por reconhecimento de padrões baseados em aprendizado supervisionado de máquina.

### 4.3. Pré-processamento de imagens orbitais e dados agrometeorológicos

Os parâmetros climatológicos obtidos da estação meteorológica do INMET (Código: 86845) foram: radiação global (RG, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ , mm dia<sup>-1</sup>), incidência solar no topo da atmosfera (RA, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) e temperatura média diária ( $T_a$ , °C). Os dados diários de pressão atmosférica e precipitação ( $P$ ) foram obtidos de uma estação meteorológica pertencente à Embrapa Pecuária Sudeste, localizada dentro da área de estudo. Para cada parâmetro deve ser gerado um *raster* com os valores obtidos de cada data para entrada no SAFER.

Os dados de entrada do modelo SA-



Fotos: Thiago Teixeira Santos

**Figura 10:** Extração do recorte correspondente a um marcador. Ver texto para detalhes.



**Figura 11:** Recortes extraídos para 134 amostras, correspondentes às áreas amostradas imediatamente antes do corte. Cada recorte é exibido junto ao número da amostra correspondente e o valor de massa de forragem obtido na coleta. Os recortes se encontram em ordem decrescente de massa.

Ilustração: Thiago Teixeira Santos

FER consistem em bandas espectrais de imagens de satélite e dados climatológicos de estações meteorológicas. As imagens de satélite utilizadas neste estudo serão as do Landsat-8 e Sentinel-2. As bandas, 1 a 7, do satélite Landsat-8 utilizadas no SAFER são as bandas do sensor *Operational Land Imager* (OLI), com resolução espacial de 30 metros e período de revisita de 16 dias. As bandas, 2, 3, 4 e 8, do satélite Sentinel-2 utilizadas no SAFER são as bandas do sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI), com resolução espacial de 10 metros e período de revisita de 5 dias. Para entrada no modelo SAFER os valores das bandas devem estar transformados de números digitais (ND) para valores de reflectância da superfície (RS).

As bandas obtidas foram utilizadas para determinar o albedo da superfície ( $\alpha_0$ ) e o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), enquanto que a temperatura da superfície ( $T_0$ ) foi obtida como resíduo no balanço de radiação. Detalhes da metodologia do SAFER podem ser visto em Teixeira et al. (2014), sendo aqui apresentadas apenas as equações principais.

O albedo da superfície ( $\alpha_0$ ) foi estimado por meio da equação:

$$\alpha_0 = \sum_{b=1}^7 w_b a_b \quad (1)$$

onde,  $\alpha_b$  corresponde às bandas 1 a 7 com valores de reflectância do OLI/Landsat-8 ou 2, 3, 4 e 8 com valores de reflectância do MSI/Sentinel-2.

O NDVI foi calculado através da seguinte equação (Rouse Junior et al.,

1974):

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{red}}} \quad (2)$$

onde,  $\rho_{\text{NIR}}$  e  $\rho_{\text{red}}$  é a reflectância da superfície da região do infravermelho próximo e da região do vermelho, respectivamente.

O cálculo da razão entre  $ET$  e  $ET_0$ , baseado em imagens de satélite, foi obtido pela Equação 3 (Teixeira et al., 2015):

$$\frac{ET}{ET_0} = \exp \left[ a_{sf} + b_{sf} \left( \frac{T_0}{\alpha_0 \cdot \text{NDVI}} \right) \right] \cdot \frac{ET_{0\text{ano}}}{5} \quad (3)$$

onde,  $a_{sf}$  e  $b_{sf}$  são os coeficientes de regressão 1 e -0,008, respectivamente, para as condições do noroeste do estado de São Paulo e  $ET_{0\text{ano}}$  assumido neste estudo foi de 3,92 (Tangune, 2017).

Os valores da  $ET_0$ , calculados com os dados da estação meteorológica pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), foram multiplicados pelas imagens resultantes da Equação 3, fornecendo os valores da  $ET_r$  de cada pixel.

A massa de forragem ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) foi obtida utilizando o modelo da radiação de Monteith (Teixeira et al., 2015):

$$\text{BIO} = \varepsilon_{\text{max}} \cdot E_f \cdot \text{APAR} \cdot 0,864 \quad (4)$$

em que,  $\varepsilon_{\text{max}}$  é a máxima eficiência do uso da radiação, no presente estudo foi considerado 2,5 (Bastiaanssen; Ali, 2003) ( $\text{g MJ}^{-1}$ ),  $E_f$  é a fração evaporativa (sem unidades), APAR é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida ( $\text{W m}^{-2}$ ), 0,864 é um fator de conversão de unidades.

A fração evaporativa é definida pela seguinte equação (Teixeira et al., 2015):

$$E_f = \frac{\lambda E}{R_n - G} \quad (5)$$

em que,  $\lambda E$  foi obtida da Equação 3 por transformação da  $ET_a$  a unidades de energia. APAR foi aproximada diretamente da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), segundo a Equação 6 (Teixeira et al., 2015):

$$APAR = f_{PAR}PAR \quad (6)$$

onde o fator  $f_{PAR}$  é estimado a partir do NDVI:

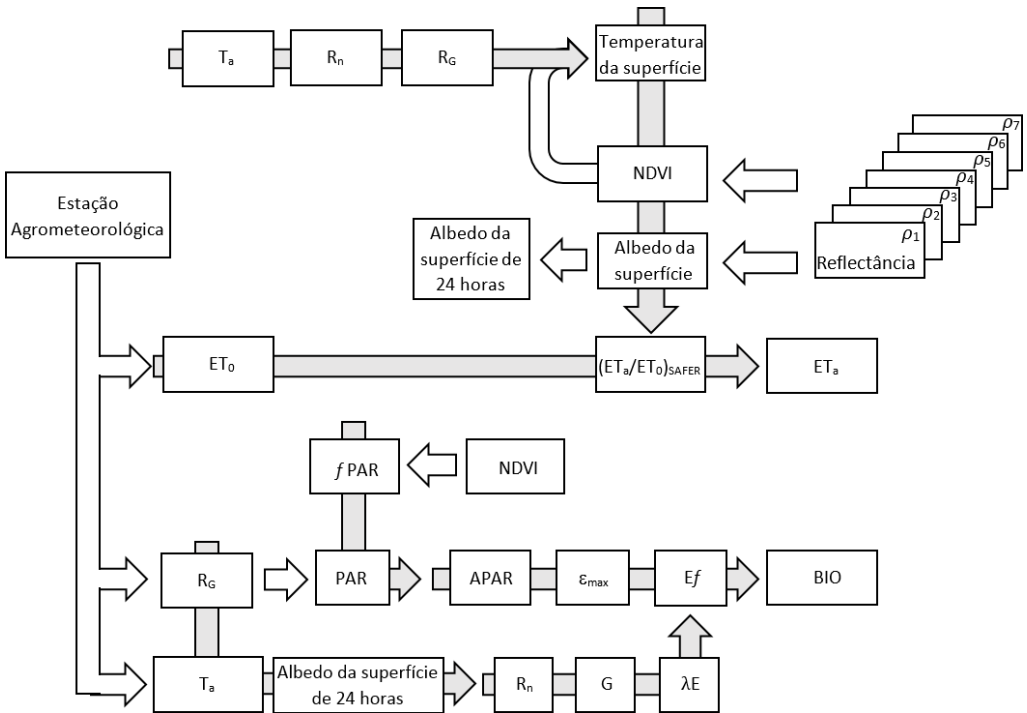
$$f_{PAR} = a \cdot NDVI + b \quad (7)$$

em que,  $a$  e  $b$  são coeficientes 1,257 e -0,161, respectivamente (Bastiaanssen; Ali, 2003).

A Figura 12 apresenta o fluxograma para a estimativa da disponibilidade de massa de forragem. Cabe ressaltar que o modelo SAFER também calcula as componentes do balanço de energia, não explicitadas aqui por não pertencerem ao escopo do presente protocolo.

A etapa posterior à estimativa da disponibilidade de massa forragem via SAFER é a sua correlação com os dados de massa obtidos em campo pelo método da dupla amostragem. Esta etapa que consistirá na validação e calibração do modelo SAFER será tratado em outro documento.





**Figura 12:** Fluxograma para o cálculo dos parâmetros biofísicos pelo modelo SAFER.

Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2014).

## 5. Considerações finais

Este protocolo descreve os procedimentos para a obtenção de dados em campo necessários ao desenvolvimento de metodologias de sensoriamento remoto e orbital e proximal para estimativa de massa de forragem. Foram descritos os procedimentos para tomada de dados de altura, coletas destrutivas para medição direta de massa e captura de imagens por VANTs, bem como procedimentos para o registro e pré-processamento dos dados. Os dados gerados com este protocolo devem permitir a calibração de modelos agrometeorológicos, como o SAFER, e o desenvolvimento de metodologias baseadas em fotogrametria e reconhecimento de padrões para estimação de massa de forragem em pastagens a partir de imagens aéreas.

## Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO irrigation and drainage paper, 56).
- BASTIAANSEN, W. G.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the indus basin, pakistan. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 94, n. 3, p. 321–340, Mar. 2003. DOI:10.1016/S0167-8809(02)00034-8.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. remote sensing surface energy balance algorithm for land (sebal). 1. formulation. **Journal of hydrology**, v. 212–213, p. 198–212, Dec. 1998. DOI:10.1016/S0022-1694(98)00253-4.
- BAYMA-SILVA, G.; TEIXEIRA, A. H. de C.; VICTORIA, D. de C.; NOGUEIRA, S. F.; LEIVAS, J. F.; COAGUILA, D. N.; HERLING, V. R. Energy balance model applied to pasture experimental areas in São Paulo State, Brazil. In: REMOTE SENSING FOR AGRICULTURE, ECOSYSTEMS, AND HYDROLOGY, 18., 2016, Edinburg. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, 2016. p. 99981C-1-99981C-10. (SPIE proceedings, v. 9998). DOI: 10.1117/12.2242043.
- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G. dos; FONSECA, O. O. M. da; SANTOS, R. D. dos; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS; São Carlos, SP: EMBRAPA-CPPSE, 1998. 95 p. il. (EMBRAPA-CNPS. Boletim de pesquisa, 7; EMBRAPA-CPPSE. Boletim de pesquisa, 2).
- FORSMOO, J.; ANDERSON, K.; MACLEOD, C. J. A.; WILKINSON, M. E.; BRAZIER, R. Drone-based structure-from-motion photogrammetry captures grassland sward height variability. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 6, p. 2587–2599, Nov. 2018. DOI:10.1111/1365-2664.13148.

GRANSHAW, S. I. Photogrammetric Terminology: third edition. **The Photogrammetric Record**, v. 31, n. 154, p. 210–252, Jun. 2016. DOI:10.1111/phor.12146.

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 2, p. 91–110, Nov. 2004. DOI:10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

LUSSEM, U.; BOLTEN, A.; GNYP, M. L.; JASPER, J.; BARETH, G. Evaluation of RGB-based vegetation indices from UAV imagery to estimate forage yield in grassland. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-3, p. 1215–1219, 2018.

NUMATA, I.; ROBERTS, D. A.; CHADWICK, O. A.; SCHIMMEL, J.; SAMPAIO, F. R.; LEONIDAS, F. C.; SOARES, J. V. Characterization of pasture biophysical properties and the impact of grazing intensity using remotely sensed data. **Remote sensing of Environment**, v. 109, n. 3, p. 314–327, Aug. 2007. DOI:10.1016/j.rse.2007.01.013.

PEDREIRA, C. **Avanços metodológicos na avaliação de pastagens**. [S. l.], 2002. 33 p. Documento de aula.

POSSOCH, M.; BIEKER, S.; HOFFMEISTER, D.; BOLTEN, A.; SCHELLBERG, J.; BARETH, G. Multi-temporal crop surface models combined with the RGB vegetation index from uav-based images for forage monitoring in grassland. **The International Archives of Photogrammetry, Remote**

**Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI- B1, p. 991–998, 2016. DOI:10.5194/isprs-archives-XLI-B1-991-2016.

ROUSE JUNIOR, J.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. [**Proceedings...**]. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, 1974. v. 1, p. 309-317.

RUEDA-AYALA, V. P.; PEÑA, J. M.; HÖGLIND, M.; BENGOCHEA-GUEVARA, J. M.; ANDÚJAR, D. Comparing UAV-based technologies and RGB-D reconstruction methods for plant height and biomass monitoring on grass ley. **Sensors**, v. 19, n. 3, p. 1–17, 2019. DOI:10.3390/s19030535.

RUPNIK, E.; DAAKIR, M.; DESEIL-LIGNY, M. P. MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. **Open Geospatial Data, Software and Standards**, v. 2, p. 1–9, 2017. DOI:10.1186/s40965-017-0027-2.

SANTOS, T. T.; KOENIGKAN, L. V. **Produção de ortomapas com VANTs e OpenDroneMap**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2018. 21 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Circular técnica, 05).

SILVA, G. B. S. da; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ADAMI, M.; SANO, E. E. Discriminação da cobertura vegetal do Cerrado matogrossense por meio de imagens MODIS. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45,

n. 2, p. 186–194, Feb. 2010. DOI: 10.1590/S0100-204X2010000200010.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 6, n. 1, p. 85–100, 2002. DOI:10.5194/hess-6-85-2002.

TANGUNE. **Evapotranspiração de referência no estado de São Paulo: métodos empíricos, aprendizado de máquina e geoespacial**. 2017. 124 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. A comparative study of techniques for modeling the spatiotemporal distribution of heat and moisture fluxes at different agroecosystems in Brazil. n: PETROPOULOS, G. P. (Ed.). **Remote sensing of energy fluxes and soil moisture content**. Boca Raton: CRC Press, 2014. p. 165-188.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T.; MOMESSO, F. R. A. Modelling radiation and energy balances with Landsat 8 images under different thermohydrological conditions in the Brazilian semi-arid region. In: REMOTE SENSING FOR AGRICULTURE, ECOSYSTEMS, AND HYDROLOGY, 17., 2015, Toulouse. **Proceedings...** Bellingham: SPIE, 2015. p. 96370U-1-96370U-14. (SPIE proceedings, v. 9637). DOI: 10.1117/12.2195044.

TERRACLASS. **Mapeamento do uso e cobertura da Terra do Cerrado**. Projeto TerraClass 2013. Brasília, DF, 2015. 66 p. il.

TOFFANIN, P. **OpenDroneMap: the missing guide: a practical guide to drone mapping using free and open source software**. [Belleair Bluffs]: MasseranoLabs LLC, 2019.

VILJANEN, N.; HONKAVAARA, E.; NÄSI, R.; HAKALA, T.; NIEMELÄINEN, O.; KAIVOSOJA, J. A novel machine learning method for estimating biomass of grass swards using a photogrammetric canopy height model, images and vegetation indices captured by a drone. **Agriculture**, v. 8, n. 5, p. 1–28, 2018. DOI:10.3390/agriculture8050070.

VON BUEREN, S. K.; BURKART, A.; HUENI, A.; RASCHER, U.; TUOHY, M. P.; YULE, I. J. Deploying four optical UAV-based sensors over grassland: challenges and limitations. **Biogeosciences**, v. 12, n. 1, p. 163–175, 2015. DOI:10.5194/bg-12-163-2015.

WESTOBY, M.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N.; HAMBREY, M.; REYNOLDS, J. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, Dec. 2012. DOI:10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

WILM, H. G.; COSTELLO, D. F.; KLIPPLE, G. E. Estimating forage yield by the double-sampling method. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 36, p. 194–203, 1944.

YANG, H.; LEE, Y.; JEON, S. Y.; LEE, D. Multi-rotor drone tutorial:

systems, mechanics, control and state estimation. **Intelligent Service Robotics**, v. 10, n. 2, p. 79–93, Apr. 2017. DOI:10.1007/s11370-017-0224-y.

ZHANG, H.; SUN, Y.; CHANG, L.; QIN, Y.; CHEN, J.; QIN, Y.; DU, J.; YI, S.; WANG, Y. Estimation of grassland canopy height and aboveground biomass at the quadrat scale using unmanned aerial vehicle. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 1-19, 2018. DOI:10.3390/rs10060851.

Exemplares desta edição  
podem ser adquiridos na:

**Embrapa Informática Agropecuária**

Av. Dr. André Tosello, 209 - Cidade  
Universitária  
Campinas, SP, Brasil  
CEP. 13083-886  
Fone: (19) 3211-5700

[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)  
[www.embrapa.br/fale-conosco/sac](http://www.embrapa.br/fale-conosco/sac)

**1ª edição**  
Versão digital (2019)



MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA, PECUÁRIA  
E ABASTECIMENTO



Comitê Local de Publicações  
da Unidade Responsável

Presidente

*Stanley Robson de Medeiros Oliveira*

Secretário-Executivo

*Carla Cristiane Osawa*

Membros

*Adriana Farah Gonzalez; Carla Geovana do  
Nascimento Macário; Jayme Garcia Arnal  
Barbedo; Kleber Xavier Sampaio de Souza;  
Luiz Antonio Falaguasta Barbosa; Magda  
Cruciol; Paula Regina Kuser Falcão; Ricardo  
Augusto Dante e Sônia Ternes*

Suplentes

*Goran Nestic e Michel Yamagishi*

Supervisão editorial

*Kleber Xavier Sampaio de Souza*

Revisão de texto

*Adriana Farah Gonzalez*

Normalização bibliográfica

*Carla Cristiane Osawa*

Projeto gráfico da coleção

*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica

*Thiago Teixeira Santos e Felipe Prado Jaconi  
sob supervisão de Magda Cruciol*

Foto da capa

*Pexels*

CGPE 15710