

CIRCULAR TÉCNICA

127

Juiz de Fora, MG
Janeiro, 2023

Aplicações da agricultura de precisão em pastagens

Pérsio Sandir D'Oliveira
Marcos Cicarini Hott
Ricardo Guimarães Andrade
Walter Coelho P. de Magalhães Junior



Aplicações da agricultura de precisão em pastagens¹

Introdução

Em todo o mundo, as pastagens são a fonte principal de alimento nos sistemas de produção de leite mais competitivos (Fontaneli et al., 2016). Contudo, a degradação das pastagens é um fator limitante para a atividade. Dos 175 milhões de hectares de pastagens existentes no Brasil, estima-se que entre 50% e 70% estão em algum grau de degradação (Dias-Filho, 2014).

A degradação de pastagens ocorre pela perda de vigor, produtividade e capacidade de recuperação das mesmas. Existem várias causas, que podem ocorrer isoladas ou em conjunto: preparo incorreto do solo; escolha errada da espécie forrageira; uso de sementes de qualidade baixa; má formação inicial da pastagem; manejo inadequado e perda de nutrientes do solo ao longo do processo produtivo (Brasil, 2015; Dias-Filho, 2017).

Outro problema é o efeito da sazonalidade sobre as pastagens, que afeta a oferta de alimento, variável ao longo do ano, mas que apresenta duas estações bem definidas na região central do Brasil. No período das águas, de outubro a março, as condições ambientais são favoráveis e a forragem é abundante; no período da seca, de abril a setembro, a diminuição da temperatura do ar, luminosidade e precipitação resultam em escassez de forragem (Fontaneli et al., 2016).

Assim, o monitoramento de áreas cultivadas com pastagens é fundamental para o sucesso dos sistemas de produção de leite a pasto. A Agricultura de Precisão (AP) já é utilizada em culturas com plantio em larga escala, commodities e em setores agroindustriais organizados, tal como no setor florestal, podendo ser estendida para as pastagens e áreas ocupadas com plantas forrageiras. Este conceito de AP pode ser estendido para a pecuária,

¹ Pérsio Sandir D'Oliveira, engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG; Marcos Cicarini Hott, engenheiro-florestal, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG; Ricardo Guimarães Andrade, engenheiro-agrícola, doutor em Meteorologia Agrícola, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG; Walter Coelho P. de Magalhães Junior, economista, mestre em Ciência da Computação, analista da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG.

floresta e forragicultura de precisão, onde tecnologias de sensoriamento remoto para mapeamento e monitoramento dos recursos permitem seu uso racional, levando em consideração aspectos econômico-ambientais, assim como maior rendimento na produção.

O objetivo desta publicação é apresentar algumas possibilidades de uso da AP em pastagens, abordando o uso de equipamentos e técnicas para levantamento da vegetação nessas áreas a partir de sensores orbitais, aéreos ou proximais, embarcados em satélites, VANTs ou equipamentos ao nível do solo, de mão ou estacionários.

Conceito

A AP é um sistema de gerenciamento agrícola que se baseia na variação espacial e temporal da unidade produtiva, e visa ao aumento do retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização dos efeitos ambientais. Seu princípio é a existência de variabilidade espacial, sem a qual não se justifica sua adoção (Brasil 2009; Inamasu; Bernardi, 2014). As ferramentas, soluções e ciências envolvidas na AP são usadas, principalmente, nas culturas de grãos, hortícolas, fruteiras e silvicultura. Entretanto, as mesmas também podem ser aplicadas em sistemas de produção animal, baseados em pastagens tropicais (Bernardi; Perez, 2014).

Entre essas ferramentas destaca-se o sensoriamento remoto, que permite obter informações de um objeto sem que haja contato físico com o mesmo, muitas vezes a grandes distâncias (Figura 1). As imagens dos sensores remotos podem ser obtidas a partir de plataformas como aeronaves, satélites, veículos aéreos não tripulados (VANTs), máquinas agrícolas autopropelidas, entre outras. Por meio do sensoriamento remoto é possível estimar a biomassa e a produtividade das culturas; monitorar o estresse hídrico e o vigor das plantas, e avaliar o estágio fenológico das mesmas (Shiratsuchi et al., 2014).

A AP pode ser dividida em três etapas: coleta de dados; tomada de decisão; e intervenção. A automação de processos e o uso de informática contribuem para a execução eficiente de cada etapa, empregando desde realidade virtual até modelagem computacional. Embora existam diversos modelos de

simulação para estimar a produção da biomassa de lavouras e do teor de nitrogênio, estes não são muito utilizados devido a uma série de requisitos (tipo de solo, clima e variáveis relacionadas às práticas de manejo, entre outros). Assim, as tecnologias de sensoriamento remoto servirão, cada vez mais, no apoio à tomada de decisão para aumentar a produção e gerenciar o uso de fertilizantes (Shendryk et al., 2020).

A tarefa de amostragem e análise dos dados é fundamental para obter resultados adequados, em termos de mapeamento, o qual alimentará sistemas de geoprocessamento para suporte à detecção de alvos, estresses na vegetação e aplicação de insumos necessários para melhoria da produtividade e redução de custos de produção.

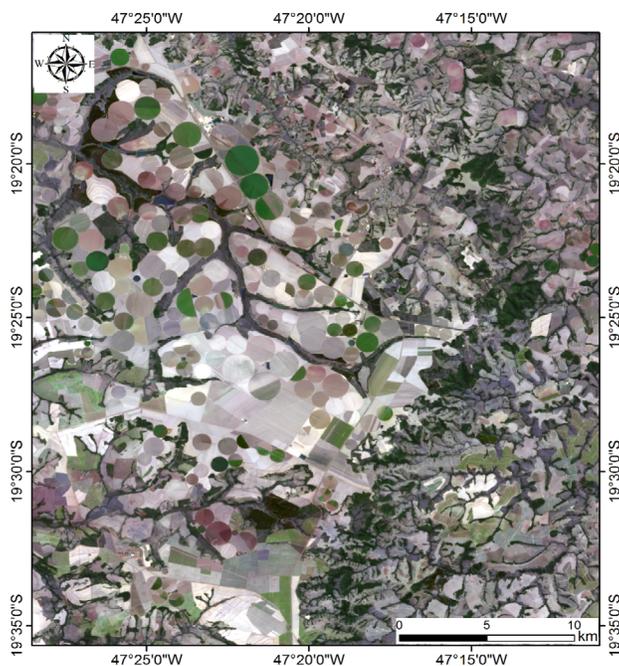


Figura 1. Imagem Landsat 9 - Sensor Operational Land Imager (OLI-2), composição de bandas 4-3-2 em R-G-B. Região dos municípios mineiros de Perdizes e Santa Juliana. Imagem do dia 9 de setembro de 2022.

Fonte: EarthExplorer (2022).

Aplicações

As aplicações da AP vão desde a seleção de material forrageiro em campo e avaliação das condições de variedades em casas de vegetação até o mapeamento de degradação e orientação na aplicação de insumos. Dessa forma, nesta seção serão abordadas, de maneira sintética, algumas das principais práticas que envolvem o uso de dados espaciais e equipamentos no manejo de precisão em pastagens.

Criação de mapas de variabilidade

Conhecer a variabilidade espacial das características do solo é fundamental para a AP, pois permite a maior eficiência nas aplicações de corretivos e de fertilizantes. O primeiro registro de um mapa que mostrou a variabilidade espacial em solo agrícola data de 1929. Naquele ano, foi publicado um boletim de campo experimental de Illinois, que recomendava ao produtor rural que desenhasse um mapa, com testes de acidez do solo amostrado em grade, para aplicação de calcário (Inamasu; Bernardi, 2014). Também nos anos 1930, dados de medições em fotografias aéreas foram utilizados para manejo agrícola e de pastagens no Estado da Virgínia Ocidental, Estados Unidos (Tueller, 1989). Conhecendo a variação na fertilidade do solo, é possível utilizar equipamentos que fazem a aplicação de insumos a taxa variável, de modo que a área de maior fertilidade de solo receba menor quantidade de corretivos e de fertilizantes do que aquela de menor fertilidade.

Da mesma forma, podem ser elaborados mapas que mostram a variabilidade temporal da produção vegetal de uma área específica. Um exemplo é o registro da sazonalidade das pastagens tropicais. Na região Sudeste, a oferta de forragem é maior no período das águas (de outubro a março), em comparação com o período das secas (de abril a setembro). Isto ocorre porque as condições climáticas do período das águas são favoráveis à produção vegetal, enquanto no período da seca, a queda na temperatura, luminosidade e precipitação pluviométrica resultam em menor produção. Sabendo disso, o produtor pode manejar a lotação animal nas pastagens, ao longo do ano, bem como planejar a produção e uso de volumosos para o período de escassez.

O princípio da amostragem em malha ou grade, que resulta em um gradiente de fertilidade, pode ser usado para outros parâmetros importantes:

- Textura do solo.
- Densidade do solo.
- Presença de pragas e doenças.
- Presença de plantas daninhas.
- Produção de matéria seca.

Todas as variáveis a serem levantadas irão compor os planos de informação, que retornarão um mapa das condições de solo e da vegetação, necessário para aplicação correta de insumos ou de práticas para intervir no sentido de reestruturar o solo, física e quimicamente, assim como da aplicação de pesticidas na medida certa e, assim, resultar em melhoria na produção das pastagens.

Avaliação da fertilidade e estrutura do solo

A fertilidade e a estrutura do solo têm grande importância, pois ambos influenciam no uso de corretivos, fertilizantes e até práticas conservacionistas. Alguns equipamentos usados em AP otimizam a medição da fertilidade de solo. A condutividade elétrica (CE) do solo é um parâmetro importante a ser medido, e que é influenciada pela porosidade, concentração de eletrólitos, textura do solo, quantidade e composição de colóides, teor de água e de matéria orgânica (MO); existe boa correlação entre condutividade elétrica e teor de argila do solo (Brasil, 2009).

O sensor de contato Veris é um equipamento que mede, ao mesmo tempo, a CE, o potencial hidrogeniônico (pH) e a matéria orgânica (MO) do solo. A CE é medida por meio da passagem de corrente elétrica por discos intermediários, sendo dois internos e dois externos. Os discos externos medem a diferença de potencial na profundidade de 0 a 90 cm, enquanto os discos internos medem a diferença de potencial na profundidade de 0 a 30 cm. O pH é medido por um sensor eletroquímico, com um amostrador que coleta amostras de solo. Cada amostra entra em contato, separadamente, com dois eletrodos de pH; após a leitura, a amostra é descartada e os eletrodos são lavados com um

jato d'água. A MO é estimada pela reflectância, usando dois espectrômetros integrados, que fazem leituras simultâneas nas faixas de 350 a 2.200 nm, com resolução espectral de 8 nm. No campo, duas hastes participam do processo, uma abrindo um sulco no solo e a outra realizando a leitura da reflectância no fundo do sulco (Nunes et al., 2018).

A compactação do solo pode ser estimada pelo Índice de Cone (IC), que mede a resistência que o solo exerce à penetração de uma ponta cônica, colocada em uma haste. Esta medição é feita com penetrômetro (Cordeiro et al., 1998; Molin et al., 2012). Existem vários modelos de penetrômetros no mercado, desde os mais simples (os de impacto) até os mais complexos (os eletrônicos).

O funcionamento do penetrômetro se baseia na resistência do solo à haste, depois de receber um impacto pelo deslocamento vertical de um bloco de ferro colocado na parte superior da haste, por uma distância conhecida (cerca de 40 cm). Em geral, o equipamento exige dois operadores. Quando são atingidas camadas compactadas, o número de impactos necessários para penetração da haste aumenta, indicando a presença de camada compactada. Os dados coletados são tabulados e, posteriormente, usados na confecção de um gráfico, relacionando o número de impactos por decímetro com a profundidade investigada (Cordeiro et al., 1998).

Todos esses fatores físico-químicos analisados permitirão a tomada de decisão sobre os compostos químicos, equipamentos e implementos a serem utilizados e, a partir das análises mapeadas, serão definidas estratégias, custos e maquinário, se aplicações serão efetuadas por zonas de manejo (que tem maior precisão, pois aumenta a generalização de doses ou práticas em estratos ou regiões semelhantes) ou à taxa variável, que tem por objetivo uma escala mais precisa.

Aplicação de insumos a taxas variáveis

A aplicação de insumos a taxas variáveis permite alcançar resultados melhores do que a aplicação a lanço, feita na agricultura convencional. Utilizando taxas variáveis, os insumos agrícolas são aplicados de maneira diferenciada, levando em conta a variabilidade na fertilidade do solo.

A aplicação a taxas variáveis segue dois métodos: o uso de mapas e a resposta de sensores que operam em tempo real (Mantovani et al., 1998). No primeiro método, a aplicação de insumos é baseada em mapas de variabilidade (fertilidade do solo, produtividade, etc.), os quais são elaborados e armazenados por meios eletrônicos, contendo informação sobre as características da área de produção. Assim, é possível determinar a posição da máquina dentro da área de aplicação, relacionando este ponto com a quantidade de insumo a ser aplicada.

No segundo caso, os insumos agrícolas são aplicados com base nas informações levantadas por sensores, operando em tempo real, que determinam as propriedades do solo e/ou da cultura existente, conforme a máquina se movimenta na área. A alimentação de dados para o sistema controlador segue um fluxo contínuo, possibilitando a variação da quantidade dos insumos aplicados ao longo de áreas pequenas, dentro do local de produção (Mantovani et al., 1998). Ambos os métodos apresentam suas vantagens e desvantagens; contudo, são mais eficientes do que a aplicação de insumos agrícolas pela média da área em geral, ou até mesmo por zonas ou estratos, um pouco mais refinados. As ferramentas de geoprocessamento permitem o uso de metodologias de análises geográficas aplicadas aos dados amostrais de campo, como geoestatística, assim como em imagens de sensoriamento remoto. O carácter biofísico da vegetação pode ser explorado ao longo do espaço geográfico representado na imagem, tão bem como em séries temporais, as quais possibilitam extrair informações fenológicas da vegetação de pastagens e determinar limites de crescimento, senescência ou degradação.

Monitoramento de pastagens

Uma das principais aplicações do sensoriamento remoto é detectar as diferenças na reflectância que sejam relacionadas à cobertura vegetal. Estes dados podem ser associados às características como índice de área foliar, biomassa e fotossíntese. Existem diversos índices de vegetação (IVs) que podem ser utilizados no monitoramento de lavouras e pastagens (Figura 2).

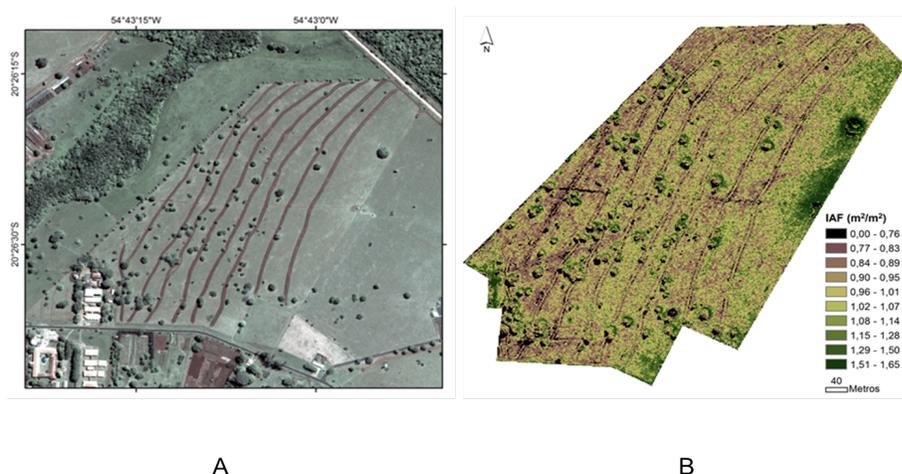


Figura 2. Imagem do satélite GeoEye-1 de área experimental de pastagens da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS, de 09/10/2011 (A) e mapa da estimativa do índice da área foliar (IAF) da pastagem ao utilizar os dados de reflectância do satélite WorldView-2, obtida para o dia 13/04/2013, da mesma área (B).

Fonte: Andrade et al. (2004), WorldView-2 (2013).

Os IVs são medições quantitativas que indicam o vigor da vegetação em uma determinada área. Permitem detectar as alterações no uso do solo, estimar a cobertura vegetal, identificar o tipo de cultura e sua possível produtividade (Bannari et al., 1995; Shiratsuchi et al., 2014). A cobertura vegetal pode ser diferenciada conforme seu padrão espectral, em relação aos elementos do solo: o comprimento de onda do vermelho (630-690 nm) é absorvido pela clorofila, enquanto o comprimento de onda do infravermelho próximo (760-900 nm) é refletido pelas células da folha. A resposta espectral da vegetação na banda do vermelho está relacionada com o teor de clorofila, enquanto o infravermelho depende do índice de área foliar e da densidade da vegetação (Bannari et al., 1995; Shiratsuchi et al., 2014; Villamuelas et al., 2016).

Os fatores de confundimento podem ser separados em dois grupos, biológicos e físicos. Os primeiros envolvem o teor de água e a idade da planta, deficiências minerais, ataques de pragas, geometria de cobertura, espaçamento entre fileiras e arquitetura foliar. Os segundos envolvem a cor e o brilho do solo, condições atmosféricas, a posição do Sol e calibração do sensor (Bannari et al., 1995). Alguns dos principais IVs são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Índices de vegetação utilizados no monitoramento de culturas.

Descrição	Índice
Características Estruturais	
SR (Simple Ratio)	$SR = RNIR/RR$
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = (RNIR - RR)/(RNIR + RR)$
GRVI (Green-Red Vegetation Index)	$GRVI = (RG - RR)/(RG + RR)$
SAVI (Soil Adjusted Difference Vegetation Index)	$SAVI = (1 + L) (RNIR - RR)/(RNIR + RR + L)$
SARVI (Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index)	$SARVI = (1 + L)[(RNIR - (RR - \sqrt{(RB - RR)}))]/[L + RNIR + (RR - \sqrt{(RB - RR)})]$
MSAVI (Modified SAVI)	$MSAVI = 1/2[2 RNIR + 1 - \sqrt{(2 RNIR + 1)^2 - 8(RNIR - RR)}]$
RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index)	$RDVI = \sqrt{(RNIR - RR) / (RNIR + RR)}$
EVI (Enhanced Vegetation Index)	$EVI = 2,5 (RNIR - RR)/(1 + RNIR + 6RR - 7,5RB)$
OSAVI (Optimized SAVI)	$OSAVI = (1 + 0,16)(RNIR - RR)/(RNIR + RR + 0,16)$
MSR (Modified SR)	$MSR = \frac{\left[\left(\frac{RNIR}{RR}\right) - 1\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{RNIR}{RR}\right)}}$
Propriedades Bioquímicas	
SIPI (Structural Insensitive Pigment Index)	$SIP = (RNIR - RB)/(RNIR + RB)$
GARI (Green Atmospherically Resistant Vegetation Index)	$GARI = RNIR - [RG - \sqrt{(RB - RR)}]/[RNIR + (RG - \sqrt{(RB - RR)})]$
TVI (Triangular Vegetation Index)	$TVI = [RNIR - RG] - 1$
GCI (Green Chlorophyll Index)	$GCI = (1 + L) (RNIR - RR)/(RNIR + RR + L)$
MCARI1 (First Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index)	$MCARI1 = 1/2[2,5(RNIR - RG) - 1,3 (RNIR - RG)]$
MCARI2 (Second Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index)	$MCARI2 = 1/2[2,5(RNIR - RR) - 1,3 (RNIR - RG)]/\sqrt{2(RNIR + 1)^2 - 0,5 - 6 (RNIR - 5\sqrt{RR})}$

Fonte: Shiratsuchi et al. (2014).

SR (Simple Ratio): O índice de Vegetação da Razão Simples baseia-se na razão entre a banda do infravermelho próximo, onde os valores aumentam com o aumento da vegetação, e a banda do vermelho, onde os valores diminuem com o aumento da vegetação (Galvanin et al., 2014). Para interpretar os valores de SR:

- SR próximo de zero: reflectância maior no vermelho do que no infravermelho, associado com água, neve e nuvens;
- $SR \leq 1$: refletância semelhante tanto no vermelho quanto no infravermelho, associado com rochas e solo exposto; e
- $SR > 1$: reflectância maior no infravermelho do que no vermelho, associado com a vegetação. Quanto mais alto o valor, maior o vigor da vegetação.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada é calculado pela divisão entre a diferença da reflectância do infravermelho e do vermelho pela soma das mesmas variáveis. O cálculo produz um número que varia de -1 a 1. Quando a vegetação é mais densa, tanto a quantidade de luz visível absorvida quanto a do infravermelho refletida são maiores, enquanto a vegetação menos densa apresenta menor reflexão, tanto de luz visível quanto do infravermelho (Ribatski et al., 2018; Pinguello et al., 2020). Quanto maior o índice, maior a quantidade de vegetação no local, enquanto baixos valores do índice ou perto de zero indicam pouca atividade de clorofila ou solo descoberto. Já os valores negativos podem estar relacionados com a água (Gameiro et al., 2016).

Contudo, o NDVI tem algumas limitações:

- solo: a reflectância do solo é influenciada pelo teor de água do solo (mais escuro quando úmido), e também as superfícies do relevo refletem a luz em direções diferentes;
- nuvens: sua presença causa perda de informação na imagem ou sombras sobre a superfície do solo;
- outros fatores atmosféricos: os aerossóis e o vapor d'água interferem com as medições de reflectância do alvo.

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index): o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo baseia-se no fato que o brilho do solo aumenta o valor dos índices de vegetação, principalmente em dossel com cobertura verde em torno de 50%

(Huete, 1988). Na equação do SAVI (Tabela 1), é inserida a constante L, para minimizar o efeito do solo. O valor de L igual a 0,25 indica vegetação densa; 0,5 é indicativo de vegetação com densidade intermediária; quando L é igual a 1, a vegetação é rala ou com baixa densidade. Quando L for zero, então os valores de SAVI são iguais aos do NDVI (Huete, 1988; Gameiro et al., 2016). A partir do SAVI, é possível calcular o Índice de Área Foliar (IAF), por meio da equação:

$$IAF = - \frac{\ln(0,69 - SAVI)}{0,59} / 0,91$$

SARVI (*Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index*): o Índice de Vegetação Resistente ao Solo e à Atmosfera foi desenvolvido para diminuir os efeitos atmosféricos sobre o NDVI (Kaufman; Tanré, 1992 citado por Risso et al., 2012). O cálculo do SARVI utiliza as bandas do azul (B, blue), do vermelho (R, red) e do infravermelho próximo (NIR, near infrared) (Tabela 1). A reflectância no vermelho é menor do que no infravermelho próximo, sendo mais sensível aos efeitos da atmosfera. Na equação, é inserida uma constante, γ , que depende do tipo de aerossol e serve para reduzir a influência de fenômenos atmosféricos.

EVI (*Enhanced Vegetation Index*): o Índice de Vegetação Melhorado foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, com melhoria na sensibilidade em condições de elevada biomassa, diminuindo as influências do sinal de fundo do dossel e da atmosfera, incorporando uma banda no espectro do azul; além disso, este índice é mais sensível à estrutura do dossel (Risso et al., 2012).

GRVI (*Green Red Vegetation Index*): o Índice de Vegetação Verde-Vermelho é muito preciso na detecção de plantas verdes. O valor deste índice é positivo para tecido vegetal, negativo para o solo e próximo de zero para água e neve (Motohka et al., 2010).

MSAVI (*Modified SAVI*): o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado foi uma mudança a partir do SAVI, onde a constante L foi substituída por uma variável. O resultado é um índice de vegetação muito mais sensível e adequado para áreas onde predomina solo descoberto, como lavouras recém-plantadas (Qui et al., 1994).

RDVI (*Renormalized Difference Vegetation Index*): o Índice de Vegetação por Diferença Renormalizado é um aperfeiçoamento do NDVI, que utiliza

a diferença entre o infravermelho próximo e o vermelho, para destacar a vegetação saudável, ao mesmo tempo em que minimiza os efeitos do solo e da posição do Sol (Roujean; Breon, 1995).

OSAVI (*Optimized SAVI*): versão otimizada do SAVI, este índice de vegetação utiliza uma constante de 0,16 para ajuste do fator de fundo do dossel. Mais utilizado em áreas com vegetação esparsa e solo exposto (Rondeaux et al., 1996).

MSR (*Modified Simple Ratio*): o Índice da Razão Simples Modificado foi criado para recuperar parâmetros biofísicos de florestas boreais, por meio do sensoriamento remoto. O índice é baseado na análise de diversos outros índices de vegetação de duas bandas: NDVI, Simple Ratio, SAVI, RDVI, entre outros (Chen, 2014).

SIPI (*Structure Insensitive Pigment Index*): o Índice de Pigmento Insensível à Estrutura foi desenvolvido para otimizar a sensibilidade à razão entre os carotenoides e a clorofila, ao mesmo tempo em que reduz a sensibilidade às variações na estrutura do dossel, como o índice de área foliar. É usado para monitorar a saúde das plantas, stress fisiológico e estimar a produtividade. Os valores de SIPI variam de zero (0) a 2, e as plantas verdes ficam entre 0,8 e 1,0 (Penuelas et al., 1995).

GARI (*Green Atmospherically Resistant Vegetation Index*): o Índice de Vegetação para o Verde Resistente à Atmosfera é um aperfeiçoamento do ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*), e apresenta menor sensibilidade aos efeitos atmosféricos e maior ao teor de clorofila; comparado com o NDVI, ele é 4 vezes menos sensível às variações da atmosfera (Gitelson et al., 1996).

TVI (*Triangular Vegetation Index*): o Índice de Vegetação Triangular é calculado como a área de um triângulo hipotético no espaço espectral, que une três pontos: o pico da reflectância do verde; a absorção mínima da clorofila; e limiar do NIR. Quando a absorção da clorofila causa uma diminuição da reflectância do vermelho e o tecido foliar abundante causa um aumento na reflectância do NIR, a área total do triângulo aumenta. É adequado para estimar o Índice de Área Foliar, porém a sensibilidade à clorofila aumenta com a densidade do dossel (Xing et al., 2020).

GCI (*Green Chlorophyll Index*): o Índice Verde para Clorofila tem a função de estimar o teor da clorofila da folha em diversas espécies de plantas. Este índice revela o estado fisiológico da planta: em condições de stress, o GCI diminui. Em geral, as leituras são feitas por meio de sensores embarcados em satélites (Gitelson et al., 2003).

MCARI1 (*First Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index*): o Índice da Razão de Absorção de Clorofila (primeira modificação) é uma mudança do CARI (*Chlorophyll Absorption Ratio Index*) para reduzir os efeitos combinados do solo e de superfícies não-fotossintetizantes (Daughtry et al., 2000).

MCARI2 (*Second Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index*): o Índice da Razão de Absorção de Clorofila (segunda modificação) é semelhante ao MCARI1, porém incorpora um fator de ajuste para o solo, mantendo a sensibilidade ao índice de área foliar e resistência à influência da clorofila (Haboudane et al., 2004).

Na avaliação de áreas de pastagens, os IVs são confiáveis para estimar a cobertura do solo pela vegetação (Akiyama; Kawamura, 2007). Na China e Brasil, por exemplo, os índices de vegetação obtidos a partir de imagens de satélite foram eficientes na estimativa da degradação de pastagens, inclusive na investigação das causas e na extensão da degradação (Andrade et al., 2019a; Hott et al., 2019c). Ver Tabela 2.

Imagens de média a baixa resolução espacial são indicadas para o monitoramento de áreas de pastagens degradadas em grandes extensões territoriais, pois permitem a estimativa de métricas em sensoriamento remoto com um menor esforço computacional e em menor tempo de processamento (Figura 3). Entre 2000 e 2016, as pastagens brasileiras foram analisadas, por meio de imagens MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Verificou-se expansão da área ocupada com pastagens, de 152 milhões de ha em 2000 para 179 milhões de ha em 2016. Enquanto houve aumento das áreas de pastagens no Cerrado, na Caatinga e no Pantanal, foi observada diminuição das áreas de pastagens no bioma Mata Atlântica (Parente; Ferreira, 2018).

Tabela 2. Níveis de degradação de pastagens.

Nível 1: Leve	Pastagem ainda produtiva, mas já com algumas áreas de solo descoberto ou plantas daninhas. A rebrota do capim, após o pastejo, é lenta. Capacidade de suporte cai cerca de 20% (em relação à pastagem não degradada).
Nível 2: Moderado	Aumento na infestação de plantas daninhas ou no percentual de solo descoberto (em relação ao Nível 1). Capacidade de suporte cai entre 30% e 50%.
Nível 3: Forte	Aumento excessivo na infestação de plantas daninhas (degradação agrícola) ou no percentual de solo descoberto (em relação ao Nível 2). Capacidade de suporte cai entre 60% e 80%.
Nível 3: Muito Forte	Predominância de solo descoberto, com sinais evidentes de erosão (degradação biológica). Proporção de forrageiras muito baixa ou inexistente. Capacidade de suporte cai acima de 80%.

Fonte: Modificado de Dias-Filho (2017).

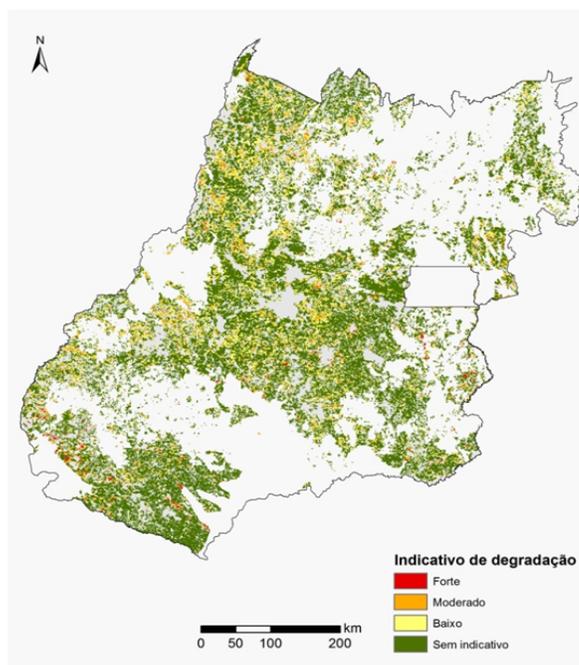


Figura 3. Mapa indicativo de degradação das áreas de pastagens plantadas no Estado de Goiás.

Fonte: Andrade et al. (2013)

Na Zona da Mata mineira, até 60% das pastagens estão em algum estágio de degradação (Hott et al., 2019c). No Cerrado brasileiro, levantamento do estado das pastagens por meio da série temporal MODIS NDVI revelou que 46% das pastagens naquela região estavam degradadas, cerca de 37 milhões de ha com capacidade de suporte inferior a 1 UA/ha (Pereira et al., 2018).

Áreas classificadas como pastagens degradadas demandam maior atenção, incluindo monitoramento da taxa de lotação, renovação de pastagens, eliminação do uso do fogo e aplicação de corretivos e de fertilizantes. Áreas de pastagens não degradadas, que apresentam alta densidade vegetal e persistência ao longo do tempo, permitem uso de lotação contínua (Hott et al., 2019a).

Avanços na avaliação de pastagens em escala 1:1, em solo, obtidas com equipamentos de campo ou mesmo com aplicativos desenvolvidos e embarcados em *smartphones*, também possibilitam uma estimativa da cobertura verde e possível associação com a biomassa. Em experimentos com *Panicum maximum*, a partir de fotografias ortogonais, classificadas em tempo real, Franco et al. (2020) estimaram a correlação existente entre índices de vegetação e massa seca e verde.

Estimativa de produção de forragem

A determinação precisa da produção de forragem disponível é indispensável para o manejo correto das pastagens. Existem diversos métodos para estimar a produção de massa de plantas forrageiras, os quais podem ser agrupados em métodos diretos (ou destrutivos) e métodos indiretos (ou não destrutivos). Um exemplo do primeiro é o método do quadrado, e do segundo podem ser citados a altura do dossel, a estimativa visual e o disco medidor (Salman et al., 2006).

O método do quadrado utiliza uma moldura de área conhecida, feita de madeira ou metal, de forma quadrada ou retangular. A área dessa moldura varia de 0,10 m² até 2,0 m², e o tamanho depende da uniformidade da área a ser amostrada. Os pontos de amostragem dentro da área podem ser escolhidos ao acaso. A moldura é lançada nos pontos de amostragem e toda a forragem encontrada dentro da área dessa moldura é cortada com cutelo, geralmente rente ao solo. Após o corte, a forragem é acondicionada em sacos de papel, de peso conhecido, e pesada, usando balança portátil digital ou mecânica. Este método, embora preciso, é caro, trabalhoso e demanda muita mão de obra (Salman et al., 2006).

A altura do dossel, medida com uma régua ou bastão graduado, é uma medida indireta de produção de forragem. Conforme a espécie de forrageira, existe uma altura melhor para entrada e para saída dos animais. Este método sofre interferência de fatores sazonais, mas é rápido (Salman et al., 2006).

A estimativa visual baseia-se na dupla amostragem. Em uma área padrão, são combinadas a avaliação visual e a amostragem direta em algumas parcelas. São selecionados cinco pontos “padrão”, os quais recebem notas variando de 1 a 5, conforme a produção de forragem. Após atribuição das notas, as plantas dentro do quadrado e a produção de matéria seca (MS) é medida, após secagem em estufa. Em seguida, são escolhidos 50 pontos de amostragem, onde são lançados os quadrados para avaliação visual e atribuídas notas. Estas são comparadas com os “padrões” para estimar a produção de massa das forrageiras. A variação de observador para observador é muito grande, e avaliadores mal treinados ou inexperientes podem fazer inferências pouco precisas (Salman et al., 2006).

O método do disco medidor parte do princípio que a produção de forragem está relacionada com a densidade e a altura de seus componentes. O equipamento consiste de uma haste graduada e um disco (ou prato) metálico, de massa e área conhecidos, em geral feito de alumínio. A área do disco varia de 0,2 m² a 1,0 m². A estimativa de produção de forragem é feita inserindo-se a ponta da haste no dossel, de forma perpendicular, do topo para a base, até atingir o nível do solo. No percurso, o disco é empurrado para cima e, quando a haste toca o solo, faz-se a leitura da posição do mesmo na haste. Para calibração, usa-se um arco de metal com o mesmo diâmetro do disco, colocado sobre o solo, e a forragem contida no arco é cortada, seca em estufa e pesada. A relação entre a altura do disco e a produção de matéria seca é calculada por análise de regressão (Salman et al., 2006).

Os índices de vegetação obtidos pelo sensoriamento remoto também são usados para estimar a biomassa de lavouras e pastagens, pois fornecem padrões temporais e espaciais de mudanças nos ecossistemas de pastagens e são úteis na estimativa de parâmetros biofísicos. O índice de vegetação mais usado é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), ferramenta rápida e eficiente para detectar alterações na vegetação de uma área (Bernardi; Perez, 2014).

Em Coronel Pacheco/MG, foram usados sensores ópticos de imageamento na faixa da luz visível, embarcados em VANT para estimar as perdas causadas por ataque de capivaras em lavoura de milho, destinada à produção de silagem. Foram usados dois índices de vegetação, o VARI (*Visible Atmospheric Resistant Index*) e o GLI (*Green Leaf Index*), e encontraram perdas de 12,71% na área cultivada com milho. Observa-se claramente a

diferença entre as áreas que sofreram ataques de capivaras, inclusive com solo exposto (Figura 4), e aquelas onde o milho conseguiu se desenvolver normalmente (Andrade et al., 2019a). Equações podem ser ajustadas para estimativa de biomassa pelo método de pesagem rigorosa de material vegetal em pastagens sob pastejo, assim como em experimentos para seleção de variedades de pastagens com o uso de fotogrametria e imageamento por VANT, bem como estimativas de biomassa por meio de imagens orbitais e algoritmos/modelos, cujos resultados são promissores (Figura 5).

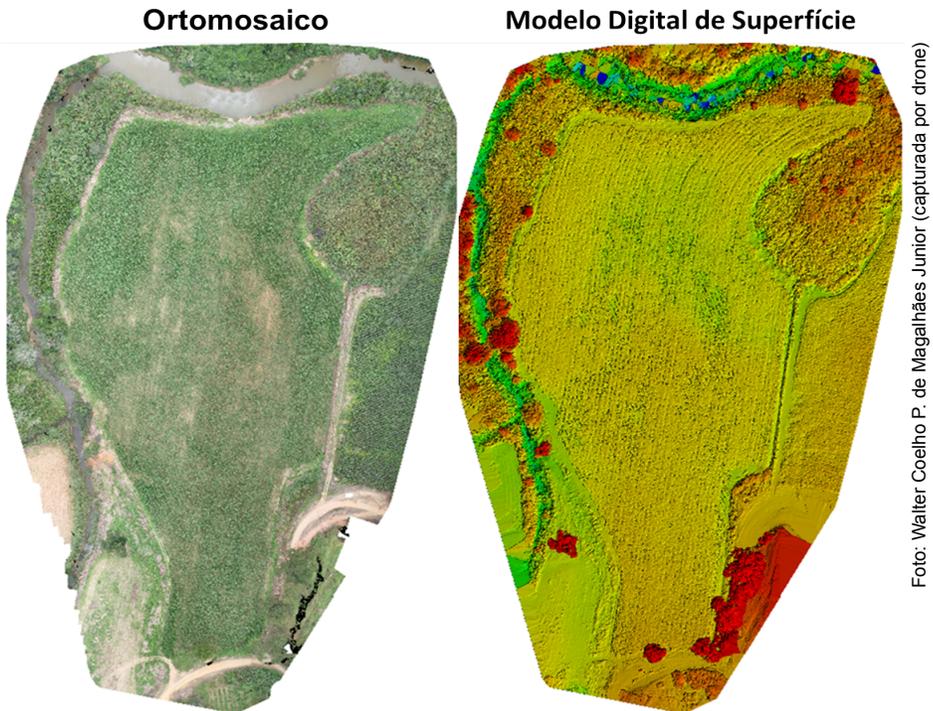


Figura 4. Produtos digitais georreferenciados elaborados após aerolevantamento em área de milho para silagem.

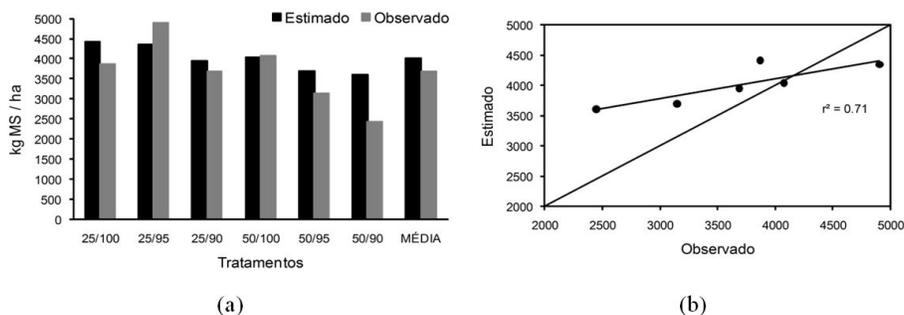


Figura 5. (a) Dados médios de disponibilidade de forragem (kg MS ha⁻¹) observada e estimada para 15 piquetes de capim Tanzânia sob diferentes tratamentos (resíduo/interceptação luminosa: 25/100; 25/95; 25/90; 50/100; 50/95 e 50/90, de acordo com Barbosa, 2004) e (b) Visualização do ajuste entre os dados médios observados e estimados de biomassa (kg/ha).

Fonte: Adaptado de Andrade et al. (2019b).

Em Queensland/Austrália, foram usados sensores embarcados em VANT para estimar a produção de biomassa e o teor de nitrogênio foliar em lavoura de cana de açúcar. Foram aplicadas cinco doses de N (0; 70; 110; 150; e 190 kg/ha), em quatro ocasiões. Os sensores utilizados foram o multiespectral e o LiDAR (*Light Detection and Range*). Os autores verificaram que, aos 142 dias após a colheita, o multiespectral foi superior ao LiDAR para a estimativa de produção de biomassa, enquanto que, ao final do ciclo da cultura, o LiDAR foi superior. Isto ocorreu porque o LiDAR consegue penetrar um dossel mais denso. O modelo multiespectral teve R² de 0,57 na estimativa de N foliar (Shendryk et al., 2020).

Estimativas volumétricas obtidas por interferometria por radar, estereoscopia de imagens ou resposta ao pulso eletromagnético por LiDAR permitem denotar a estrutura física da vegetação e, em consequência, da biomassa. Essas informações podem embasar a tomada de decisão sobre o ponto de corte, o rendimento nutricional ou a divisão das pastagens. Entretanto, também podem ser úteis como parte das ações de seleção de material genético, na fenotipagem ou em pesquisas forrageiras em geral.

Uso de clorofilômetro e outros sensores em pré melhoramento de gramíneas forrageiras

A seleção de materiais para uso em programas de melhoramento de plantas tem custo elevado, exigindo tempo e mão-de-obra. O clorofilômetro, aparelho portátil para medição de clorofila, pode facilitar este processo.

O clorofilômetro SPAD-502 (*Soil Plant Analysis Development*) é uma ferramenta simples e versátil, que fornece medição instantânea e não destrutiva do teor de clorofila da folha. Seu princípio está no uso da luz em comprimentos de onda nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo. A absorvância na região do vermelho indica o teor de clorofila, enquanto aquela na região do infravermelho próximo é usada para corrigir a leitura, compensando a espessura da folha e o teor de água. Como existe correlação positiva entre o índice SPAD e parâmetros de importância agrônômica, como a produção de matéria seca, produção de grãos, tolerância à seca ou ao alagamento, entre outros, o mesmo pode ser usado na seleção de materiais promissores no melhoramento vegetal.

Em Coronel Pacheco/MG, pesquisadores da Embrapa Gado de Leite analisaram 100 materiais no Banco Ativo de Germoplasma de Capim elefante e verificaram que o índice SPAD, medido com sensor infravermelho, conseguiu diferenciar os materiais do grupo “Cameroon” daqueles pertencentes ao grupo “Napier” (D’Oliveira et al., 2020). Esta descoberta abre possibilidades para a pré-seleção de materiais nos programas de melhoramento de capim elefante.

Foram avaliados dez híbridos de *Brachiaria decumbens*, com relação à tolerância ao alagamento do solo, em casa de vegetação durante 30 dias. Entre os parâmetros medidos, verificou-se que o índice SPAD de plantas suscetíveis ao alagamento foi de 31,4, enquanto naquelas tolerantes ao alagamento foi de 42,3 (Dias-Filho et al., 2018). Como o estresse ao alagamento provoca diminuição no teor de clorofila da folha, o índice SPAD poderia ser utilizado para separar genótipos quanto ao grau de tolerância ou susceptibilidade ao alagamento do solo.

No melhoramento de *Cynodon*, o trabalho de seleção, fenotipagem e medição de parâmetros agrônômicos pode ser feito por meio de câmeras com sensores ópticos transportados por VANTs. Em Coronel Pacheco/MG, foram feitas medições de 48 materiais do gênero *Cynodon* e duas testemunhas (Tifton 85 e Estrela Roxa), correlacionando os índices de vegetação com vigor, peso verde, nota do técnico (avaliação visual) e volume de forragem. As medições foram eficientes em identificar os fenótipos mais promissores para o melhoramento (Hott et al., 2019b).

Aplicação de herbicidas com veículos aéreos não tripulados (VANTs)

Os VANTs fornecem dados com alta resolução espacial e são muito utilizados na AP. Apesar de limitações como a duração do voo e o tempo para

processamento de imagens, os VANTs podem ser utilizados no manejo de plantas daninhas. Sua precisão é maior do que outras plataformas (Tabela 3).

Existem duas possibilidades de uso de VANTs para o manejo de precisão de plantas daninhas (Huang et al., 2018):

- sensoriamento remoto e sistemas de aplicação a taxas variáveis no mesmo VANT, funcionando em tempo real; e
- sensoriamento remoto e sistemas de aplicação a taxas variáveis em dois VANTs separados, funcionando em tempo real.

Em Stoneville/EUA, foram usados VANTs para avaliar a presença de amaranço em soja, diferenciando plantas resistentes ao glifosato daquelas sensíveis. Foi utilizada uma câmera multiespectral e altura de voo de 10 m, que permitiu separar plantas resistentes daquelas suscetíveis ao herbicida (Huang et al., 2018).

Em teste de pulverização com VANT quadricóptero, com distância de 1,0 m entre os motores e autonomia de voo de 10 minutos, foram utilizados os ambientes interno e externo, usando água com corante azul e discos de papel vermelho como alvo. Verificou-se que o vento leve não prejudicou a pulverização, sendo que a cobertura do alvo foi superior a 91% (Rijk et al., 2018).

O planejamento de voo de um VANT possibilita cobertura uniforme da área de monitoramento e aplicação (Figura 6). Esta etapa é decisiva para o sucesso ou fracasso da operação, pois as baterias têm duração limitada. Além disso, fatores como direção e intensidade do vento, bem como o posicionamento de satélites da constelação para georreferenciamento, são limitantes para o voo do VANT.

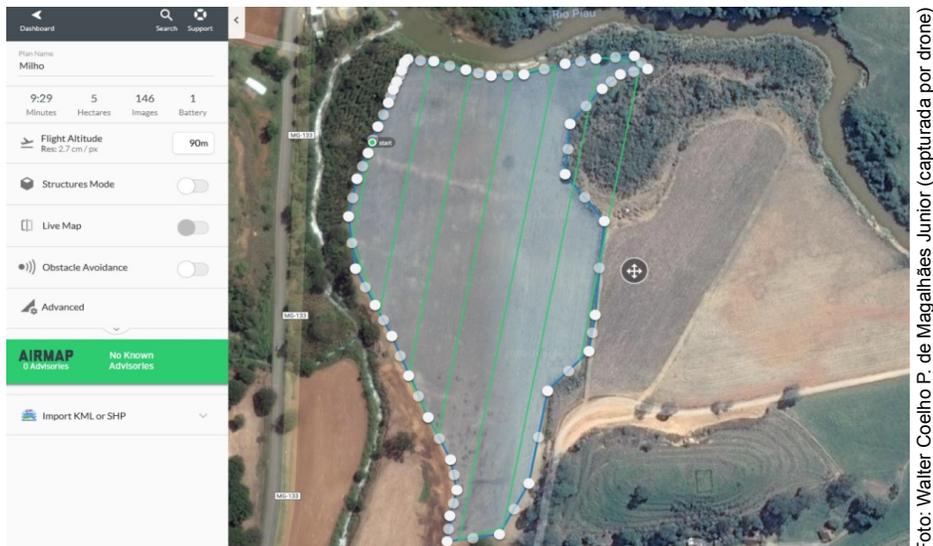


Foto: Walter Coelho P. de Magalhães Junior (capturada por drone)

Figura 6. Planejamento de voo de VANT.**Tabela 3.** Descrição e aplicação de sistemas de sensoriamento remoto no manejo de plantas daninhas.

Sistema de moriamento remoto	Altitude	Largura da faixa	Resolução espacial	Comentários
Satélite	600-800 km	10-2.800 km	1,25-1.000 m/pixel	Estudos regionais em larga escala
Aeronave tripulada	500-3.000 m	1.200-7.150 m	20-150 cm/pixel	Específico para tempo e local
VANT	10-200 m	20-400 m	1-30 cm/pixel	Altamente específico para tempo e local com análises tridimensionais contínuas
Baseado no solo	< 5m	< 5 m	0,1-1 cm/pixel	Altamente específico para tempo e local; observação discreta e restrita pelas condições da superfície do solo

Fonte: Huang et al. (2018).

Considerações finais

A AP tem muitas possibilidades de uso em pastagens, sobretudo no manejo racional. A escassez de mão de obra na atividade agropecuária levará à maior automação de processos. A aquisição de máquinas e equipamentos não é indispensável, podendo os mesmos serem alugados pelo produtor rural. O sucesso da AP depende de interdisciplinaridade de distintas áreas. Recomenda-se maior divulgação desta prática ao público-alvo, destacando seus benefícios e a relação custo-benefício, para facilitar sua adoção.

Referências

AKIYAMA, T.; KAWAMURA, K. Grassland degradation in China: methods of monitoring, management and restoration. **Grassland Science**, v. 53, n. 1, p. 1-17, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1744-697X.2007.00073.x>

ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHÃES JÚNIOR, W. C. P.; D'OLIVEIRA, P. S.; OLIVEIRA, J. S. **Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) como plataforma para monitoramento de produção agropecuária: estudo de caso para o milho forrageiro**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2019a. 22 p. (Embrapa Gado de Leite. Documentos, 233).

ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; MAGALHÃES JÚNIOR, W. C. P. Estimation of energy flux and biomass in pasture areas through remote sensing techniques. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 4, p. 59-65, 2019b. DOI: <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.6.4.6>

ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; GARÇON, E. A. M.; SILVA, G. B. S.; GOMES, D.; VICENTE, L. E.; BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. C. Indicativo de degradação de pastagens a partir de dados Spot Vegetation. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São José dos Campos, SP: SELPER Brasil: INPE, 2013. p. 6917-6922.

ANDRADE, R. G.; SANCHES, I. D'A.; RODRIGUES, C. A. G.; TORRESAN, F. E.; QUARTAROLI, C. F. Classificação preliminar de pastagens degradadas em microbacias da região de Guararapes-SP. In: SEMANA DE MEIO AMBIENTE, 6., 2010. Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: CBCN, 2010. 5 p.

ANDRADE, R. G.; VICENTE, L. E.; GREGO, C. R.; NOGUEIRA, S. F.; RODRIGUES, C. A. G. Análise espacial do índice de área foliar de pastagens utilizando Crop Circle e imagem WorldView-2. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.).

Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 500-506.

BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F.; HUETE, A. R. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, v. 13, n. 1, p. 95-120, 1995. DOI: <http://doi.org/10.1080/02757259509532298>

BARBOSA, R. A. **Características morfofisiológicas e acúmulo de forragem em capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. Cv. Tanzânia) submetido a frequências e intensidades de pastejo**. 2004. 116 p. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B. Agricultura de precisão em pastagens. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 492-499.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão:** boletim técnico. Brasília, DF, 2009. 32 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Superintendência Federal de Agricultura de Minas Gerais. **Estado da arte das pastagens em Minas Gerais**. Belo Horizonte: INAES, 2015. 206 p.

CHEN, J. M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 3, p. 229-242, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178>

CORDEIRO, D. G.; BATISTA, E. M.; AMARAL, E. F. **Utilização do equipamento penetrômetro de cone para identificação dos níveis de compactação do solo**. Rio Branco: Embrapa Acre, 1998. 2 p. (Embrapa Acre. Instruções Técnicas, 15).

DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; COLSTOUN, E. B.; McMURTRY III, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectances. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, n. 2, p. 229-239, 2000. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](http://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9)

D'OLIVEIRA, P. S.; SUZUKI, L. S.; CARNEIRO, J. C.; MACHADO, J. C.; PRATES, J. F.; ROCHA, J. R. A. S. C. Use of SPAD index in elephantgrass pre-breeding. **Semina. Ciências Agrárias**, v. 41, n. 3, p. 1047-1052, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2020v41n3p1047>

DIAS-FILHO, M. B.; FREITAS, M. V.; LOPES, M. J. S.; CRUZ, E. D.; BARRIOS, S. C. L.; VALLE, C. B. **Tolerância relativa de híbridos de**

Brachiaria decumbens ao alagamento do solo. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2018. 23 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 127).

DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens:** o que é e como evitar. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 19 p.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 36 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 402)

EARTHEXPLORER. Reston: U.S. Geological Survey, 2022. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 12 jun. 2022.

FONTANELI, R. S.; MEINERZ, G. R.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; BIAZUS, V.; FÁVERO, D.; REBECHI, I. A. A contribuição das forrageiras de inverno para a pecuária de leite. In: VILELA, D.; FERREIRA, R. P.; FERNANDES, E. N.; JUNTOLLI, F. V. (ed.). **Pecuária de leite no Brasil:** cenários e avanços tecnológicos. Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 239-253.

FRANCO, V. R.; ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; FONSECA, L. G.; PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M. Soluções mobile para estimativa de índices de vegetação aplicados ao monitoramento de pastagens. In: RIBEIRO, J. C. (org.). **Aspectos científicos e tecnológicos nas ciências agrárias.** Ponta Grossa: Atena, 2020. v. 3, p. 176-185. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.34420240916>

GALVANIN, E. A. S.; NEVES, S. M. A. S.; CRUZ, C. B. M.; NEVES, R. J.; JESUS, P. H. H.; KREITLOW, J. P. Avaliação dos índices de vegetação NDVI, SR e TVI na discriminação de fitofisionomias dos ambientes do Pantanal de Cáceres/MT. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 3, p. 707-715, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-509820142403018>

GAMEIRO, S.; TEIXEIRA, C. P. B.; SILVA NETO, T. A.; LOPES, M. F. L.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; ZIMBACK, C. R. L. Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na sub-bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. **Terrae**, v. 13, n. 1/2, p. 15-22, 2016. Disponível em: <https://www.ige.unicamp.br/terrae/V13/PDFv13/TE067-2.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2022.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)

GITELSON, A. A.; GRITZ, U.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for nondestructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**, v.160, n. 3, p. 271-282, 2003.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modelling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 337-352, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.013>

HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; MAGALHÃES JÚNIOR, W. C. P. Avaliação de degradação e fitossanidade de pastagens usando séries temporais de imagens de satélite. In: SILVA, H. C. (org.). **Engenharia sanitária e ambiental**. Ponta Grossa: Atena, 2019a. p.173-182.

HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; MAGALHÃES JÚNIOR, W. C. P.; BENITES, F. R. G. Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para estimativa de vigor e de correlações agrônômicas em genótipos de capim Cynodon. In: SILVA, H. C. (org.). **Engenharia sanitária e ambiental**. Ponta Grossa: Atena, 2019b. p. 235-244.

HOTT, M. C.; CARVALHO, L. M. T.; ANTUNES, M. A. V.; RESENDE, J. C.; ROCHA, W. S. D. Analysis of grassland degradation in Zona da Mata, MG, Brazil, based on NDVI time series data with the integration of phenological metrics. **Remote Sensing**, v. 11, p. 2956-2980, 2019c. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11242956>

HOTT, M. C.; CARVALHO, L. M. T.; ANTUNES, M. A. H.; ALVES, H. M. R.; ROCHA, W. S. D. Estimativa de expoentes de Hurst para séries temporais de imagens NDVI/MODIS em regiões de pastagem da Zona da Mata de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015. p. 4065-4072.

HUANG, Y.; REDDY, K. N.; FLETCHER, R. S.; PENNINGTON, D. UAV low-altitude remote sensing for precision weed management. **Weed Technology**, v. 32, n. 1, p. 2-6, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1017/wet.2017.89>

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. Agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21-33.

MANTOVANI, E. C.; QUEIROZ, D. M.; DIAS, G. P. Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas, MG. **Mecanização e agricultura de precisão**. Lavras: UFLA: SBEA, 1998. p. 109-157.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 584-590, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000500015>

MOTOHKA, T.; NASAHARA, K. N.; OGUMA, H.; TSUCHIDA, S. Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. **Remote Sensing**, v. 2, n. 10, p. 2369-2387, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs2102369>

NUNES, E. H.; MACHADO, T. M.; REYNALDO, E. F.; PEREIRA, C. S. Métodos de interpolações de dados obtidos por sensores de agricultura de precisão. **Nativa**, v. 6, n. 6, p. 681-688, 2018. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i6.5428>

PARENTE, L.; FERREIRA, L. Assessing the spatial and occupation dynamics of the Brazilian pasturelands based on the automated classification of MODIS Images from 2000 to 2016. **Remote Sensing**, v. 10, p. 606-619, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10040606>

PENUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v. 31, n. 2, p. 221-230, 1995.

PEREIRA, O. J. R.; FERREIRA, L. G.; PINTO, F.; BAUMGARTEN, L. Assessing pasture degradation in the Brazilian cerrado based on the analysis of MODIS NDVI time series. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1761-1775, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10111761>

PINGUELLO, A. J. C.; TAMEIRÃO, E. R.; GONZAGA, P. H. A.; FERRANTE, M.; FERNÁNDEZ, F. E. Uso de índice de vegetação da diferença normalizada na estimativa de produção de forragem. **PubVet**, v. 14, n. 3, p. 1-7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31533/pubvet.v14n3a538.1-7>

QUI, J.; CHEHBOVNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H.; SOROOSHIAN, S. A Modified soil adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. 2, p. 119-126, 1994.

RIBATSKI, E. O.; SANTOS, F. S.; NOGARA NETO, F. Revisão sobre utilizações de RPAs no cenário agrícola. **Brazilian Journal of Technology**, v. 1, n. 2, p. 313-333, 2018.

RIJK, L. J.; BEEDIE, S. M.; STOL, K. A. Precision weed spraying using a multirotor UAV. In: INTERNATIONAL MICRO-AIR VEHICLES CONFERENCE, 10., 2018, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: [s.n.], 2018. p. 1-6.

RISSO, J.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, R. D. V. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900017>

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing Environment**, v. 55, n. 2, p. 95-107, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)

ROUJEAN, J.-L.; BREON, F.-M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirecional reflectance measures. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 3, p. 375-384, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00114-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00114-3)

SALMAN, A. K. D.; SOARES, J. P. G.; CANESIN, R. C. **Métodos de amostragem para avaliação quantitativa de pastagens**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2006. 6 p. (Embrapa Rondônia. Circular Técnica, 84).

SHENDRYK, Y.; SOFONIA, J.; GARRAD, R.; RIST, Y.; SKOCAJ, D.; THORBURN, P. Fine-scale prediction of biomass and leaf nitrogen content in sugarcane using UAV LiDAR and multispectral imaging. **Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 92, n. 10, article 102177, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102177>

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 58-73.

TUELLER, P. T. Remote sensing technology for rangeland management applications. **Journal of Range Management**, v. 42, n. 6, p. 442-453, 1989. DOI: <https://doi.org/10.2307/3899227>

VILLAMUELAS, M.; FERNÁNDEZ, N.; ALBANELL, E.; GÁLVEZ-CERÓN, A.; BARTOLOMÉ, J.; MENTABERRE, G.; LÓPEZ-OLVERA, J. R.; FERNÁNDEZ-AGUILAR, X.; COLOM-CADENA, A.; LÓPEZ-MARTÍN, J. M.; PÉREZ-BARBERÍA, A. J.; GAREL, M.; MARCO, I.; SERRANO, E. The Enhanced Vegetation Index (EVI) as a proxy for diet quality and composition in a mountain ungulate. **Ecological Indicators**, v. 61, n. 2, p. 658-666, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.10.017>

XING, N.; HUANG, W.; XIE, Q.; SHI, Y.; YE, H.; DONG, Y.; WU, M.; SUN, G.; JIAO, Q. A transformed triangular vegetation index for estimating winter wheat leaf area index. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, article 16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12010016>

WORLDVIEW-2. Curitiba: EngeSat, 2013. Disponível em: <http://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/world-view-2/>. Acesso em: 12 jun. 2022.

Exemplares desta edição
podem ser adquiridos na:

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Embrapa Gado de Leite
Rua Eugênio do Nascimento, 610 -
Bairro Dom Bosco
36038-330 - Juiz de Fora – MG
Fone: (32) 3311-7405
www.embrapa.br
cnpgl.atende@embrapa.br

1ª edição
on-line
<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br>
(Digite o título e clique em
"Pesquisar")

Presidente
Marco Antônio Machado
Secretário-Executivo
Carlos Renato Tavares de Castro

Membros
Cláudio Antônio Versiani Paiva, Deise Ferreira Xavier, Edna Froeder Arcuri, Fausto de Souza Sobrinho, Fernando César Ferraz Lopes, Francisco José da Silva Ledo, Frank Ângelo Tomita Bruneli, Inácio de Barros, Jackson Silva e Oliveira, Juarez Campolina Machado, Letícia Sayuri Suzuki, Márcia Cristina Azevedo Prata, Marta Fonseca Martins, Rui da Silva Verneque, Vilmar Gonzaga, William Fernandes Bernardos

Supervisão editorial
Carlos Renato Tavares de Castro

Revisão de texto
Carlos Renato Tavares de Castro

Normalização bibliográfica
Carlos Renato Tavares de Castro, Rosângela Lacerda de Castro

Tratamento das ilustrações
Luiz Ricardo da Costa

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Luiz Ricardo da Costa

Foto da capa
Marcos Lopes La Falce