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

Estudo de diferentes parâmetros biofísicos de *Panicum Maximum* cv. Mombaça e
Urochloa Brizantha cv. Marandú por radiometria direta e com o novo satélite
Sentinel-2

Amparo Cisneros García

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2019

Amparo Cisneros Garcia
Engenheira Agrônoma

Estudo de diferentes parâmetros biofísicos de *Panicum Maximum* cv. Mombaça e *Uroclhoa*
Brizantha cv. Marandú por radiometria direta e com o novo satélite Sentinel-2
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PETERSON RICARDO FIORIO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

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

García, Amparo Cisneros

Estudo de diferentes parâmetros biofísicos de *Panicum Maximum* cv. Mombaça e *Uroclhoa Brizantha* cv. Marandú por radiometria direta e com o novo satélite Sentinel-2 / Amparo Cisneros García. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

118 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Sensoriamento remoto 2. Sentinel-2 3. Índices de vegetação 4. Pasto I. Título

AGRADECIMENTOS

Desafio tão grande quanto escrever a Tese, foi apenas utilizar uma página para agradecer as pessoas que fizeram parte desta minha trajetória em Piracicaba.

Início os agradecimientos por meus pais, que sempre primaram pela minha educação. Obrigada **Jose Luis Cisneros** e **Chelo García** pelo amor, carinho e pelo apoio incondicional ao longo da minha vida. Além de me oferecerem a oportunidade de estudar, sempre estiveram muito presentes, ainda estando na distância, e sou muito feliz por isso. Também agradeço meu irmão **Diego Cisneros** e minhas sobrinhas **Lucía** e **Yaiza Cisneros**, pelo amor e carinho que sempre demonstraram. Vocês são tudo para mim e sou muito grata pela família que tenho.

Ao meu companheiro de vida, meu amor, amigo e melhor parceiro que poderia ter, **Rafael Barros**. Por estar ao meu lado e me apoiar, sempre me fazendo acreditar que chegaria ao final desta difícil, porém gratificante etapa. Também agradecer toda a família **Barros** pelo carinho que demonstraram sempre.

À Universidade de São Paulo e **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”** e a todos os professores do curso de Pós-graduação em Engenharia de Biossistemas, pelas condições de aprendizagem, oferecidas durante o transcorrer do curso.

Ao meu orientador, Prof. **Peterson Ricardo Fiorio**, que apresentou novos caminhos e desafios nessa jornada, contribuindo para minha formação profissional.

A Prof. **Patricia Menezes**, **Sandra Furlan** e **Gustavo Bayma** pela ajuda e colaboração nesse projeto.

Gostaria de expressar minha gratidão a **Jesús Delegido**, pelo seu suporte, orientação, amizade e por me abrir as portas da Universitat de Valencia. Também agradecer a todas as pessoas que formam parte do **IPL**, pelo acolhimento ao longo do intercâmbio.

Aos funcionários do departamento de Engenharia de Biossistemas, pela cordialidade e suporte sempre que necessitei, em especial **Ricardo**, **Gilmar**, **Lúcia** e **Seu Antonio**.

Ao **CNPq** (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos e auxílio financeiro que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós-graduação e a operacionalização do estudo. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (**FAPESP**), por fomentar o projeto de pesquisa nº 2013/22435-9, na aquisição dos sensores utilizados nesse projeto.

Ao Prof. **Benito Moreira de Azevedo**, porque sempre foi e será meu orientador. Obrigada pelo carinho, amizade e por ter me incentivado em vir ao Brasil.

Gostaria de agradecer também as amigas que cultivei nos anos em que estive na instituição, em especial **Mitsuhiko Reinaldo** e **Hugo T.Seixas** (sem vocês teria sido impossível chegar até o final do experimento). Também agradecer ao grupo **TOGOGEO** e a pós-doc Ana Paula Barbosa pelo apoio e suporte ao longo do experimento de campo.

Aos meus amigos da Espanha que ainda estando na distância sempre mandaram as melhores para que esse processo chegasse ao fim. Em especial, a **Felipe**, **Amparo**, **Marta**, **Esther**, **Javi**, **Carlinhos**, **Bea**, **Marta** e todos os amigos da **UPV**.

Aos amigos que fiz em Piracicaba ao longo desse período em especial minha parceira **Lina** e **Natália Cabral**, que sempre foram meu grande apoio. Também agradecer ao **Gaúcho**, **Felipe**, **Miguel**, **Jake**, **Clarissa**, **Gabriela**, **Jorge**, **Karina**, **Marina**, **Leka**, **Viviane**, **Livia**, **Maiara** e **Caio** pela amizade.

A toda a família do **B.E.M** por me mostrar novos caminhos e alternativas de entendimento.

EPÍGRAFE

*“Que nada nos defina.
Que nada nos sujeite.
Que a liberdade seja a nossa própria substância.”*

Simone Beauvoir

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERENCIAS	11
2. ANÁLISE ESPECTRAL DAS FORRAGEIRAS <i>PANICUM MAXIMUM</i> CV. MOMBAÇA E <i>UROCHLOA BRIZANTHA</i> CV. MARANDÚ SUBMETIDAS A DIFERENTES DOSES DE NITROGENIO	15
2.1. INTRODUÇÃO	16
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	18
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
2.4. CONCLUSÕES	42
REFERÊNCIAS	42
3. SELEÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA RADIOMETRIA DIRETA EM CAMPO PARA <i>PANICUM MAXIMUM</i> CV. MOMBAÇA E <i>UROCHLOA BRIZANTHA</i> CV. MARANDÚ	51
3.1. INTRODUÇÃO	52
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	54
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.4. CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS	75
4. ESTIMATIVA DE PARAMETROS BIOFÍSICOS DE FORRAGEIRAS TROPICAIS A PARTIR DO SATÉLITE SENTINEL-2	85
4.1. INTRODUÇÃO	86
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	88
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
4.4. CONCLUSÕES	110
REFERÊNCIAS	110

RESUMO

Estudo de diferentes parâmetros biofísicos de *Panicum Maximum* cv. Mombaça e *Urochloa Brizantha* cv. Marandú por radiometria direta e com o novo satélite Sentinel-2

No Brasil, a área utilizada para pastagens é maior comparada com a área utilizada para as culturas agrícolas, com cerca de 158,6 milhões de hectares de pastagens. Sendo que as pastagens são extremamente importantes para a produção de carne bovina já que cerca de 95 % é produzida para alimentar os rebanhos. O principal nutriente para a manutenção da produtividade em forrageiras é o nitrogênio (N), sendo um dos principais nutrientes que influencia diretamente as características morfofisiológicas, interferindo na produção e na qualidade da forragem. Nos últimos anos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto tem se expandido nas áreas de ciências agrárias, mostrando-se uma ferramenta muito útil no monitoramento e gerenciamento da adubação nitrogenada nas culturas. Por tanto o objetivo do trabalho foi abordar o potencial de dados de sensoriamento remoto, mais especificamente para as forrageiras *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Urochloa Brizantha* cv. Marandú, obtidos por meio de sensor passivo e convertidos para diferentes índices de vegetação (IVs), na estimativa de parâmetros biofísicos, tais como: teor foliar de nitrogênio (TFN), produtividade, altura e índice de área foliar (IAF). Também foram simulados os dados para o satélite Sentinel-2 e testados, em áreas com plantio de *Brachiaria Brizantha* cv. Piatã. Os IVs utilizados foram o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), TBI (Three Band Index), DLH (Difference Line Height), NAOC (Normalized Area Over reflectance Curve) e TBDO (Three Band Dall'Olmo). O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em Piracicaba, São Paulo. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições, sendo a ureia o fertilizante nitrogenado utilizado ao longo do experimento. As doses aplicadas para a cv. Mombaça foram três de 200, 400, 600 kg ha⁻¹ e para a cv. Marandú foram aplicadas doses de 175, 350 e 525 kg ha⁻¹, para ambas cultivares as parcelas testemunhas não receberam adubação nitrogenada (0 kg ha⁻¹). Ao longo do ciclo da cultura, avaliou-se a sua altura, produtividade, IAF e o TFN e a sua resposta espectral de 400 até 920 nm. Os resultados demonstraram que as duas forrageiras foram responsivas à adubação nitrogenada, modificando a sua resposta espectral ao longo das aplicações, principalmente na região do visível (verde 550 nm) e do infravermelho próximo (a partir dos 700 nm). E também provaram que é possível prever parâmetros biofísicos por meio de espectroscopia *in situ* e através do satélite Sentinel-2.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Sentinel-2; Índices de vegetação; Pasto

ABSTRACT

Study of different biophysical parameters of *Panicum Maximum* cv. Mombaça and *Uroclhoa Brizantha* cv. Marandý by radiometry and with the new Sentinel-2 satellite

In Brazil, the area used for pasture is larger compared to the area used for agricultural crops, representing about 158,6 million hectares of pasture. Pastures are extremely important for beef production, as 95% is produced to feed the herds. The main nutrient for the maintenance of forage productivity is nitrogen (N), which influences directly the morphophysiological characteristics, interfering in the production and on the quality of the forage. In recent years, the use of remote sensing techniques has expanded in agricultural sciences, proving to be a very useful tool in the monitoring and management of nitrogen fertilization in crops. Therefore, the objective of this study was to address the potential of remote sensing data for the forages *Panicum maximum* cv. Mombasa and *Urochloa brizantha* cv. Marandú. Data were obtained by passive sensor and converted into different vegetation indices (IVs), in the estimation of biophysical parameters, such as: foliar nitrogen content (NTF), productivity, height and leaf area index (LAI). The data for the Sentinel-2 satellite were also simulated and tested in areas with *Brachiaria brizantha* cv. Piatã. The IVs used were NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), TBI (Three Band Index), DLH (Difference Line Height), NAOC (Normalized Area Over Reflectance Curve) and TBDO (Three Band Dall'Olmo). The experiment was carried out at the "Luiz de Queiroz" School of Agriculture (ESALQ/USP), in Piracicaba, São Paulo. The experimental design applied was a randomized block, with four treatments and four replicates, and with urea used throughout the experiment as a nitrogen fertilizer. The doses applied for cv. Mombaça were three of 200, 400 and 600 kg ha⁻¹ and for cv. Marandú were applied 175, 350 and 525 kg ha⁻¹ doses. For both cultivars the control plots did not receive nitrogen fertilization (0 kg ha⁻¹). During the culture cycle, we evaluated its height, productivity, LAI and TFN, and its spectral response of 400 to 920 nm. The results showed that the two forages were responsive to nitrogen fertilization, modifying their spectral response along the applications, mainly in the region of visible (green 550 nm) and near infrared (from 700 nm). They also proved that it is possible to predict biophysical parameters using in situ spectroscopy and by using the Sentinel-2 satellite.

Keywords: Sensing; Sentinel-2; Vegetation Index; Pasture

1. INTRODUÇÃO GERAL

Existe um aumento na demanda por alimentos e a pressão pelo uso da terra tem impulsionado mudanças na pecuária brasileira. No período de 1950 a 2006, a produção de carne bovina aumentou cerca de seis vezes, tornando o país um dos maiores produtores mundiais (Martha *et al.*, 2012). Até a década de 70, a expansão da fronteira agrícola foi o principal fator de aumento da produção de carne bovina do país (Martha *et al.*, 2012). A área utilizada para pastagens é maior comparada com a área utilizada para as culturas agrícolas, com cerca de 158,6 milhões de hectares de pastagens de acordo com o Censo Agropecuário Brasileiro (IBGE, 2017). O mesmo censo, relata que os índices de lotação animal das pastagens são baixos, pouco mais que 1,16 unidades animais por hectare ¹ (UA ha⁻¹). Segundo Velho (2016) para as regiões brasileiras, as taxas de lotação animal estão concentradas entre 0,40 e 0,5 UA ha⁻¹ para pastagens extensivas, demonstrando a baixa eficiência do uso das terras para produção animal. A partir de 1975, no entanto, o aumento de produção passou a ser explicado principalmente pelos aumentos de produtividade, que refletiram aumentos na taxa de lotação animal das pastagens e no ganho de peso individual dos bovinos, decorrentes da adoção de tecnologias pelos produtores (Martha *et al.*, 2012). Segundo Dias Filho (2014) quanto maior é a taxa de lotação animal maior será a eficiência do sistema produtivo. Por tanto, se faz necessário uma intensificação na produção pecuária através da utilização de forrageiras com alta capacidade produtiva de matéria seca e qualidade nutricional.

Segundo De Alencar *et al.* (2010) as principais espécies utilizadas pelo seu elevado potencial produtivo e pela sua qualidade são as cultivares dos gêneros *Pennisetum*, *Cynodon*, *Panicum* e *Urochloa*. As gramíneas do gênero *Urochloa*, assim como as *Panicum*, estão entre as forrageiras mais utilizadas em sistema de produção animal no Brasil (Silva, 2004). Dentro do gênero *Urochloa* uma das cultivares mais utilizadas é *U.brizantha* cv. Marandú com 45% de toda a área com pastagens cultivadas (Euclides *et al.*, 2010), que correspondem a aproximadamente 45 milhões de hectares. A espécie *Panicum maximum* apresenta um dos maiores potenciais de produção de matéria seca (PMS) em ambientes subtropicais e tropicais conhecidos, podendo atingir produção anual de matéria seca em torno de 33 t ha⁻¹ (Galindo *et al.*, 2017). No entanto, no Brasil existem pastagens degradadas, devido ao solo com baixa fertilidade e falta de nutrientes. Dessa forma, os indicadores produtivos e zootécnicos apontam para aumentos de produtividade muito modestos em relação ao que poderia ser obtido (Nascimento *et al.*, 2004).

A fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes interferem diretamente no crescimento das plantas e na produtividade das pastagens, sendo que a reposição insuficiente de nutrientes é apontada como uma das causas de degradação de pastagens no Brasil (Boddey *et al.*, 2004). O nitrogênio (N) representa um dos macronutrientes mais limitados em forrageiras tropicais. De forma geral, as forrageiras são bastante responsivas aos fertilizantes nitrogenados aumentando o conteúdo de proteína bruta (PB), número de perfilhos e folhas e, consequentemente, na produção de matéria seca (MS), uma vez que outros fatores como a disponibilidade de água e outros nutrientes não estejam limitando (Monteiro *et al.*, 2013). Vários autores têm demonstrado a influência positiva do N sob o aumento da matéria seca (MS), relação lamina/colmo, teores de proteína bruta e índice de área foliar para diferentes tipos de forrageiras tropicais (Andrade *et al.*, 2003; Cunha, 2005; Cunha *et al.*, 2010; De Alencar *et al.*, 2010; Fagundes *et al.*, 2012; Bruno *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2015; Region *et al.*,

¹ 1 UA corresponde a 450 Kg de peso vivo animal.

2015; Foster *et al.*, 2016). Corsi e Nussio (1992) asseguram que o principal efeito do N é aumentar a produção de matéria seca (MS) e, conseqüentemente, capacidade de suporte do pasto (UA/ha).

Nos últimos anos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto tem se expandido nas áreas de ciências agrárias, mostrando-se uma ferramenta muito útil no monitoramento e gerenciamento da administração da adubação nitrogenada nas culturas. Fonseca *et al.* (2002) observaram um efeito significativo na grama batatais (*Paspalum notatum*) sob três níveis de adubação nitrogenada (0, 200 e 400 kg ha⁻¹), relacionando linearmente os níveis de N e a produção de biomassa. Wang *et al.* (2015), avaliando diferentes métodos para a estimativa de nutrientes na pastagem *C. cinerascens*, a traves da resposta hiperespectral do dossel, encontraram que os comprimentos de onda mais sensíveis para a estimativa de nitrogênio correspondem a região do red-edge (715 nm e 731 nm) o que é útil para entender o mecanismo preditivo de estimativa de nutrientes desse capim no nível do dossel. Estes trabalhos têm mostrado resultados promissores, gerando modelos com boa exatidão no diagnóstico da condição nutricional da cultura em relação ao nitrogênio. Costa et al. (2016) estudando a influência do N no capim Marandú observaram que a eficiência do mesmo aumento segundo as doses de N. Ou seja, os maiores rendimentos de matéria seca, índice de área foliar (IAF) e aumento da taxa foliar aconteceram com a maior dose aplicada que oscilou por volta de 205 kg ha⁻¹. Simões *et al.* (2015) trabalharam com capim Tifton 85 e adubação nitrogenada a partir de informações contidas em imagens hiperespectrais, medindo o IAF, massa seca da parte aérea (MSPA), Índice de cobertura verde (ICV) e o Índice de vegetação normalizada (NDVI). Todos eles responderam positivamente ao incremento do nitrogênio podendo concluir que é possível avaliar o estado nutricional da planta a partir de imagens hiperespectrais.

Segundo Morais *et al.* (2018), a estimativa da massa de forragem em pastagens pode ser realizada através de métodos diretos e indiretos, porém os métodos indiretos apresentam vantagens em relação aos métodos diretos, visto que não necessitam de corte da biomassa de forragem amostrada e permitem a avaliação em grandes áreas. Assim, as técnicas de sensoriamento remoto (SR) apresentam-se com uma ferramenta viável para criar metodologias de manejo das forrageiras tropicais, permitindo estimar a produtividade em grandes áreas de pastagem sem necessidade de realizar coleta de amostras *in situ*.

Diferentes formas de uso das leituras dos sensores vêm sendo propostas. Sudduth *et al.* (2015) afirmam que muitos dos algoritmos utilizados pelos sensores, empregam como dados de entrada a informação espectral do dossel de plantas em formato de índices de vegetação (IV's), que geralmente envolvem a região do visível (VIS) e do infravermelho próximo (Molin *et al.*, 2015), regiões de 370 a 699 nm e de 780 a 1.500 nm, respectivamente. O potencial dos IVs para determinação das variáveis biofísicas tem sido amplamente demonstrado em numerosos estudos: eles são intuitivos, simples e rápidos (Colombo *et al.*, 2003; Gitelson *et al.*, 2005; Clevers *et al.*, 2013). Segundo Gnyp *et al.* (2015), o uso de IVs é imprescindível para o monitoramento da cultura durante seu desenvolvimento na lavoura e para a criação de modelos de estimativa de biomassa.

Estudos com índices de vegetação têm surgido nos últimos anos, procurando identificar as melhores bandas espectrais para diferentes parâmetros biofísicos. Segundo Baret (1991) a refletância do dossel depende de uma interação complexa de vários fatores internos e externos que podem variar significativamente no tempo e no espaço e também de um tipo de cultura para outro. O autor também relata que nenhuma relação existente é universal entre a variável dossel e uma assinatura espectral. Conseqüentemente, essas relações empíricas simples serão específicas de local, tempo e cultura e, portanto, não diretamente aplicáveis para uso operacional em

grande escala (Baret *et al.*, 1991; Colombo *et al.*, 2003). Delegido *et al.* (2010) encontraram um novo índice chamado NAOC (Normalized area over reflectance curve) com base no cálculo da área sob a curva de refletância no intervalo entre o vermelho e o infravermelho próximo (NIR), dividido pelo máximo valor da refletância. Dessa forma, ofereceu um método simples para estimar a clorofila das folhas a partir de SR, sem a necessidade de medições adicionais.

No entanto, um problema fundamental da abordagem dos IVs, para estimação de parâmetros biofísicos, é sua falta de singularidade para cada cultivo. O N interfere diretamente no teor de clorofila e, consequentemente, nas características espectrais da mesma e nas variáveis que compõem a produtividade final. No entanto, para utilização correta do sensoriamento remoto no monitoramento da cultura de *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Uroclhoa brizantha* cv. Marandú, ainda se faz necessário um conhecimento mais detalhado do seu comportamento espectral.

Vários estudos têm sido realizados com base em espectrorradiometria de campo. Foster *et al.* (2017) estudando como prever a concentração de N e biomassa, através de dados hiperespectrais obtidos com um espectrorradiômetro ASD FieldSpec FR, em diferentes tipos de grama e sorgo obtiveram que os melhores resultados foram para o índice de vegetação de nitrogênio (NNVI), o qual é baseado no índice NDVI. Contudo, o uso de dados hiperespectrais e de índices de vegetação requer um estudo prévio sobre as faixas espectrais e os índices mais apropriados. Segundo Thenkabail *et al.* (2000) diversos estudos vêm sendo realizados com o intuito de determinar as melhores bandas na estimativa de variáveis biofísicas utilizando-se dados hiperespectrais. Para a determinação das melhores bandas, faz-se necessário a realização de uma análise de regressão de todas as combinações possíveis entre duas ou três bandas estreitas, de acordo com determinado índice hiperespectral, para se estimar uma determinada variável biofísica.

1.1 Hipótese

Espera-se que as leituras da resposta espectral das pastagens sejam diretamente influenciadas pela quantidade de N disponibilizado e absorvido pela planta, podendo ser observadas suas diferenças no nível terrestre e orbital.

1.2 Objetivo

O objetivo geral do trabalho foi estudar a influência do nitrogênio nas duas forrageiras tropicais e abordar o potencial de dados de sensoriamento remoto, convertidos para diversos índices de vegetação, na estimativa de diferentes parâmetros biofísicos.

REFERENCIAS

- Andrade, A. C., Miranda, D., Fonseca, D. a, Queiroz, D. S., Salgado, L. T., & Cecon, P. R. (2003). Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier). *Ciência Agrotecnica, edição esp*(November), 1643–1651.
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2–3), 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Boddey, R. M., MacEdo, R., Tarré, R. M., Ferreira, E., De Oliveira, O. C., De, C., ... Urquiaga, S. (2004). Nitrogen cycling in *Brachiaria* pastures: The key to understanding the process of pasture decline.

- Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(2), 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.010>
- Bruno, A., Oliveira, B., Andrade, A. C., Magalhães, J. A., Rodrigues, H. N., Mehl, H. U., ... Santos, D. S. (2015). Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia ISSN: 1982-1263 Produtividade do capim-digitária (*Digitaria* spp .) sob diferentes doses de nitrogênio 1 Productivity of *Digitaria* grass in different doses of nitrogen, (1993), 70–75.
- Clevers, J. G. P. W., & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>
- Colombo, R., Bellingeri, D., Fasolini, D., & Marino, C. M. (2003). Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 86(1), 120–131. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00094-4)
- Corsi, M. ., & Nussio, L. G. (1992). Manejo do capim-elefante: correção e adubação do solo. In: *SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS*, 87–115.
- Costa, N. de L., Townsend, C. R., Fogaça, F. H. dos S., Magalhães, J. A., Bendahan, A. B., & Santos, F. J. de S. (2016). Produtividade de forragem e morfogênese de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob níveis de nitrogênio. *Pubvet*, 10(10), 731–735. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v10n10.731-735>
- Cunha, C. A. H. da. (2005). *Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em capim Tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e doses de nitrogênio*. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.11.2004.TDE-30112004-154918>
- Cunha, O. F. R., & Santos, Antônio Clementino dos; Araújo, Leandro Coelho de; Ferreira, E. M. (2010). PRODUTIVIDADE DO *Panicum maximum* (MOMBAÇA) EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE NITROGÊNIO. *Revista Da FZVA*, 17(1), 136–145.
- De Alencar, C. A. B., Cóser, A. C., Martins, C. E., De Oliveira, R. A., Da Cunha, F. F., & Figueiredo, J. L. A. (2010). Altura de capins e cobertura do solo sob adubação nitrogenada, irrigação e pastejo nas estações do ano. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 32(1), 21–27. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.319>
- Delegido, J., Alonso, L., González, G., & Moreno, J. (2010). Estimating chlorophyll content of crops from hyperspectral data using a normalized area over reflectance curve (NAOC). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.003>
- Dias Filho, M. B. (2014). Diagnóstico das Pastagens no Brasil. *Embrapa Amazônia Oriental, Documentos*, 22. https://doi.org/10.1163/_q3_SIM_00374
- Euclides, V. P. B., Valle, C. B., Macedo, M. C. M., Almeida, R. G., Montagner, D. B., & Barbosa, R. A. (2010). Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39, 151–168. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300018>
- Fagundes, J. L., Moreira, A. L., Freitas, A. W. de P., Henrichs, R., & Rocha, F. C. (2012). Forage production of Tifton 85 fertilized with nitrogen and subjected to continuous stocking. *Rev. Bras. Saúde Prod. Anim*, 13(2), 306–317.

- Foster, A. J., Kakani, V. G., Ge, J., Gregory, M., & Mosali, J. (2016). Discriminant analysis of nitrogen treatments in switchgrass and high biomass sorghum using leaf and canopy-scale reflectance spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 37(10), 2252–2279. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1171926>
- Foster, A. J., Kakani, V. G., & Mosali, J. (2017). Estimation of bioenergy crop yield and N status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. *Precision Agriculture*, 18(2), 192–209. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9455-8>
- Galindo, F. S., Buzetti, S., Filho, M. C. M. T., Dupas, E., & Ludkiewicz, M. G. Z. (2017). Application of different nitrogen doses to increase nitrogen efficiency in Mombasa guinegrass (*Panicum maximum* cv. mombasa) at dry and rainy seasons. *Australian Journal of Crop Science*, 11(12), 1657–1664. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.12.pne907>
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- IBGE. (2017). a G R O P E C U Á R I O. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.*, 7(01036157), 1–180. <https://doi.org/01036157>
- Martha, G. B., Alves, E., & Contini, E. (2012). Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agricultural Systems*, 110, 173–177. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.001>
- Molin, J. P., Amaral, L. R. ., & Colaço, A. (2015). *Agricultura de precisão*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Monteiro, F. A. (2013). Uso de corretivos e fertilizantes. *Forragicultura: Ciência, Tecnologia e Gestão de Recursos Forrageiros. Jaboticabal: Maria de Lourdes Brandel–ME.*, 275–290.
- Morais, L. F. de;, Carvalho, C. A. B. de;, Anjos, A. N. A. ., Viegas, C. R., & Silva, P. H. F. da. (2018). Resumo Avanços na avaliação de pastagens cultivadas com forrageiras tropicais no Brasil : Uma Revisão Abstract Advances in the evaluation of pastures cultivated with tropical forages in Brazil : A Review Resúmen Avances en la evaluación de pastos cultivad, (June), 125–136. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V11.N2.13>
- Nascimento Junior, D. D., Silva, S. C. da;, & Adese, B. (2004). *Panicum maximum.*, *System*, 19–22.
- Oliveira, A., Andrade, A., Magalhães, J., Rodrigues, B., Mehl, H., Santos, F., ... Costa, N. (2015). Produtividade do capim-digitalaria (*Digitalaria* spp.) sob diferentes doses de nitrogênio. *PubVet*, 9(2), 70–75. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v9n2.70-75>
- Region, A. J., Grande, R., & Sul, D. (2015). Determinação de Teores de Nitrogênio Foliar em Azevém (*Lolium multiflo- rum* Lam .) Nativo na Região do Alto Jacuí , Rio Grande Do Sul.
- Salimon, C., & Anderson, L. (2017). How strong is the relationship between rainfall variability and Caatinga productivity? a case study under a changing climate. *Annals of the Brazilian Academy of Science*, In Press, 90, In Press. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170143>
- Silva, S. C. da; (2004). Fundamentos para o manejo do pastejo de plantas forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum*. In *Simpósio Manejo Estratégico Da Pastagem* (pp. 347–386). Viçosa: Anais: UFV, DZO. Retrieved from <http://forragicultura.com.br/arquivos/FundamentosparamanejoBrachiariaePanicum.pdf>
- Simões, C. R., Rossiello, R. O. P., Graciosa, M. G., Machado, M. L., & Silva, C. F. da. (2015). Imagens multiespectrais para avaliação de índice de área foliar e massa seca do capim “Tifton 85”, sob adubação nitrogenada. *Ciência Rural*, 45(4), 697–703.

- Sudduth, K. A.; Drummond, S. T.; Kitchen, N. R. (2015). Operational characteristics of commercial crop canopy sensors for nitrogen application in maize. In *Precision agriculture* (v. 15, pp. 51–58).
- Thenkabail, P. S. ., Smith, R. B. ., & De-Pauw, E. . (2000). Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71, 158–182.
- Velho, P. (2016). ANAIS DO II SIMPÓSIO MANEJO SUSTENTÁVEL DAS PASTAGENS DE RONDÔNIA. *II SIMPÓSIO*.
- Wang, J., Wang, T., Skidmore, A. K., Shi, T., & Wu, G. (2015). Evaluating different methods for grass nutrient estimation from canopy hyperspectral reflectance. *Remote Sensing*, 7(5), 5901–5917. <https://doi.org/10.3390/rs70505901>

2. ANÁLISE ESPECTRAL DAS FORRAGEIRAS *PANICUM MAXIMUM* CV. MOMBAÇA E *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. MARANDÚ SUBMETIDAS A DIFERENTES DOSES DE NITROGENIO

Amparo Cisneros Garcia¹, Peterson Ricardo Fiorio¹, Jesus Delegido Gomez²

¹Departamento Engenharia de Biosistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil; ² Departamento Laboratori de Processament d'Imatges, Universitat de Valencia, Valencia, Espanha

Resumo

O nitrogênio (N) é um dos principais nutrientes que influencia diretamente as características morfofisiológicas das gramíneas forrageiras, interferindo na produção e na qualidade da forragem. Nos últimos anos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto tem se expandido nas áreas de ciências agrárias, mostrando-se uma ferramenta muito útil no monitoramento e gerenciamento da adubação nitrogenada nas culturas. Por tanto o objetivo do trabalho foi estudar a influencia do nitrogênio na resposta espectral e na produtividade da *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Urochloa Brizantha* cv. Marandú, submetido a diferentes doses de nitrogênio. O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em Piracicaba, São Paulo, no período entre Outubro de 2016 até Maio de 2017. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições, sendo a ureia o fertilizante nitrogenado utilizado ao longo do experimento. As doses aplicadas para a cv. Mombaça foram três de 200, 400, 600 kg ha⁻¹ e para a cv. Marandú foram aplicadas doses de 175, 350 e 525 kg ha⁻¹, para ambas cultivares as parcelas testemunhas não receberam adubação nitrogenada (0 kg ha⁻¹). As doses de N foram divididas em sete aplicações, sendo os tratamentos aplicados a cada 21 dias no caso da cv. Mombaça e cada 28 dias para a cv. Marandú, sempre após o corte da forrageira. Os resultados mostraram que as duas forrageiras foram responsivas à adubação nitrogenada, modificando a sua resposta espectral ao longo das aplicações, principalmente na região do visível (verde 550 nm) e no Infravermelho (a partir dos 700 nm). Dentro das doses de nitrogênio utilizadas para a cultivar Mombaça a dose 600 kg ha⁻¹ foi a que maior produtividade proporcionou, com aproximadamente 23.3 tn ha⁻¹. Para a cultivar Marandú a dose recomendada segundo esse estudo, oscilaria entre 350 kg ha⁻¹ e 525 kg ha⁻¹ já que as suas produtividades obtiveram desempenhos semelhantes, sendo 15,6 tn ha⁻¹ para a dose 350 kg ha⁻¹ e de 16, 8 tn ha⁻¹ para a dose de 525 kg ha⁻¹.

Palavras-chave: Adubação; Nitrogênio; Sensoriamento remoto; Produtividade; Pastagens

Abstract

Nitrogen (N) is one of the main nutrients that directly influences the morphophysiological characteristics of forage grasses, interfering with forage productivity and quality. In recent years, the use of remote sensing techniques has expanded in the areas of agricultural sciences, proving to be a very useful tool in the monitoring and management of nitrogen fertilization in crops. Therefore the objective of this study was to identify the effect of different doses of nitrogen on the spectral response and productivity of *Panicum maximum* cv. Mombaça and *Urochloa Brizantha* cv. Marandú. The experiment was carried out at the "Luiz de Queiroz" School of Agriculture (ESALQ / USP), in Piracicaba, São Paulo, between October 2016 and May 2017. The experimental design was a randomized complete block design with four treatments and four replicates, with urea being used as the nitrogen fertilizer throughout the experiment. The doses applied to cv. Mombaça were 200, 400, 600 kg ha⁻¹ while cv. Marandú was treated with doses of 175, 350 and 525 kg ha⁻¹. For both cultivars,

the control plots did not receive nitrogen fertilization (0 kg ha^{-1}). N doses were divided into seven applications, with treatments applied every 21 days in the case of cv. Mombaça and every 28 days for cv. Marandú, always after cutting the forage. The results showed that the two forages were responsive to nitrogen fertilization, modifying their spectral response throughout the applications, mainly in the visible region (green 550 nm) and infrared (at 700 nm). Among the nitrogen doses used for the Mombaça cultivar the dose 600 kg ha^{-1} was the one with the highest productivity, with approximately $23,3 \text{ tn ha}^{-1}$. In order to cultivate Marandú the recommended dose according to this study would vary between 350 kg ha^{-1} and 525 kg ha^{-1} , since its yields obtained similar performances, being $15,6 \text{ tn ha}^{-1}$ for the dose 350 kg ha^{-1} and of $16,8 \text{ tn ha}^{-1}$ for the dose of 525 kg ha^{-1} .

Keywords: Fertilization; Nitrogen; Remote sensing; Yield; Pasture

2.1. Introdução

A área utilizada para pastagens é maior comparada com a área utilizada para as culturas agrícolas, com cerca de 158,6 milhões de hectares de pastagens de acordo com o Censo Agropecuário Brasileiro (IBGE, 2017). O mesmo censo, relata que os índices de lotação animal das pastagens são baixos, pouco mais que 1,16 unidades animais por hectare ² (UA ha^{-1}). Segundo Velho (2016) para as regiões brasileiras, as taxas de lotação animal estão concentradas entre 0,40 e $0,5 \text{ UA ha}^{-1}$ para pastagens extensivas, demonstrando a baixa eficiência do uso das terras para produção animal. Segundo Dias Filho (2014) quanto maior é a taxa de lotação animal maior será a eficiência do sistema produtivo. Por tanto, se faz necessário uma intensificação na produção pecuária através da utilização de forrageiras com alta capacidade produtiva de matéria seca e qualidade nutricional.

Segundo De Alencar *et al.* (2010) as principais espécies utilizadas pelo seu elevado potencial produtivo e pela sua qualidade são as cultivares dos gêneros *Pennisetum*, *Cynodon*, *Panicum* e *Urochloa*. Aparentemente, as gramíneas do gênero *Urochloa*, assim como as *Panicum*, estão entre as forrageiras mais utilizadas em sistema de produção animal no Brasil (Silva, 2004). No entanto, os indicadores produtivos e zootécnicos apontam para aumentos de produtividade muito modestos em relação ao que poderia ser obtido (Nascimento *et al.*, 2004). Por tanto, se faz necessário um estudo mais detalhado sobre o manejo dessas forrageiras tropicais.

O estudo das características morfofisiológicas e estruturais das plantas forrageiras são necessários para promover o entendimento da dinâmica de produção de forragem e suas relações dentro de sistemas de produção animal em pastagens. O alongamento das folhas e colmos, assim como o aparecimento e a longevidade das folhas e perfilhos determinam o Índice de área foliar (IAF) e as características estruturais do dossel (Chapman & Lemaire, 1993).

Uma das práticas de manejo que mais impactam diretamente a produtividade das plantas forrageiras é a adubação nitrogenada. Andrade *et al.* (2003) afirmam que o uso de adubos nitrogenados tem grande impacto nos índices de produtividade e no potencial de melhoria do desempenho econômico na atividade pecuária, exercendo efeitos positivos na produção e no valor nutricional da forragem. Fagundes *et al.* (2012), estudando diferentes doses de nitrogênio (N) aplicadas sobre a cultivar Tifton 85, assume a importância do nitrogênio no processo produtivo de pastagens, pois o nitrogênio do solo, proveniente da mineralização da matéria orgânica, não é suficiente para atender à demanda de gramíneas com alto potencial produtivo. Portanto, o seu

² 1 UA corresponde a 450 Kg de peso vivo animal.

monitoramento é importante tanto em âmbito econômico quanto ambiental. Neste sentido, a adubação nitrogenada é necessária para manutenção da produtividade de gramíneas, porém, possui custo financeiro elevado, o que muitas vezes inviabiliza o uso de doses apropriadas.

Nos últimos anos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto tem se expandido nas áreas de ciências agrárias, mostrando-se uma ferramenta muito útil no monitoramento e gerenciamento da administração da adubação nitrogenada nas culturas. Cunha *et al.* (2005) trabalhou com *Panicum maximum* cv. Tanzânia e obtiveram diferenças na resposta espectral de dossel a traves do sensor portátil SPECTRON SE-590 em função de diferentes doses de nitrogênio (N) e densidades de plantio.

Mutanga *et al.* (2003) avaliaram o potencial de discriminação de diferentes doses de nitrogênio utilizando um espectroradiometro no crescimento da gramínea *Cenchrus ciliatus*, cultivado em estufa. Observaram efeitos significativos dos tratamentos na faixa de 550-750 nm. Fonseca *et al.* (2002) também observaram efeito significativo na grama batatais (*Paspalum notatum*) sob três níveis de adubação nitrogenada (0, 200 e 400 kg ha⁻¹), relacionando linearmente os níveis de N e a produção de biomassa.

Wang *et al.* (2015), avaliando diferentes métodos para a estimativa de nutrientes na pastagem *C. cinerascens*, a traves da resposta hiperespectral do dossel, encontraram que os comprimentos de onda mais sensíveis para a estimativa de nitrogenio correspondem a região do red-edge (715 nm e 731 nm) o que é útil para entender o mecanismo preditivo de estimativa de nutrientes desse capim no nível do dossel.

Estes trabalhos têm mostrado resultados promissores, gerando modelos com boa exatidão no diagnóstico da condição nutricional da cultura em relação ao nitrogênio. Costa et al. (2016) estudando a influencia do N no capim Marandú observaram que a eficiência do mesmo aumento segundo as doses de N. Ou seja, os maiores rendimentos de matéria seca, IAF e aumento da taxa foliar aconteceram com a maior dose aplicada que oscilou por volta de 205 kg ha⁻¹. Simões *et al.* (2015) trabalharam com capim Tifton 85 e adubação nitrogenada a partir de informações contidas em imagens hiperespectrais, medindo o IAF, massa seca da parte aérea (MSPA), Índice de cobertura verde (ICV) e o Índice de vegetação normalizada (NDVI). Todos eles responderam positivamente ao incremento do nitrogênio podendo concluir que é possível avaliar o estado nutricional da planta a partir de imagens hiperespectrais.

De tal modo, a melhor forma de se extrair informações provenientes da planta, é através de sensores remotos que registram as interações das plantas em diversos espectros eletromagnéticos. A maior concentração de N nas folhas pode ocasionar maior presença de lignina e fibras nas plantas. Em contrapartida, a carência de N provoca a diminuição de clorofila, fitomassa e do IAF, causando o retardo no crescimento de brotos, raízes e culmos (Jensen *et al.*, 2009).

No entanto, para utilização correta do sensoriamento remoto no monitoramento da cultura de *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Uroclhoa brizantha* cv. Marandú, ainda se faz necessário para um conhecimento mais detalhado do seu comportamento espectral. A partir desta questão, surge o interesse do presente trabalho, que visa estudar a influência das diferentes doses de N para as variedades *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Uroclhoa brizantha* cv. Marandu, a partir de dados de dossel obtidos com um sensor hiperespectral, correlacionando a interação com parâmetros biofísicos do dossel tais como; produtividade e teor foliar de nitrogênio (TFN).

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Experimentos de Campo

O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em Piracicaba, São Paulo, com latitude 22°42'15" S, longitude 47°37'23" O e altitude 546 m (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização com destaque na área experimental, Piracicaba, São Paulo, Brasil, 2018.

O solo é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico (Santos *et al.*, 2013). O clima da região é do tipo subtropical úmida, segundo a classificação de Köppen-Geiger (Cwa), com verão quente e inverno seco, com temperatura média inferior a 18 °C no mês mais frio e superior a 22 °C no mês mais quente (Kottek *et al.*, 2006). A precipitação ao longo do experimento, desde outubro de 2016 até maio de 2017, foi de 1207,1 mm, sendo os meses de novembro, dezembro e janeiro os mais chuvosos (Posto Meteorológico, Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ-USP). As parcelas foram semeadas a lanço, sendo o capim Mombuca semeado no início de fevereiro de 2016 e o Marandú em abril de 2016.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, totalizando dois blocos, cada um composto por quatro tratamentos de nitrogênio (N) e duas repetições por tratamento. Os tratamentos que foram aplicados estão descritos conforme a Tabela 1. Na mesma podemos observar os tratamentos aplicados por cada ciclo da cultura ($\text{kg ha}^{-1}\text{ciclo}^{-1}$). As adubações diferenciadas foram realizadas após o primeiro corte da cultura.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos experimentais

Parcelas	Doses de N (kg/ha/ciclo)	Nomenclatura Utilizada	Descrição
Mombaça	0	M0	Controle
	25	M1	Dose baixa
	50	M2	Dose média
	75	M3	Dose alta
Marandú	0	B0	Controle
	25	B1	Dose baixa
	50	B2	Dose média
	75	B3	Dose alta

A área experimental foi dividida em 32 parcelas, 16 para a cultivar Mombaça e 16 para Marandú. Cada parcela possuía uma área de 20 m² (Figura 2). Para padronizar as leituras espectrais em campo, foi determinado um caminharmento, descrito na Figura 2, coletando-se 10 pontos para cada tratamento e repetição, totalizando 160 pontos para cada uma das forrageiras. No local foi instalado um sistema de irrigação por aspersão, a fim de controlar a umidade do solo e não comprometer o cultivo ao longo do ciclo de estudo. Foram instalados quatro tubos, para utilização da sonda DIVINER 2000TM, para monitorar o conteúdo de água no solo.

Para obter diferenças estruturais e se manter um padrão para as coletas de dados dentro do dossel, foram adotados cortes fixos de 21 dias para o cultivar Mombaça e de 28 dias para o cultivar Marandú. Para a padronização dos cortes seguiu-se a metodologia proposta por Silva (2004) que após a compilação de diferentes dados e pesquisas, determinou alturas de resíduo de 30 e 15 cm para *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Urochloa brizantha* cv. Marandú respectivamente.

Os cortes foram realizados com uma máquina tipo costal. Todo o material orgânico foi retirado do local para não influenciar nas doses de nitrogênio, simulando assim um pastejo. As adubações foram feitas com um fertilizante nitrogenado (ureia) contendo uma concentração de 46% de N. As mesmas foram realizadas manualmente, sempre visando à uniformidade do adubo dentro de cada área. Após cada aplicação, a área foi irrigada para promover uma maior absorção do mesmo pelas plantas.

Figura 2. Croqui da área experimental, sendo M0/B0; sem adubação, M1/B1; 25 kg ha⁻¹ ciclo, M2/B2; 50 kg ha⁻¹ ciclo, M3/B3; 75 kg ha⁻¹ ciclo. Os tratamentos foram aplicados em cada coleta realizada. Também foi desenhado o sistema de irrigação por aspersão, os blocos e o caminhar seguido em campo para a coleta de dados hiperespectrais.

2.2.2. Aquisição dos dados

Foram avaliados neste experimento, dados hiperespectrais de dossel, produtividade, índice de área foliar (IAF), altura e teor foliar de nitrogênio (TFN), ao final de cada ciclo de cultivo.

2.2.2.1. Obtenção de dados hiperespectrais do dossel de plantas

Para coleta dos dados hiperespectrais do dossel de plantas foi utilizado o sensor *HandHeld 2Spectroradiometer*. Este equipamento se caracteriza por ser um sensor hiperespectral passivo, que trabalha em comprimentos de onda que compreendem o espectro visível e infravermelho próximo (325 nm a 1075 nm), com uma precisão de ± 1 nm e uma resolução espectral de 3 nm.

Antes de iniciar as leituras do dossel foi realizada a calibração do espectrorradiômetro, utilizando a placa lambertiana padrão que acompanha o aparelho. Essa calibração foi repetida após a leitura de aproximadamente quatro parcelas ou sempre que se observava uma mudança de intensidade de luz no campo. A

radiometria de campo foi realizada posicionando o sensor a 1,5 m acima da altura média da cultura, o que proporcionava um campo de visada (FOV – *Field of View*) circular de aproximadamente 0,65 m de diâmetro, com área de 0,34 m².

As leituras foram realizadas em dias ensolarados, entre as 10:00 h e 14:00 h. As coletas sempre foram realizadas no caso da Mombaça aos 21 dias e para Marandú aos 28 dias, porém, vale ressaltar que, por se tratar de um sensor passivo, a coleta de dados em algum dos meses estudados desrespeitou o intervalo do ciclo completo por se tratar de uma atividade dependente de condições climáticas favoráveis mas realizou-se nos dias seguintes após a finalização do ciclo estabelecido. Foram realizadas 10 leituras sob cada parcela, totalizando 160 leituras para cada variedade de forrageira tropical.

2.2.2.2. Produtividade

No final do ciclo das culturas, quando a pastagem estava em ponto de colheita, foram recolhidas as amostras para o cálculo da produtividade final de cada parcela. Para obter a produtividade foi construído uma moldura quadrada de 0,7 m² e lançada aleatoriamente dentro de cada parcela. Posteriormente, a massa coletada dentro da moldura foi pesada. Após a pesagem da massa total retirou-se uma subamostra de aproximadamente 200 g/parcela de massa verde, para a separação botânica, subdividida em folha, bainha+colmo e material morto.

Em seguida o material vegetativo foi encaminhado à estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 horas para a determinação da porcentagem de matéria seca (% MS). Após este procedimento foi possível estimar a % MS das frações nesta área e, conseqüentemente, estimar os componentes produtivos (kg ha⁻¹) da produtividade total de forragem.

2.2.2.3. Teor foliar de nitrogênio

Para a obtenção dos dados de teor foliar de nitrogênio foram coletadas oito folhas por cada tratamento e repetição, ao longo das sete coletas realizadas. No campo eram coletadas as folhas indicadoras, que se correspondem as mais novas, totalmente desenvolvidas e com a lígula presente. No laboratório as folhas foram primeiramente lavadas em água corrente. Após a lavagem foram alocadas em saco de papel para secar em estufa com ventilação forçada, a 65°C, até atingir peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas para a determinação dos teores de nitrogênio. As análises químicas são determinadas nos extratos obtidos pela digestão sulfúrica por meio do método semi-micro Kjeldahl (Malavolta *et al.*, 1988).

2.2.2.4. Fluxo de obtenção dos dados para cada forrageira

As aquisições dos dados nos períodos estão descritas nas Figuras 3 e 4. Ao longo do experimento foram realizados cortes e adubações diferenciadas, levando em conta um período baseado em calendário fixo de corte de 21 e 28 dias para a cultivar Mombaça e Marandú, respectivamente.

No caso do cultivar Mombaça (Figura 3), a semeadura ocorreu em fevereiro de 2016, com o primeiro corte após o estabelecimento da cultura aos 160 dias da semeadura. A adubação diferenciada só ocorreu após o

segundo corte. Não foi possível obter leituras espectrais no período de dezembro de 2016, já que por fatores climáticos desfavoráveis tornou-se impraticável, portanto, somente foram realizadas as atividades de corte e adubação. Foram obtidas sete leituras de dados hiperespectrais, sendo coletadas em cada uma delas as folhas para a determinação do teor foliar de nitrogênio. Também foram realizadas duas medições do IAF, na quinta e sétima coleta. O experimento foi finalizado no mês de abril de 2017.

Figura 3. Fluxograma de *Panicum maximum* cultivar Mombaça.

No caso do cultivar Marandú (Figura 4) a semeadura realizou-se em abril de 2016. Após um período de estabelecimento de 160 dias, foi efetuado um primeiro corte da forrageira em setembro de 2016 e a primeira adubação diferenciada de nitrogênio. Para a cultivar Marandú não existem dados espectrais no mês de janeiro de 2017 já que quando fechamos o ciclo aos 28 dias, no meio de janeiro de 2017, aconteceram precipitações até dez dias após o período de coleta ideal, por tanto nesse período só foi feito o corte e adubação diferenciada. Ao longo do experimento foram obtidas sete leituras de dados hiperespectrais, sendo coletadas em cada uma delas as folhas para a determinação do teor foliar de nitrogênio. Também foram realizadas duas medições do IAF, na quinta e sétima coleta. O experimento foi finalizado no meio de maio de 2017.

2.2.3.2. Análise multivariada

Com as curvas medias de cada tratamento realizou-se uma análise discriminante, para determinar o comportamento espectral da *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Uroclhoa brizantha* cv. Marandú em função das diferentes doses de N. A análise discriminante tem por objetivo identificar as variáveis que distinguem determinados grupos, de modo que conhecendo as características, possa se prever a que grupo pertencem (Pestana *et al.*, 2005).

Segundo Cair *et al.* (2009) a função discriminante procura maximizar a variância interespecífica e minimizar a variância intraespecífica, assumindo que as classes possuem distribuição normal. A verificação da significância da função discriminante consiste em uma medida generalizada da distância entre os centroides dos grupos. Os centroides foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e as médias quando significativas, comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. A técnica multivariada foi realizada utilizando o ambiente R (versão 3.2.2).

2.2.3.3. Recomendações de adubação nitrogenada

A prática da adubação depende de vários fatores, os quais devem ser previamente analisados no sentido de aconselhar os agricultores e praticarem uma adubação mais adequada, quanto aos aspectos agronômicos (maior eficiência na utilização de fertilizantes) e econômico (aumento da renda líquida para o produtor). A recomendação de adubação nitrogenada proposta nesse trabalho baseia-se nos resultados obtidos a partir de dados de produtividade. Para a realização da recomendação da adubação nitrogenada para as duas cultivares foi realizado uma regressão linear a partir do software Microsoft Excel.

2.3. Resultados e Discussão

2.3.1. Análises das curvas espectrais de dossel de *Panicum Maximum* cv. Mombaça

Analisando a Figura 5 podemos observar as curvas espectrais do dossel (400 -1100 nm) das sete coletas (A, B, C, D, E, F e G) realizadas ao longo do experimento, sobre as diferentes doses de nitrogênio (0, 25, 50, 75 kg ha⁻¹). As curvas espectrais fazem referência às medias dos dados hiperespectrais do visível (VIS) e do Infravermelho Próximo (IVP) dos diferentes tratamentos de nitrogênio aplicados ao longo do experimento, bem como os respectivos Teores Foliares de Nitrogênio (TFN).

Segundo Moreira (2005) a região do visível é dividida em cinco faixas, sendo a banda espectral referente à cor azul quem varia entre 446 a 500 nm, a verde entre 500 e 578 nm, a amarela entre 578 e 592 nm, laranja entre 592 e 620 nm e a vermelha entre 620 a 700 nm. Essas faixas espectrais foram às utilizadas para separar as regiões do visível apresentadas na Figura 5.

Analisando as curvas espectrais dos diferentes tratamentos (Figura 5), verificou-se que à medida que o numero de coletas aumentam, as diferenças entre os espectros são mais pronunciadas na região do visível (até

700 nm), principalmente na região de 550nm (verde), em comparação às regiões do infravermelho próximo (após 700 nm). Podemos observar que na primeira e segunda coleta de dados (Figuras 5A e 5B) temos uma variação na resposta espectral na região do infravermelho próximo, sendo que as maiores doses aplicadas de N proporcionaram um aumento na refletância ($M3 < M2 < M1 < M0$). Tal fato é coerente e esperado uma vez que o N promove um aumento da biomassa (Cunha *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2016). Garcez Neto *et al.*, (2002) ressaltam no seu trabalho que a cultivar Mombaça foi influenciada positivamente pelo nitrogênio aumentando às suas características morfológicas tais como as taxas de aparecimento e alongamento de folhas, filocrono e duração de vida da folha demonstrando-se o importante papel do nitrogênio como ferramenta para manipular a estrutura da planta. Dentro da região do visível podemos observar que o mesmo padrão de resposta é seguido, ou seja, o comportamento foi $M3 > M2 = M0 > M1$. Também os teores foliares de nitrogênio nas Figuras 5A e 5B, foram semelhantes demonstrando um acréscimo do TFN quanto maior for à dose de N aplicada.

Figura 5. Curvas espectrais de dossel das sete coletas realizadas ao longo do experimento desde outubro de 2016 até abril de 2017 com ênfase na região do visível. Dose testemunha 0 kg ha⁻¹ (M0/Cor vermelha); Dose baixa 25 kg ha⁻¹ (M1/Cor amarela); Dose média 50 kg ha⁻¹ (M2/Cor azul); Dose alta 75 kg ha⁻¹ (M3/Cor verde). Também foram apresentados os valores do teor foliar de nitrogênio (TFN) em g kg⁻¹.

A região do visível é influenciada pela quantidade de pigmentos nas folhas: quanto maior é a energia absorvida pelos pigmentos, menor será o fator de reflectância nesta região do espectro (Ponzoni et al., 2012). Esses pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos, são: clorofila (65%), xantofilas (29%) e carotenos (6%). Em uma cultura o conteúdo de clorofila no dossel é uma variável biofísica que expressa quantitativamente à capacidade fotossintética da vegetação. De tal modo, a clorofila está ligada diretamente a parâmetros biofísicos do dossel, como biomassa, o teor de nitrogênio, coloração verde, índices de área foliar e troca de CO₂ (Gitelson et al., 2005).

Na terceira coleta (Figura 5C) percebe-se que a cultivar Mombaca começou a separar espectralmente as doses que receberam nitrogênio (M1, M2 e M3) da dose testemunha (M0). Nessa coleta podemos observar que na região do vermelho a dose testemunha (M0) foi a que menos absorveu energia e por volta do pico de reflectância em torno de 550 nm, correspondente a região do verde do espectro visível, foi a que mais refletiu, demonstrando que foi menos influenciada pela quantidade de pigmentos. Nessa coleta, podemos observar que a medida que a dose de N aumenta também aumenta o teor foliar de nitrogênio. As clorofilas têm fortes picos de absorção em duas regiões do espectro; azul e vermelho. Como o pico do azul se sobrepõe à absorbância dos carotenoides, geralmente não é usado para estimar o conteúdo de clorofila. Sims et al, (2002) através de diversos estudos de sensoriamento remoto afirmam que a absorvância máxima da clorofila sucede na região vermelha entre 660 e 680 nm.

Nas demais coletas (Figuras 5 D, E, F e G) o tratamento M0 sempre apresenta uma maior refletância na região do visível. Também nota-se que com o tempo o tratamento M0 tem um aumento na refletância no comprimento de onda de 550 nm, enquanto que os demais tratamentos foram se agrupando com menor refletância nesse mesmo comprimento de onda. Fonseca et al. (2002) em sua pesquisa com *Paspalum notatum* (grama batatais), notaram que com o aumento da biomassa devido ao acréscimo das doses de N ao longo de diferentes aplicações, ocorreu uma redução da refletância no espectro visível. O teor foliar de N também foi variando ao longo do tempo e das aplicações realizadas no experimento, mas de forma geral os maiores valores de N foram para as maiores doses aplicadas. No que se refere à região do infravermelho próximo, também podemos observar que os grupos que receberam nitrogênio (M1, M2 e M3) separaram-se da dose testemunha (M0).

De forma geral, analisando visualmente o comportamento das regiões espectrais na Figura 5C, D, E, F e G, constata-se que na região do visível e do infravermelho próximo os espectros exibiram 2 padrões de comportamento ao longo dos cortes e adubações realizadas na pastagem. O primeiro comportamento, observado para as regiões do azul e do vermelho, foi marcado por uma baixa oscilação do fator de reflectância para as doses que receberam nitrogênio (M1, M2, M3) mostrando assim uma maior absorção da energia para realização da fotossíntese, constatando-se também uma leve tendência descendente, isso foi observado ao longo dos ciclos à medida que a cultura se desenvolvia no campo. No referente a dose testemunha (M0) observou-se que a região do azul e do vermelho caracterizou-se por uma variação do fator de reflectância já que a medida que os cortes aumentaram a absorção foi diminuindo. Para a região do verde, os tratamentos M1, M2 e M3 obtiveram menores refletâncias ao longo dos cortes quando comparados com a dose testemunha (M0).

O segundo comportamento observado para os tratamentos M1, M2 e M3 referentes as regiões do red-edge e infravermelho próximo, foi marcado por uma maior refletância quando comparados com a dose testemunha (M0). Esses comportamentos descritos para a Figura 5 também podem ser observados nas análises discriminantes Figura 6, sendo a dose testemunha (M0) quem mais se separou das doses que receberam nitrogênio (M1, M2 e M3).

Assim podemos concluir que com o aumento da dose de N temos um aumento na biomassa e consequentemente um maior teor de clorofila, o que está de acordo com o citado por Gitelson *et al.* (2005). De maneira geral, em todas as coletas apresentadas, as curvas da testemunha (M0) apresentaram menor fator de reflectância na região do infravermelho próximo (700-920 nm) e maior fator de reflectância na região do visível (400 a 700 nm). Com o aumento das dose de N aplicada a cultura, temos um aumento do fator de reflectância na região do infravermelho próximo com uma diminuição da reflectância na região do visível (aumento da absorção).

2.3.2. Análise discriminante das curvas espectrais de dossel para a cultivar Mombaça

Neste trabalho foi aplicada a análise discriminante com o intuito de se diferenciar grupos com variações de nitrogênio na planta, assim foram utilizadas as respostas espectrais. Cada curva espectral é representada por um único ponto com seu valor discriminante. O centróide foi calculado como a média dos valores discriminantes para todas as curvas espectrais em um grupo, tendo-se a média do grupo. Avaliando a análise discriminante para a cultivar Mombaça (Figura 6) podemos observar que de maneira geral, em todas as coletas realizadas sempre as curvas espectrais se agrupam em quatro nuvens de pontos, sendo; Dose testemunha 0 kg ha⁻¹ ciclo (M0/Cor vermelha); Dose baixa 25 kg ha⁻¹ ciclo (M1/Cor amarela); Dose média 50 kg ha⁻¹ ciclo (M2/Cor azul); Dose alta 75 kg ha⁻¹ ciclo (M3/Cor verde).

Na primeira coleta de dados podemos observar que M0 e M1 não obtiveram diferença significativa. Porém os tratamentos M2 e M3 obtiveram diferença entre eles e entre os grupos M0 e M1. A partir da segunda coleta percebemos que a dose testemunha (M0) separa-se das doses que receberam nitrogênio (M1, M2, M3).

Na terceira coleta a dose média (M2) e a dose maior (M3) começaram a se agrupar. Após a quarta coleta

podemos observar que ocorreu um comportamento análogo até a sétima coleta, demonstrando que a dose testemunha (M0) diferenciou-se espectralmente dos tratamentos que receberam nitrogênio. Esse comportamento também foi descrito e citado para a Figura 5, já que na quarta coleta a dose testemunha (M0) obteve diferenças espectrais com os tratamentos M1, M2 e M3 tanto na região do visível quanto a região do infravermelho próximo demonstrando também esse comportamento na discriminante (Figura 6).

Figura 5. Análise discriminante das diferentes coletas realizadas para a cultivar Mombaça sendo: Dose testemunha 0 kg ha⁻¹ ciclo (M0/Cor vermelha); Dose baixa 25 kg ha⁻¹ ciclo (M1/Cor amarela); Dose média 50 kg ha⁻¹ ciclo (M2/Cor azul); Dose alta 75 kg ha⁻¹ ciclo (M3/Cor verde); centróide (médias por cada tratamento).

Para verificar se as doses aplicadas se discriminaram estatisticamente, o centróide foi submetido à análise de variância realizado a partir do Teste F e quando as médias foram significativas foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos para as médias dos centroides (Tabela 2) mostram que na coleta 1, no eixo LD1, os tratamentos M0 e M1 não tem diferença significativa demonstrando um comportamento semelhante ao observado na Figura 6 para a primeira coleta, já que nesse caso os tratamentos M0 e M1 se agrupam. De forma geral, podemos afirmar que as médias dos centróides apresentam um comportamento semelhante às discriminantes apresentadas na Figura 6. Porém, tendo em conta que o centróide representa a média do conjunto de dados de cada grupo, podemos dizer que na maioria dos resultados obtidos na Tabela 2 houve diferença significativa entre os diferentes tratamentos. Esse comportamento já foi observado na Figura 5, já que as diferentes doses de N geraram diferentes comportamentos espectrais. Os resultados mostraram que é possível discriminar diferentes doses de nitrogênio na Mombaça, usando dados hiperespectrais.

Tabela 2. Média dos centróides para a cultivar Mombaça, realizado a partir da análise de variância do Teste F e as medias quando significativas comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Coletas	Media dos centróides	Media dos centróides			
		LD1		LD2	
Coleta 1	M0	-2,629496	a	0,9029027	a
	M1	-3,18808	a	-1,558492	b
	M2	2,036352	b	2,9075769	c
	M3	3,781223	c	-2,251988	d
Coleta 2	M0	-4,851707	d	1,373445	b
	M1	-0,382179	c	-2,332158	c
	M2	2,0112085	b	-2,214358	c
	M3	3,2226773	a	3,173071	a
Coleta 3	M0	-5,801345	d	1,7004504	a
	M1	-0,781339	c	-3,875071	c
	M2	4,0684842	a	0,8812592	b
	M3	2,5141998	b	1,2933609	ab
Coleta 4	M0	-8,577157	d	0,806476	b
	M1	1,929942	c	-5,449435	c
	M2	2,730291	b	0,6335138	b
	M3	3,916923	a	4,0094456	a
Coleta 5	M0	-7,428475	d	0,7664263	b
	M1	0,7500438	c	-3,761418	d
	M2	3,771167	a	-0,222972	c
	M3	2,9072646	b	3,217963	a
Coleta 6	M0	-10,48927	c	2,1811549	b
	M1	-1,070453	b	-5,175134	d
	M2	5,754054	a	0,8343342	c
	M3	5,805667	a	2,1596448	a
Coleta 7	M0	-8,155882	c	0,7185881	b
	M1	1,330149	b	-4,01613	c
	M2	3,467945	a	1,1830546	b
	M3	3,357789	a	2,1144875	a

2.3.3. Análise visual das curvas espectrais de dossel de *Uroclhoa Brizantha* cv. Marandú

Para realizar a análise das curvas espectrais da cultivar Marandú vamos utilizar os dados coletados ao longo do experimento realizado entre Outubro de 2016 até Maio de 2017. Os mesmos fazem referência às medias dos dados hiperespectrais de dossel dos diferentes tratamentos de nitrogênio aplicados (0, 25, 50, 75 kg ha⁻¹). Segundo Foster *et al.* (2016), no capim Alamo (*Panicum virgatum*), os comprimentos de onda mais

importantes para separar tratamentos de nitrogênio foram 520-560, 650-690 nm (região visível) e 710-730 nm (região de borda vermelha). Assim foi destacada a região do visível para entender melhor a influência dos tratamentos de nitrogênio sobre o comportamento do espectro.

A região do visível foi dividida em cinco faixas, sendo a banda espectral referente à cor azul quem varia entre 446 a 500 nm, a verde entre 500 e 578 nm, a amarela entre 578 e 592 nm, laranja entre 592 e 620 nm e a vermelha entre 620 a 700 nm (Moreira, 2005). Essas faixas espectrais foram às utilizadas para separar as regiões do visível apresentadas na Figura 7. Também foram apresentados em cada uma das coletas realizadas os diferentes teores foliares de nitrogênio e g kg^{-1} .

Na primeira e segunda coleta (Figura 7A e 7B) existem poucas diferenças visuais entre as curvas espectrais dos tratamentos que receberam nitrogênio (B1, B2 e B3) e a dose testemunha (B0), tanto na região do espectro visível quanto a região do infravermelho próximo. A partir da terceira coleta (Figura 7C) percebe-se que na região do visível, exatamente no pico do verde em 550 nm, a dose testemunha (B0) foi a que obteve maior refletância e começou a separar-se espectralmente dos tratamentos que receberam nitrogênio (B1, B2 e B3). No que se refere ao TFN para as figuras 7A, B e C tiveram uma coerência com os espectros e as doses proporcionadas para as plantas, ou seja, quanto maior dose de N maior conteúdo de TFN. Segundo Gitelson et al. (2005) quando há um maior teor de clorofila é consequência de um aumento da biomassa. É por isso que no pico do verde (550 nm) existe uma menor refletância, para os tratamentos que receberam nitrogênio (B1, B2 e B3), por consequência do aumento da quantidade de biomassa.

Segundo Moreira (2005) a refletância da vegetação varia com o comprimento de onda e a maior parte da radiação que incide sobre o dossel das plantas é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes encontrados nos cloroplastos das folhas. Os pigmentos que mais influenciam a refletância são as clorofilas “a” e “b”, que têm picos de absorção nas bandas do vermelho e do azul, respectivamente. Segundo Ponzoni *et al.* (2012) os valores percentuais desses pigmentos existentes nas folhas podem variar intensamente de espécie para espécie. Estima-se que entre 50% a 70% do nitrogênio total da folha está associado a enzimas presentes nos cloroplastos, por isso existe a relação direta entre o teor de N e a clorofila, sendo que com um aumento na dose de N, maior teor de clorofila e maior absorção da energia principalmente em 550 nm como pode ser observado neste trabalho (Figura 7).

Avaliando a Figura 7D, no que se refere à região do visível, o primeiro comportamento observado para as regiões do azul e do vermelho, foi marcado por uma oscilação do fator de absortância, sendo a testemunha (B0) e a dose baixa (B1) as que mais absorveram nessas duas faixas. Por outro lado, para a região do verde, observa-se que a maior refletância também foi para a dose testemunha. Porém na região do infravermelho próximo à dose testemunha (B0) situou-se entre as doses que receberam nitrogênio (B1, B2 e B3), demonstrando um comportamento diferente das outras coletas. Nessa coleta, quando foi realizada a adubação, houve problemas com a aplicação do nitrogênio, o que ocasionou uma super dose, e as plantas apresentaram queimaduras nas folhas. Esse fato fez com que as mesmas desenvolvessem menos folhas, podendo explicar o motivo pelo qual a dose testemunha foi a que mais respondeu na região do infravermelho próximo. Porém, no que se refere ao TFN para essa coleta, a dose testemunha foi o que apresentou o menor teor de N comparada com as doses que receberam nitrogênio. Segundo Liu (2015) os mesófilos são os responsáveis pelo espalhamento da radiação de infravermelho próximo, afirmando que quando aumenta o número de espaços vagos, aumenta a refletância de infravermelho próximo.

Figura 6. Curvas espectrais de dossel das sete coletas realizadas ao longo do experimento desde outubro de 2016 até maio de 2017 com ênfase na região do visível. Dose testemunha 0 kg ha⁻¹ ciclo (B0/Cor vermelha); Dose baixa 25 kg ha⁻¹ ciclo (B1/Cor amarela); Dose média 50 kg ha⁻¹ ciclo (B2/Cor azul); Dose alta 75 kg ha⁻¹ ciclo (B3/Cor verde). Também foram apresentados os valores do teor foliar de nitrogênio (TFN) em g kg⁻¹.

Podemos observar que nas demais coletas nos comprimentos de onda do visível o tratamento B0 apresenta uma maior refletância na região do verde (Figura 7E, F, G). Também nota-se que nessa região obteve-se uma maior absorção na região do azul e vermelho pelos tratamentos que receberam nitrogênio (B1, B2 e B3). Segundo Xue e Yang (2009) a região do visível é sensível a mudanças na concentração de pigmentos na folha, sendo a clorofila, a mais abundante em plantas verdes. A absorção na região do vermelho aumenta com o incremento da concentração de clorofila na folha, que por sua vez é diretamente sensível a captação de nitrogênio. Assim podemos concluir que com o aumento da dose de N TEMOS um maior teor de clorofila e por tanto o comportamento na região do visível é diferente para os tratamentos com doses de nitrogênio (B1, B2 e B3).

O teor foliar de nitrogênio foi diminuindo até atingir um valor mínimo de 17, 40 g kg⁻¹ na última coleta (Figura 7G). As diferenças entre os teores de nitrogênio foliar ao longo da Figura 7 foram variando em função das doses de N aplicadas, ou seja, quanto maior foi a dose de N maior foi o teor de N na folha. Primavesi *et al.* (2004) estudando a influência de diferentes nutrientes sobre o capim CoastCross observou aumento do TFN em função das doses de N aplicadas ao longo do experimento.

Nas Figuras 7E, F e G na região do infravermelho próximo os grupos separaram-se da dose testemunha (B0), demonstrando uma maior quantidade de biomassa. Martins *et al.* (2006) estudando a resposta de diferentes nutrientes na produção de forragem da cultivar marandú e da cultivar mombaça, observaram que o nitrogênio influenciou positivamente nas duas cultivares gerando maior biomassa e por tanto produzindo maior quantidade de matéria seca. Segundo explica Hoofer (1978) na região do infravermelho próximo (entre 700 nm e 1300 nm) as folhas saudáveis apresentam altos valores de reflectância (45-50%), alta transmitância (45-50%) e baixa absorvância (menos de 5%). Isso explicaria porque nos dois cultivares estudados (Mombaça e Marandú) a reflectância na região do infravermelho próximo foi maior para os tratamentos que receberam nitrogênio.

De maneira geral, em todas as coletas apresentadas, as curvas da dose testemunha (B0) apresentaram maior fator de reflectância na região do visível (400 a 700 nm) e menor fator de reflectância na região do infravermelho próximo (700-920 nm), excluindo a quarta coleta (Figura 7D) com excesso de adubação. Conforme o esperado, nota-se que, à medida que aumentou-se a dose de N aplicada, houve uma tendência de aumento do fator de reflectância na região do infravermelho próximo e uma redução na região do visível (aumento da absorção).

2.3.4. Análise discriminante das curvas espectrais de dossel para a cultivar Marandú

Serão apresentadas às análises discriminantes das curvas de dossel da cultivar Marandú (Figura 8). Cada curva espectral é representada por um único ponto com seu valor discriminante. O centróide foi calculado com a média dos valores discriminantes para todas as curvas espectrais em um grupo, tendo-se a média do grupo. Avaliando a análise discriminante para a cultivar Marandú (Figura 8) podemos observar que de maneira geral, que todas as coletas realizadas sempre as curvas espectrais se agrupam em quatro nuvens de pontos, sendo; Dose testemunha 0 kg ha⁻¹ ciclo (B0/Cor vermelha); Dose baixa 25 kg ha⁻¹ ciclo (B1/Cor amarela); Dose média 50 kg ha⁻¹ ciclo (B2/Cor azul); Dose alta 75 kg ha⁻¹ ciclo (B3/Cor verde).

Figura 7. Análise discriminante das diferentes coletadas realizadas para a cultivar Marandú sendo: Dose testemunha 0 kg ha^{-1} ciclo (B0/Cor vermelha); Dose baixa 25 kg ha^{-1} ciclo (B1/Cor amarela); Dose média 50 kg ha^{-1} ciclo (B2/Cor azul); Dose alta 75 kg ha^{-1} ciclo (B3/Cor verde); centroide (médias por cada tratamento).

No caso da cultivar Marandú, a dose testemunha (B0) começou a se separar mais, dos tratamentos B1, B2 e B3 a partir da quarta coleta. O comportamento da dose baixa (B1), média (B2) e alta (B3) foi semelhante ao longo das coletas, se agrupando e aproximando mais entre elas à medida que aumentavam os cortes e as adubações.

Na análise discriminante da Figura 8 observa-se que a partir da segunda coleta a testemunha (B0) separou-se das doses que receberam nitrogênio (B1, B2 e B3). De forma geral, podemos observar um comportamento semelhante entre as Figuras 7 e 8, já que a partir da quarta coleta, as doses que receberam nitrogênio (B1, B2 e B3) separam-se totalmente. Esse comportamento também foi observado para a cultivar Mombaça e podemos afirmar que com o tempo os diferentes cortes e adubações das duas forrageiras tropicais reagiram positivamente e foram se diferenciando tanto na curva espectral (Figura 7) quanto a análise discriminante realizada (Figura 8).

Para entender melhor se ocorrem ou não diferenças na análise discriminante, entre as diferentes doses de nitrogênio aplicadas, faz-se necessária uma análise estatística mais detalhada. Deste modo, o centróide foi submetido à análise de variância realizado a partir do Teste F e quando as médias foram significativas foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo os resultados obtidos na Tabela 3 podemos observar que ao longo das diferentes coletas realizadas os centroides demonstraram diferença significativa entre as diferentes doses (B0, B1, B2 e B3). De forma geral, podemos afirmar que as médias dos centróides adotaram um comportamento semelhante às discriminantes apresentadas na Figura 8. Os resultados mostraram que é possível discriminar diferentes doses de nitrogênio na Marandú, usando dados hiperespectrais.

Tabela 3. Média dos centróides para a cultivar Marandú, realizado a partir da análise de variância do Teste F e as medias quando significativas comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Coletas	Media dos centróides	Media dos centróides			
		LD1		LD2	
Coleta 1	B0	-1,882985	a	1,203398	a
	B1	3,9114465	b	-0,915033	b
	B2	-0,043953	c	2,717169	c
	B3	-1,984509	d	-3,005534	c
Coleta 2	B0	-4,364606	d	1,8578145	a
	B1	-0,774918	c	-3,973194	c
	B2	1,367441	b	1,226652	b
	B3	3,7720825	a	0,8887278	b
Coleta 3	B0	-3,344781	d	2,579156	a
	B1	-1,451583	c	-2,244537	b
	B2	1,001592	b	-2,376639	b
	B3	3,794772	a	2,04202	a
Coleta 4	B0	-4,612356	d	2,2653622	a
	B1	-0,774609	c	-4,023722	c
	B2	1,717515	b	-0,450647	b
	B3	3,66945	a	2,2090067	a
Coleta 5	B0	-9,499415	d	0,6506056	b
	B1	1,516894	c	-3,998539	c
	B2	4,359079	a	0,1559057	c
	B3	3,623442	b	3,1920272	a
Coleta 6	B0	-8,312341	b	0,0963785	b
	B1	2,494313	a	-2,52795	c
	B2	2,898062	a	-0,297869	b
	B3	2,919966	a	2,7294404	a
Coleta 7	B0	-7,208176	b	-0,481763	c
	B1	3,01969	a	-3,56942	d
	B2	2,576008	b	0,8027454	b
	B3	1,612478	c	3,2484375	a

2.3.5. Recomendações adubação nitrogenada

Na Figura 9 e Figura 10 foram apresentados os resultados obtidos a partir do somatório das produtividades (ao longo das sete coletas) para a cultivar Mombaça e Marandú, respectivamente. As mesmas relacionam o somatório das produtividades obtidas ao longo de cada coleta em função das quatro doses de N aplicadas e as quatro repetições realizadas.

No que se refere a Figura 9 podemos observar que o modelo gerado foi do tipo linear, com um coeficiente de determinação de 0,92. De forma geral as maiores doses de N corresponderam com as maiores produtividades na cultivar Mombaça.

Figura 9. Produtividades (kg/ha) em função das doses de N (kg/ha) para a cultivar Mombaça.

Na Figura 10 foi apresentada a relação entre as produtividades obtidas para a cultivar Marandú e as diferentes doses de N (kg/ha). O modelo gerado foi do tipo linear e o coeficiente de determinação foi de 0,67. Segundo a Figura 10 podemos observar que para a dose 25 kg/ha existe um valor anômalo que corresponde a dose de 25 kg/ha.

Figura 10. Produtividades (kg/ha) em função das doses de N (kg/ha) para a cultivar Marandú.

De forma geral, podemos afirmar que enquanto aumentam às doses de N as produtividades aumentam de forma linear. Para a cv. Mombaça os valores de produtividade oscilaram entre valores de 5000 até 23.000 kg ha⁻¹, sendo que as maiores produtividades aconteceram para a maior dose aplicada (600 kg ha⁻¹) obtendo-se um valor médio para o tratamento M3 de 22.605 kg ha⁻¹.

No que se refere a cv. Marandú os valores oscilaram entre 5000 e 18.000 kg ha⁻¹. Ao igual que a cultivar Mombaça, as maiores produtividades também foram encontradas para a maior dose aplicada (525 kg ha⁻¹) porém é necessário um estudo mais aprofundado para identificar qual dose seria a mais adequada para cada uma das cultivares estudadas.

Existem diferentes trabalhos que têm demonstrado a influência do nitrogênio sobre o capim Mombaça (Garcez *et al.*, 2002; Martins *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2011; Rosado *et al.*, 2016), afirmando que a cultura responde positivamente as doses de N aplicadas aumentando assim a matéria seca produzida pelo capim e consequentemente a produtividade. Lemaire *et al.* (2011) afirmaram que o N é o principal nutriente para a manutenção da produtividade e persistência de uma pastagem, sendo o principal constituinte das proteínas que participam ativamente na síntese dos compostos orgânicos que formam a estrutura do vegetal, sendo responsável por características estruturais da planta (tamanho de folha, densidade de perfilho e folhas por perfilho), além de características morfogênicas (taxas de aparecimento, alongamento e senescência foliar).

A cultivar Mombaça apresenta um dos maiores potenciais de produção de matéria seca (PMS) em ambientes tropicais e subtropicais, podendo atingir uma produção anual de matéria seca em torno de 33 t ha⁻¹ (Galindo *et al.*, 2018). Nesse estudo de caso, para a dose maior (600 kg ha⁻¹) obteve-se uma produtividade de 22.6 tn ha⁻¹ para um ciclo que correspondeu ao período de primavera e verão (6 meses).

Assim, diferentes trabalhos também têm demonstrado a influência do nitrogênio sobre o capim Marandú (Corrêa *et al.*, 2003; Silva, 2004; Martins *et al.*, 2006; Costa *et al.*, 2010) afirmando que a adubação nitrogenada influencia as características estruturais e o acúmulo de massa seca do capim-marandú. Segundo Fagundes (2006) estudando as características morfogênicas do capim *Urochloa decumbens* adubada com nitrogênio nas quatro estações do ano, obtiveram resultados que demonstraram que a taxa de alongamento de folha, o comprimento final da folha, o índice de área foliar e as porcentagens de colmo e de lâmina foliar aumentaram linearmente com as aplicações de nitrogênio e principalmente na estação de verão. Esse comportamento foi o observado nesse estudo, à medida que aumentaram ocorreu um aumento das produtividades.

Mehl *et al.* (2013) estudando o capim Marandú sobre diferentes doses de N (0, 250, 500, 750, 1000 kg/ha/ano) obtiveram resultados que demonstraram que a melhor produtividade obtida foi com a aplicação de 74,2 kg/ha/corte de N, ou seja, 773,1 kg/ha/ano de N. Nesse estudo a dose máxima aplicada também foi de 75 kg/ha/corte de N, porém os cortes e as aplicações do fertilizante foram menores devido a que o experimento só ocorreu no período de primavera/verão.

De forma geral, podemos concluir que as maiores doses de N aplicadas foram as que geraram maiores rendimentos e produtividades nas duas cultivares estudadas.

2.4. Conclusões

As doses de nitrogênio influenciaram positivamente no comportamento espectral das duas forrageiras estudadas, demonstrando que foram responsivas à adubação, modificando a sua resposta espectral ao longo das aplicações realizadas. Os comprimentos de onda que mais demonstraram as diferenças entre as características espectrais se correspondem para a região do visível (pico de 550 nm) e região do infravermelho próximo (750 nm).

As análises discriminantes demonstraram um agrupamento nos tratamentos que receberam nitrogênio e corroboraram o observado ao longo das diferentes curvas espectrais.

As produtividades variaram em função das doses de N. No caso da cultivar Mombaça, a dose recomendada seria de 600 kg ha⁻¹ já que foi a que proporcionou uma maior produtividade (23.3 tn ha⁻¹). Para a cultivar Marandú a dose recomendada segundo esse estudo, oscilaria entre 350 kg ha⁻¹ e 525 kg ha⁻¹ já que as suas produtividades obtiveram desempenhos semelhantes, sendo 15,6 tn ha⁻¹ para a dose 350 kg ha⁻¹ e de 16, 8 tn ha⁻¹ para a dose de 525 kg ha⁻¹.

A partir desse estudo e com a utilização de avaliações qualitativas em campo poderemos analisar o aspecto visual das curvas espectrais discriminando maior ou menor conteúdo de N em forrageiras.

Agradecimentos:

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa da estudante de doutorado e por fomentar o projeto. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por fomentar o projeto de pesquisa nº 2013/22435-9, na aquisição dos sensores utilizados nesse projeto.

REFERÊNCIAS

- Abrahão, S. A., Assis, F. De, Pinto, D. C., & Queiroz, D. M. De. (2009). Revista Brasileira de Zootecnia Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia Vegetation spectral indices to discriminate nitrogen rates in tanzania grass, 3598.
- Allen, W. A., & Richardson, A. J. (1968). Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 1023–1028.
- Andrade, A. C., Miranda, D., Fonseca, D. a, Queiroz, D. S., Salgado, L. T., & Cecon, P. R. (2003). Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier). *Ciência Agrotecnica, edição esp*(November), 1643–1651.
- Arne, S., Appelgren, M. and, & Krekling, T. (1995). Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 41, 177–185.
- Asrar, G., Kanemasu, E. T., Jackson, R. D., & Pinter, P. J. (1985). Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 211–220. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90095-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90095-1)

- Barbosa, R. A., Júnior, N., Vilela, H. H., Silva, C., Pacheco, V., Euclides, B., ... Sousa, D. L. (2011). Morphogenic and structural characteristics of guinea grass pastures submitted to three frequencies and two defoliation severities Características morfológicas e estruturais de pastos de capim-tanzânia submetidos a três freq. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 947–954.
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2–3), 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Boddey, R. M., MacEdo, R., Tarré, R. M., Ferreira, E., De Oliveira, O. C., De, C., ... Urquiaga, S. (2004). Nitrogen cycling in Brachiaria pastures: The key to understanding the process of pasture decline. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(2), 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.010>
- Bruno, A., Oliveira, B., Andrade, A. C., Magalhães, J. A., Rodrigues, H. N., Mehl, H. U., ... Santos, D. S. (2015). Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia ISSN: 1982-1263 Produtividade do capim-digitária (Digitaria spp .) sob diferentes doses de nitrogênio 1 Productivity of Digitaria grass in different doses of nitrogen, (1993), 70–75.
- Camino, C., González-dugo, V., Hernández, P., Sillero, J. C., & Zarco, P. J. (2018). Int J Appl Earth Obs Geoinformation Improved nitrogen retrievals with airborne-derived fluorescence and plant traits quantified from VNIR-SWIR hyperspectral imagery in the context of precision agriculture. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 70(February), 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.04.013>
- Canto, M. W. Do, Cecato, U., Almeida Júnior, J., Jobim, C. C., Agulhon, R. A., Gai, V. F., ... Queiroz, M. F. S. (2002). Produção Animal no Inverno em Capim-Tanzânia Diferido no Outono e Manejado em Diferentes Alturas de Pasto. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 31(4), 1624–1633. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982002000700004>
- Carnevali, R. A. (2003). Estado de São Paulo - Brasil Orientador: Prof. Dr. SILA CARNEIRO DA SILVA Estado de São Paulo - Brasil.
- Chapman, D. F., & Lemaire, G. (1993). *Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation*. (BAKER, M.J). Wellington: Grassland for our world.
- Clevers, J. G. P. W., & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>
- Colombo, R., Bellingeri, D., Fasolini, D., & Marino, C. M. (2003). Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 86(1), 120–131. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00094-4)
- Corrêa, L. D. A., & Santos, P. M. (2003). Manejo e utilização de plantas forrageiras dos gêneros Panicum, Brachiaria e Cynodon. *Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos 34*, 36p.
- Corsi, M., & Nussio, L. G. (1992). Manejo do capim-elefante: correção e adubação do solo. In: *SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS*, 87–115.
- Costa, K. A. P., Faquin, V., & Oliveira, I. P. (2010). Doses e fontes de nitrogênio na recuperação de pastagens do capim-marandu. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 62(1), 192–199. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352010000100026>
- Costa, N. de L., Magalhães, J. A., Townsend, C. R., & Paulino, V. T. (2004). Fisiologia e manejo de plantas forrageiras. *Documentos 85, Embrapa Rondônia*, 27p. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0532>

- Costa, N. de L., Townsend, C. R., Fogaça, F. H. dos S., Magalhães, J. A., Bendahan, A. B., & Santos, F. J. de S. (2016). Produtividade de forragem e morfogênese de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob níveis de nitrogênio. *Pubvet*, 10(10), 731–735. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v10n10.731-735>
- Cunha, C. A. H. da. (2005). *Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em capim Tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e doses de nitrogênio*. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.11.2004.TDE-30112004-154918>
- Cunha, O. F. R., & Santos, Antônio Clementino dos; Araújo, Leandro Coelho de; Ferreira, E. M. (2010). PRODUTIVIDADE DO *Panicum maximum* (MOMBAÇA) EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE NITROGÊNIO. *Revista Da FZVA*, 17(1), 136–145.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., & Gholz, H. L. (1990). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology*, 7(1-2-3-4), 33–48. <https://doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.33>
- Dall’Olmo, G., Gitelson, A. A., & Rundquist, D. C. (2003). Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, 30(18), 8–11. <https://doi.org/10.1029/2003GL018065>
- Danelichen, V. H. D. M., Velasque, M. C. S., Musis, C. R. De, Machado, N. G., Nogueira, J. D. S., & Biudes, M. S. (2014). Estimativas De Índice De Área Foliar De Uma Pastagem Por Sensoriamento Remoto No Pantanal Mato-Grossense. *Ciência e Natura*, 36(3), 373–384. <https://doi.org/10.5902/2179460X13168>
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsi, F., & Cho, M. (2008). LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(4), 409–426. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2008.01.001>
- Dash, J., & Curran, P. J. (2007). Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). *Advances in Space Research*, 39(1), 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.034>
- De Alencar, C. A. B., Cóser, A. C., Martins, C. E., De Oliveira, R. A., Da Cunha, F. F., & Figueiredo, J. L. A. (2010). Altura de capins e cobertura do solo sob adubação nitrogenada, irrigação e pastejo nas estações do ano. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 32(1), 21–27. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.319>
- Delegido, J., Alonso, L., González, G., & Moreno, J. (2010). Estimating chlorophyll content of crops from hyperspectral data using a normalized area over reflectance curve (NAOC). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.003>
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., & Moreno, J. (2011). Evaluation of sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11(7), 7063–7081. <https://doi.org/10.3390/s110707063>
- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J. P., Alonso, L., & Moreno, J. (2013). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 46, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.12.001>
- Dias Filho, M. B. (2014). Diagnóstico das Pastagens no Brasil. *Embrapa Amazônia Oriental, Documentos*, 22. https://doi.org/10.1163/_q3_SIM_00374
- Diker, K., & Bausch, W. C. (2003). Potential use of nitrogen reflectance index to estimate plant parameters and yield of maize. *Biosystems Engineering*, 85(4), 437–447. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00097-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00097-7)

- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Euclides, V. P. B., Valle, C. B., Macedo, M. C. M., Almeida, R. G., Montagner, D. B., & Barbosa, R. A. (2010). Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39, 151–168. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300018>
- Fagundes, J. L., Fonseca, D. M. Da, Mistura, C., Morais, R. V. De, Vitor, C. M. T., Gomide, J. A., ... Costa, L. T. Da. (2006). Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 35(1), 21–29. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000100003>
- Fagundes, J. L., Moreira, A. L., Freitas, A. W. de P., Henrichs, R., & Rocha, F. C. (2012). Forage production of Tifton 85 fertilized with nitrogen and subjected to continuous stocking. *Rev. Bras. Saúde Prod. Anim*, 13(2), 306–317.
- Fernandes, J. C. ., Buzetti, S. ., Dupas, E. ., Teixeira Filho, M. C. M. ., & Andreotti, M. . (2015). Sources and rates of nitrogen fertilizer used in Mombasa guineagrass in the Brazilian Cerrado region. *African Journal of Agricultural Research*, 10(10). <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.x>
- Fonseca, E. L., Rosa, L. M. G., & Fontana, D. C. (2002). Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(0100–204X), 365–371. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002000300018>.
- Foster, A. J., Kakani, V. G., Ge, J., Gregory, M., & Mosali, J. (2016). Discriminant analysis of nitrogen treatments in switchgrass and high biomass sorghum using leaf and canopy-scale reflectance spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 37(10), 2252–2279. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1171926>
- Foster, A. J., Kakani, V. G., & Mosali, J. (2017). Estimation of bioenergy crop yield and N status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. *Precision Agriculture*, 18(2), 192–209. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9455-8>
- Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G., & Milton, E. J. (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>
- Galindo, F. S., Buzetti, S., Filho, M. C. M. T., Dupas, E., & Ludkiewicz, M. G. Z. (2017). Application of different nitrogen doses to increase nitrogen efficiency in Mombasa guineagrass (*Panicum maximum* cv. mombasa) at dry and rainy seasons. *Australian Journal of Crop Science*, 11(12), 1657–1664. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.12.pne907>
- Galindo, F. S., Buzetti, S., Filho, M. C. M. T., Dupas, E., & Ludkiewicz, M. G. Z. (2018). Revista de agricultura neotropical. *Journal of Neotropical Agriculture*, 5(3), 1–9. Retrieved from <http://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/2132/2327>
- Garcez Neto, A. F., Nascimento Junior, D. do, Regazzi, A. J., Fonseca, D. M. da, Mosquim, P. R., & Gobbi, K. F. (2002). Respostas morfogênicas e estruturais de *Panicum maximum* cv. Mombaça sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e alturas de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 31(5), 1890–1900. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982002000800004&lng=pt&tlng=pt

- Gil, P. T. De, Fontes, P. C. R., Cecon, P. R., & Ferreira, F. A. (2002). Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. *Horticultura Brasileira*, 20(1999), 611–615. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000300009>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Gower, J. F. R. (1980). Observations of in situ fluorescence of chlorophyll-a in Saanich Inlet. *Boundary-Layer Meteorol.*, 18, 235–245.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009). *Análise multivariada de dados*.
- Huete, A. ., Justice, C. ., & Leeuwen, V. W. . (1999). MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document. *Remote Sensing of Environment*, 3, 1–120. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.019>
- IBGE. (2017). a G R O P E C U Á R I O. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.*, 7(01036157), 1–180. <https://doi.org/01036157>
- IBM. (1997). SPSS Statistics Base.
- Jensen, J. R., Epiphany, J. C. N., Formaggio, A. R., Santos, A. R. dos, Rudorff, B. F. T., Almeida, C. M. de, & Galvão, L. S. (2009). *Sensoriamento remoto do ambiente uma perspectiva em recursos terrestres* (2nd ed.). Parêntese Editora.
- Kluge, R. A. L. (2004). Fisiologia vegetal: apontamentos de aulas teóricas de fotossíntese.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Eschweizerbartxxx Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Lemaire, G. ., Hogdson, J. ., & Chabbi, A. (2011). *Grassland productivity and ecosystem services*. Cabi, Wallingford. <https://doi.org/10.1079/9781845938093.0000>
- LIU, W. T. H. (2015). *Aplicações de sensoriamento remoto* (2nd ed.). Campo Grande: Oficina de Textos.
- Loozen, Y., Karssenber, D., de Jong, S. M., Wang, S., van Dijk, J., Wassen, M. J., & Rebel, K. T. (2019). Exploring the use of vegetation indices to sense canopy nitrogen to phosphorous ratio in grasses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75(August 2018), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.012>
- Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Main-korn, M., & Bieniarz, J. (2016). Sentinel-2 Sen2Cor : L2A processor for users, 2016(1).
- Lourenço, R. W., & Landim, P. M. B. (2004). Estudo Da Variabilidade Do " Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada / Ndvi " Utilizando Krigagem Indicativa Study on the Variability of " Normalized Difference Vegetation Index / Ndvi " By Indicative Kriging. *Holos Environment*, 4, 38–55.
- Lyra, W. da S., Silva, E. C. da, Araújo, M. C. U. de, Fragoso, W. D., & Veras, G. (2010). Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais. *Química Nova*, 33(7),

- 1594–1597. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422010000700030&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt
- Malavolta, E., Vitti, G. C., & de Oliveira, S. A. (1988). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações* (Third edit). Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=Lu9EAAAAYAAJ>
- Martha, G. B., Alves, E., & Contini, E. (2012). Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agricultural Systems*, 110, 173–177. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.001>
- Martins, R. L., Junior, P. R., Fernandes, A. C., Grise, M. M., & Muraro, G. B. (2006). brizantha cv MARANDU E Panicum maximum cv MOMBAÇA , EM RESPOSTA A DIFERENTES DOSES DE NUTRIENTES , EM UMUARAMA-PR Marandu and Panicum maximum cv Mombaça , in Reply the Doses of Nutrients , in Umuarama-PR, 59–64.
- McManus, C., Barcellos, J. O. J., Formenton, B. K., Hermuche, P. M., De Carvalho, O. A., Guimarães, R., ... Neto, J. B. (2016). Dynamics of cattle production in Brazil. *PLoS ONE*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147138>
- Mehl, H. U., Henrique, B., Rodrigues, N., Mourão, E., & Costa, D. L. (2013). No Title.
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106(1), 135–141.
- Molin, J. P., Amaral, L. R. , & Colaço, A. (2015). *Agricultura de precisão*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Monteiro, F. A. (2013). Uso de corretivos e fertilizantes. *Forragicultura: Ciência, Tecnologia e Gestão de Recursos Forrageiros. Jaboticabal: Maria de Lourdes Brandel–ME.*, 275–290.
- Morais, L. F. de;, Carvalho, C. A. B. de;, Anjos, A. N. A. , Viegas, C. R., & Silva, P. H. F. da. (2018). Resumo Avanços na avaliação de pastagens cultivadas com forrageiras tropicais no Brasil : Uma Revisão Abstract Advances in the evaluation of pastures cultivated with tropical forages in Brazil : A Review Resúmen Avances en la evaluación de pastos cultivad, (June), 125–136. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V11.N2.13>
- Moreira, M. A. (2005). *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. UFV.
- Motomiya, A. V. de A., Molin, J. P., Motomiya, W. R., & Biscaro, G. A. (2012). Diagnose nutricional com o uso de sensor óptico ativo em algodoeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(11), 1159–1165. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100003>
- Mutanga, O., Skidmore, A. K., & Van Wieren, S. (2003). Discriminating tropical grass (Cenchrus ciliaris) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(4), 263–272. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00158-2)
- Nascimento Junior, D. D., Silva, S. C. da;, & Adese, B. (2004). Panicum maximum,. *System*, 19–22.
- Novo, E. M. L. . (2010). *Sensoriamento Remoto: Princípios e aplicações*. (E. Blücher, Ed.) (4ed ed.). São Paulo.
- Oliveira, A., Andrade, A., Magalhães, J., Rodrigues, B., Mehl, H., Santos, F., ... Costa, N. (2015). Produtividade do capim-digtária (Digitaria spp.) sob diferentes doses de nitrogênio. *PubVet*, 9(2), 70–75. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v9n2.70-75>
- Pacheco-Labrador, J., González-Cascón, R., Pilar Martín, M., & Riaño, D. (2014). Understanding the optical responses of leaf nitrogen in mediterranean holm oak (Quercus ilex) using field spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26(1), 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.013>

- Parsons, A. J., & Chapman, D. F. (2000). The principles of pasture growth and utilization. In A. Hopkins & W. Holmes (Eds.), *Grass: its production and utilization* (3rd ed, pp. 31–89). Oxford: Blackwell Science for the British Grassland Society.
- Pellissier, P. A., Ollinger, S. V., Lepine, L. C., Palace, M. W., & McDowell, W. H. (2015). Remote sensing of foliar nitrogen in cultivated grasslands of human dominated landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 167, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.009>
- Pereira, V. V., da Fonseca, D. M., Martuscello, J. A., dos Braz, T. G. S., Santos, M. V., & Cecon, P. R. (2011). Características morfogênicas e estruturais de capim-mombaça em três densidades de cultivo adubado com nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40(12), 2681–2689. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011001200010>
- Pestana, M. H., & Gageiro, J. N. (2005). *Análise de dados para ciências sociais: a complementaridade do SPSS*. (4th ed.). Lisboa, Silabo.
- Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. de C., Bosi, C., Crippa, P. H., Santos, P. M., & Nardachione, E. C. (2019). Assessment of Piatã palisadegrass forage mass in integrated livestock production systems using a proximal canopy reflectance sensor. *European Journal of Agronomy*, 103(June 2018), 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.005>
- Ponzoni, F. J., Shimabukuro, Y. E., & Kuplich, T. M. (2012). *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. Oficina de Textos. Retrieved from <http://www.lojaofitexto.com.br/sensoriamento-remoto-da-vegetacao-2-ed-/p>
- Primavesi, A. C., Primavesi, O., Corrêa, L. D. A., Cantarella, H., Gabriel, A., Freitas, A. R. De, & Vivaldi, L. J. (2004). Adubação Nitrogenada em Capim- Coasteross : Efeitos na Extração de Nutrientes e Recuperação Aparente do Nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 33(1), 68–78.
- Queiroz, D.M.; Dias, G.P.; Mantovani, E. C. . (2000). *Agricultura de Precisão na Produção de Grãos*. . Viçosa, MG: Agricultura de precisão. : Universidade Federal de Viçosa.
- Region, A. J., Grande, R., & Sul, D. (2015). Determinação de Teores de Nitrogênio Foliar em Azevém (*Lolium multiflorum* Lam .) Nativo na Região do Alto Jacuí , Rio Grande Do Sul.
- Ren, H., & Zhou, G. (2019). Estimating green biomass ratio with remote sensing in arid grasslands. *Ecological Indicators*, 98(79), 568–574. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.043>
- Richardson, A. J., & Everitt, J. H. (1992). Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity. *Geocarto International*, 7(1), 63–69. <https://doi.org/10.1080/10106049209354353>
- Rivera, J. P., Verrelst, J., Delegido, J., Veroustraete, F., & Moreno, J. (2014). On the semi-automatic retrieval of biophysical parameters based on spectral index optimization. *Remote Sensing*, 6(6), 4927–4951. <https://doi.org/10.3390/rs6064927>
- Rosa, R. (2009). *Introdução ao sensoriamento remoto*. (EDUFU, Ed.) (7 ed.). Uberlândia.
- Rosado, T. L., Gontijo, I., Almeida, M. S. de, Neto, A. C., & Simon, C. da P. (2016). PRODUCTION AND TILLERING OF MOMBAÇA GRASS WITH DIFFERENT SOURCES AND LEVELS OF APPLIED NITROGEN. *ENGENHARIA NA AGRICULTURA*, 24(2), 139–147.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *NASA SP-351 I* (pp. 309–317). Washington, DC. Washington.: Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.

- Salimon, C., & Anderson, L. (2017). How strong is the relationship between rainfall variability and Caatinga productivity? a case study under a changing climate. *Annals of the Brazilian Academy of Science, In Press*, 90, In Press. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170143>
- Santos, A. G. T. ., & Viera, A. . (2011). Alturas de pastejo recomendadas para as principais forrageiras considerando 95% de interceptação luminosa, 2(Cadernos de Pós-Graduação da FAZU).
- Santos, H. G. ., Jacomine, P. K. T. ., Anjos, L. H. C. ., Oliveira, V. Á. D. ., Lumbreras, J. F. ., Coelho, M. R. ., ... Oliveira, J. B. de. . (2013). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (3rd ed.). Brasília: Embrapa.
- Schlemmmer, M., Gitelson, A., Schepers, J., Ferguson, R., Peng, Y., Shanahana, J., & Rundquist, D. (2013). Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25(1), 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003>
- Sibanda, M., Mutanga, O., Dube, T., Vundla, T. S., & Mafongoya, P. L. (2019). Estimating LAI and mapping canopy storage capacity for hydrological applications in wattle infested ecosystems using Sentinel-2 MSI derived red edge bands. *GIScience & Remote Sensing*, 56(1), 68–86. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1492213>
- Sila Carneiro da Silva; Adriana Amaral de Oliveira Bueno; Greg, M. C. U. F. O. B. J. H. C. M., & Morais, C. A. J. P. G. de. (2009). SWARD STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND HERBAGE ACCUMULATION OF *Panicum maximum* cv. MOMBACA SUBJECTED TO ROTATIONAL STOCKING MANAGERMENTS. *Scientia Agriculture*, 66(1), 8–19. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000100002>
- Silva, S. C. da; (2004). Fundamentos para o manejo do pastejo de plantas forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum*. In *Simpósio Manejo Estratégico Da Pastagem* (pp. 347–386). Viçosa: Anais: UFV, DZO. Retrieved from <http://forragicultura.com.br/arquivos/FundamentospamanejoBrachiariaePanicum.pdf>
- Simões, C. R., Rossiello, R. O. P., Graciosa, M. G., Machado, M. L., & Silva, C. F. da. (2015). Imagens multiespectrais para avaliação de índice de área foliar e massa seca do capim “Tifton 85”, sob adubação nitrogenada. *Ciência Rural*, 45(4), 697–703.
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Snee, R. (1977). Validation and regression models: methods and examples. *Technometrics*, 19, 415–428.
- Stroppiana, D., Boschetti, M., Brivio, P. A., & Bocchi, S. (2009). Plant nitrogen concentration in paddy rice from field canopy hyperspectral radiometry. *Field Crops Research*, 111(1–2), 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.11.004>
- Sudduth, K. A.; Drummond, S. T.; Kitchen, N. R. (2015). Operational characteristics of commercial crop canopy sensors for nitrogen application in maize. In *Precision agriculture* (v. 15, pp. 51–58).
- Thenkabail, P. S. ., Smith, R. B. ., & De-Pauw, E. . (2000). Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71, 158–182.
- Tian, Y. C., Yao, X., Yang, J., Cao, W. X., Hannaway, D. B., & Zhu, Y. (2011). Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. *Field Crops Research*, 120(2), 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.002>

- Tong, X., Duan, L., Liu, T., & Singh, V. P. (2018). Combined use of in situ hyperspectral vegetation indices for estimating pasture biomass at peak productive period for harvest decision. *Precision Agriculture*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9592-3>
- Velho, P. (2016). ANAIS DO II SIMPÓSIO MANEJO SUSTENTÁVEL DAS PASTAGENS DE RONDÔNIA. *II SIMPÓSIO*.
- Verrelst, J., Romijn, E., & Kooistra, L. (2012). Mapping vegetation density in a heterogeneous river floodplain ecosystem using pointable CHRIS/PROBA data. *Remote Sensing*, 4(9), 2866–2889. <https://doi.org/10.3390/rs4092866>
- Wang, J., Wang, T., Skidmore, A. K., Shi, T., & Wu, G. (2015). Evaluating different methods for grass nutrient estimation from canopy hyperspectral reflectance. *Remote Sensing*, 7(5), 5901–5917. <https://doi.org/10.3390/rs70505901>
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastiaanssen, W. (2002). Manual for Surface Energy Balance Algorithms for Land, 1–98.
- Werner, J. C. (1986). *Aduacao de pastagens*. (Boletim té). Nova Odessa: instituto de Zootecnia.
- Xavier, A. C., Rudorff, B. F. T., Moreira, M. A., Alvarenga, B. S., de Freitas, J. G., & Salomon, M. V. (2006). HYPERSPECTRAL FIELD REFLECTANCE MEASUREMENTS TO ESTIMATE WHEAT GRAIN YIELD AND PLANT HEIGHT. *Science Agricultural*, 63, 130–138. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000200004>
- Xue, L., & Yang, L. (2009). Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.06.002>
- Zanchi, F., Waterloo, M. J., G Aguiar, L. J., von RANDOW, C., Kruijt, B., Luiz CARDOSO, F., & Manzi, A. O. (2009). Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil, 335(392), 335–348. Retrieved from <http://dare.ubvu.vu.nl/bitstream/handle/1871/32404/228524.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Zhang, B., Zhang, L., Xie, D., Yin, X., Liu, C., & Liu, G. (2016). Application of synthetic NDVI time series blended from landsat and MODIS data for grassland biomass estimation. *Remote Sensing*, 8(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs8010010>

3. SELEÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA RADIOMETRIA DIRETA EM CAMPO PARA *PANICUM MAXIMUM* CV. MOMBAÇA E *UROCHLOA BRIZANTHA* CV. MARANDÚ

Amparo Cisneros Garcia¹, Peterson Ricardo Fiorio¹, Jesus Delegido Gomez²

¹Departamento Engenharia de Biossistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil

²Laboratori de Processament d'Imatges, Universitat de Valencia, Valencia, España

Resumo

No Brasil, as pastagens são extremamente importantes para a produção de carne bovina já que cerca do 95 % é produzida para alimentar os rebanhos. Duas das espécies mais utilizadas no Brasil são *Uroclhoa Brizantha* e *Panicum maximum*, sendo a cultivar Marandú e Mombaça as mais comuns. Na agricultura, técnicas de sensoriamento são um meio prático e barato para se obter informações sobre parâmetros de interesse agrônômico, sendo os sensores ópticos uma alternativa para a avaliação de resposta de culturas. Para as pastagens, apesar da efetividade de sensores ópticos em identificar diferentes características agrônômicas, ainda há dificuldade em estabelecer relações com alguns parâmetros biofísicos. Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo utilizar índices de vegetação (IVs), calculados a partir de dados obtidos por radiometria de campo, para a estimativa de parâmetros biofísicos, tais como: teor foliar de nitrogênio (TFN), produtividade, altura e índice de área foliar (IAF). Para tanto, foi avaliada uma área experimental com 32 parcelas, 16 para a cultivar Mombaça e 16 para Marandú, submetidas a tratamentos com diferentes doses de adubação nitrogenada. Ao longo do ciclo da cultura, avaliou-se a sua altura, produtividade, IAF e o TFN e a sua resposta espectral de 400 até 920 nm. Os IVs utilizados para esse estudo foram o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), TBI (Three Band Index), DLH (Difference Line Height) e NAOC (Normalized Area Over reflectance Curve). Os resultados demonstraram que para a variável TFN os melhores índices foram NDI (R^2 de 0,54) e TBI (R^2 de 0,53). Para a predição da produtividade foram o índice TBI (R^2 de 0,67) e NAOC (R^2 de 0,59), para a variável altura foram DLH (R^2 de 0,55), NDI (R^2 de 0,46) e NAOC (R^2 de 0,49). Por último, para a variável IAF o melhor índice foi o NAOC tanto para Mombaça (R^2 de 0,42), Marandú (R^2 de 0,65) e para o conjunto de dados das duas cultivares (R^2 de 0,52). De forma geral resultados obtidos pelo presente trabalho mostraram ser possível uma razoável predição dos parâmetros biofísicos por meio de espectroscopia *in situ*.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Forrageiras tropicais; Dados hiperespectrais; Bandas estreitas

Abstract

In Brazil, pasture is extremely important for the production of beef, since about 95% is produced to feed the herds. Two of the most commonly used species in Brazil are *Uroclhoa Brizantha* and *Panicum maximum*, with Marandú and Mombaça being the most common cultivars. In agriculture, sensing techniques are a practical and inexpensive way to obtain information on parameters of agronomic interest, with optical sensors being an alternative for the evaluation of crop response. For pastures, despite the effectiveness of optical sensors on identifying different agronomic characteristics,

it is still difficult to establish relationships with some biophysical parameters. In this context, the objective of this study was to use vegetation indices (IVs), calculated from data obtained by field radiometry, to estimate biophysical parameters, such as: nitrogen content, productivity, height and leaf area index (LAI). For that, an experimental area was evaluated with 32 plots, 16 for the cultivar Mombaça and 16 for Marandú, submitted to treatments with different doses of nitrogen fertilization. During the culture cycle, its height, productivity, LAI and TFN and its spectral response of 400 to 920 nm were evaluated. The IVs used for this study were NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), TBI (Three Band Index), DLH (Difference Line Height) and NAOC (Normalized Area Over Reflectance Curve). The results showed that for the variable TFN the best indexes were NDI (R^2 of 0,54) and TBI (R^2 of 0,53). The TBI (R^2 of 0,67) and NAOC (R^2 of 0,59) indexes were used for the productivity prediction, for the variable height the best indexes were DLH (R^2 of 0,55), NDI (R^2 of 0,46) and NAOC (R^2 of 0,49). Finally, for the variable LAI, the best index was the NAOC for both Mombaça (R^2 of 0,42) and Marandú (R^2 of 0,65), and also for the combined data set of the two cultivars (R^2 of 0,52). In summary, the results obtained here showed a reasonable prediction of the biophysical parameters by means of in situ spectroscopy.

Keywords: Remote sensing; Tropical forages; Hyperspectral data; Narrow bands

3.1. Introdução

No Brasil ocorreu um aumento notável de produção bovina entre 1977 a 2012, apresentando um grande aumento na região Centro-Oeste do país (McManus *et al.*, 2016). As pastagens são extremamente importantes para a produção de carne bovina devido à ampla extensão territorial estabelecidas no país, além de ser considerada a base do alimento do rebanho, já que são a fonte mais barata para produção de proteína animal para consumo humano (Fernandes *et al.*, 2015).

As espécies que majoritariamente são cultivadas no Brasil são *Uroclhoa* e *Panicum maximum*. Dentro do gênero *Uroclhoa* uma das cultivares mais utilizadas é *U. brizantha* cv. Marandú com 45% de toda a área com pastagens cultivadas (Euclides *et al.*, 2010), que correspondem a aproximadamente 45 milhões de hectares. A espécie *Panicum maximum* apresenta um dos maiores potenciais de produção de matéria seca (PMS) em ambientes subtropicais e tropicais conhecidos, podendo atingir produção anual de matéria seca em torno de 33 t ha⁻¹ (Galindo *et al.*, 2017). No entanto, no Brasil existem pastagens degradadas, devido ao solo com baixa fertilidade e falta de nutrientes.

O nitrogênio (N) representa um dos macronutrientes mais limitados em forrageiras tropicais. De forma geral, as forrageiras são bastante responsivas aos fertilizantes nitrogenados aumentando o conteúdo de proteína bruta (PB), número de perfilhos e folhas e, conseqüentemente, na produção de matéria seca (MS), uma vez que outros fatores como a disponibilidade de água e outros nutrientes não estejam limitando (Monteiro *et al.*, 2013). A maioria dos estudos relacionados com forrageiras tropicais e a utilização do N tem proporcionado um aumento imediato e visível na produção de forragem (Martins *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2015; Galindo *et al.*, 2018).

Por tanto para a produção e desenvolvimento de uma cultura, a disponibilidade nutricional decorrente das propriedades físicas e químicas do solo é um fator muito importante já que determina a variabilidade espacial e temporal dentro de uma mesma área. Assim, através dessa variabilidade, é possível identificar algumas causas que poderão ser corrigidas em tempo hábil, aumentando a produtividade das culturas (Diker & Bausch, 2003).

Segundo Queiroz *et al.* (2000) a agricultura de precisão pode ser considerada como um sistema de gerenciamento agrícola com base em informações de mapas que contem a variabilidade espacial dos fatores de produção com o objetivo de aumentar a eficiência do processo produtivo. Uma das fontes de informação para a agricultura de precisão constitui-se em dados adquiridos por meio do sensoriamento remoto, que consiste em obter dados espectrais relacionados às características agronômicas das culturas. O sensoriamento remoto é uma das técnicas para avaliação da produção da forragem. Esse método mede a massa de forragem através de um contraste entre diferentes comprimentos da área de pastagens em relação aos demais alvos, apresentando um custo reduzido e uma abrangência de grandes áreas em um curto espaço de tempo (Salimon & Anderson, 2017).

Os dados espectrais, obtidos por meio de técnicas de sensoriamento remoto, podem ser transformados em índices de vegetação, os quais possibilitam, em uma determinada área de estudo, identificar as condições nutricionais da cultura. A razão entre as bandas realizada para a obtenção desses índices é capaz de reduzir alguns fatores de variação, como por exemplo a arquitetura do dossel e a geometria de visada e de iluminação (Abrahão *et al.*, 2009). Segundo Huete *et al.* (1999) os índices de vegetação (IVs) resultam da combinação da medida da radiação eletromagnética refletida pela vegetação em algumas bandas espectrais do espectro-eletromagnético, que guardam relação com a quantidade e o estado da vegetação em uma área terrestre. Ponzoni *et al.* (2012) afirmam que estes índices são relacionados a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice de área foliar (IAF), minimizando os efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição que influenciam os valores de reflectância da vegetação.

Diversos IVs tem sido desenvolvidos e estudados ao longo desses tempos, para a estimativa de diferentes parâmetros biofísicos. Nesse estudo foram testados diferentes IVs, entre eles o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) que foi proposto por Rouse *et al.* (1973) e é calculado pela diferença de reflectância entre a faixa de infravermelho próximo (NIR) e a faixa do visível (VIS) e dividida pela somatória das faixas do NIR e do VIS. O NDVI é o mais comumente empregado, que detém a habilidade para minimizar efeitos topográficos ao produzir uma escala linear de medida, possui a propriedade de variar entre -1 a $+1$. Outro índice estudado foi o proposto por Gower *et al.* (1980) que apresenta os espectros de reflectância de corpos de água que geralmente exibem um pico distinto em comprimentos de onda mais longos que é causado pela fluorescência solar estimulada pelos pigmentos de clorofila produzido através do fitoplâncton. Na maioria das situações, este pico é centrado perto de 685 nm através de uma medida simples em 3 pontos com diferentes alturas (Difference Line Height ou DLH) que pode ser usada para estimar a concentração de clorofila a.

Atualmente, é relativamente comum encontrar estudos que testam diversos índices de vegetação para diferentes aplicações. Tian *et al.* (2011) estudando índices de vegetação de três bandas (Three Band Index) para a estimação de nitrogênio na cultura do arroz encontraram que as bandas que melhor se correlacionavam com o N foram 705, 717 e 491. Por outro lado, Delegido *et al.* (2010) sugeriram um novo índice denominado NAOOC (Normalized Area Over reflectance Curve) para a estimativa do conteúdo de clorofila foliar de áreas heterogêneas com diferentes culturas, diferentes copas e diferentes tipos de solo descoberto. Este índice é baseado no cálculo da área sobre a curva de reflectância obtida por medições de reflectância de alta resolução espectral, determinadas a partir da integral do intervalo vermelho-próximo ao infravermelho, dividido pela reflectância máxima naquela região espectral.

Vários estudos têm sido realizados com base em espectrorradiometria de campo. Foster *et al.* (2017) estudando como prever a concentração de N e biomassa, através de dados hiperespectrais obtidos com um

espectrorradiômetro ASD FieldSpec FR, em diferentes tipos de grama e sorgo obtiveram que os melhores resultados foram para o índice de vegetação de nitrogênio (NNVI), o qual é baseado no índice NDVI. Contudo, o uso de dados hiperespectrais e de índices de vegetação requer um estudo prévio sobre as faixas espectrais e os índices mais apropriados. Segundo Thenkabail *et al.* (2000) diversos estudos vêm sendo realizados com o intuito de determinar as melhores bandas na estimativa de variáveis biofísicas utilizando-se dados hiperespectrais. Para a determinação das melhores bandas, faz-se necessário a realização de uma análise de regressão de todas as combinações possíveis entre duas ou três bandas estreitas, de acordo com determinado índice hiperespectral, para se estimar uma determinada variável biofísica.

Por tanto a hipótese do trabalho seria se através de dados obtidos por radiometria de campo (in situ) se podem ser estimados os diferentes parâmetros biofísicos tais como: teor de nitrogênio foliar (TFN), produtividade, altura e índice de área foliar (IAF) através de um sensor passivo e por meio de IVs.

Dentro deste contexto, esse trabalho aborda o potencial de dados de sensoriamento remoto, mais especificamente, dados espectrorradiométricos de campo (in situ) e convertidos para diferentes índices de vegetação, para a estimativa de diferentes parâmetros biofísicos.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Descrição do tratamento experimental e obtenção dos dados de campo

O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em Piracicaba, São Paulo, com latitude 22°42'15" S, longitude 47°37'23" O e altitude 546 m. O solo é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico (Santos et al., 2013). O clima da região é do tipo subtropical úmido (Cwa), segundo a classificação de Köppen-Geiger, com verão quente e inverno seco, com temperatura média inferior a 18 °C no mês mais frio e superior a 22 °C no mês mais quente (Kottek et al., 2006). As parcelas foram semeadas a lanço, sendo o capim *Panicum maximum* cv. Mombaça semeado no início de fevereiro de 2016 e o *Urochloa brizantha* cv. Marandú em abril de 2016. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, totalizando dois blocos, cada um composto por quatro tratamentos de nitrogênio (N) e duas repetições por tratamento. Os tratamentos estão descritos conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos experimentais.

Parcelas	Doses de N (kg/ha/ciclo)	Nomenclatura Utilizada	Total aplicado (kg/ha/ano)	Descrição
Mombaça	0	M0	0	Controle
	25	M1	200	Dose baixa
	50	M2	400	Dose média
	75	M3	600	Dose alta
Marandú	0	B0	0	Controle
	25	B1	175	Dose baixa
	50	B2	350	Dose média
	75	B3	525	Dose alta

A área experimental foi dividida em 32 parcelas, 16 para a cultivar Mombaça e 16 para Marandú. Cada parcela possuía uma área de 20 m². Para coleta dos dados hiperespectrais do dossel de plantas foi utilizado o sensor *HandHeld 2Spectroradiometer*. Este equipamento se caracteriza por ser um sensor hiperespectral passivo, que trabalha em comprimentos de onda que compreendem o espectro visível e infravermelho próximo (325 nm a 1075 nm). Foram coletados 10 pontos para cada tratamento e repetição, totalizando 160 pontos para cada uma das forrageiras. No local foi instalado um sistema de irrigação por aspersão, a fim de controlar a umidade do solo e não comprometer o cultivo ao longo do ciclo de estudo. Para obter diferenças estruturais dentro do dossel e respeitar o momento ideal de colheita, foram adotados cortes fixos de 21 dias para a cultivar Mombaça e de 28 dias para a cultivar Marandú. Para a padronização dos cortes seguiu-se a metodologia proposta por Silva (2004) que após a compilação de diferentes dados e pesquisas, determinou alturas de resíduo de 30 e 15 cm para *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Urochloa brizantha* cv. Marandú respectivamente. A coleta de dados para a cultivar Mombaça começou em outubro de 2016, porém não foram realizadas leituras espectrais no período de dezembro de 2016, em função de fatores climáticos desfavoráveis. O experimento foi finalizado no mês de abril de 2017. Para a cultivar Marandú o experimento de campo começou em outubro de 2016, porém não foram realizadas leituras espectrais no mês de janeiro de 2017, em função da ocorrência de chuvas durante o ciclo. O experimento foi finalizado no meio de maio de 2017. As adubações foram realizadas com ureia, contendo uma concentração de 46% de N. Foram avaliados neste experimento, dados hiperespectrais de dossel, produtividade, altura (cm), teor foliar de nitrogênio e IAF, ao final de cada ciclo de cultivo.

Para obter a produtividade foi construído uma moldura quadrada de 0,7 m² e lançada aleatoriamente dentro de cada parcela. Posteriormente, a massa coletada dentro da moldura foi pesada. Após a pesagem da massa total retirou-se uma subamostra de aproximadamente 200 g/parcela de massa verde, para a separação botânica, subdividida em folha, bainha+colmo e material morto. Em seguida o material vegetativo foi encaminhado à estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 horas para a determinação da porcentagem de matéria seca (% MS). Após este procedimento foi possível estimar a % MS das frações nesta área e, consequentemente, estimar os componentes produtivos (kg ha⁻¹) da produtividade total de forragem.

Para a estimativa da altura foi utilizada uma trena graduada em cm, sendo medida a partir do solo até a curvatura da folha recentemente expandida, realizando-se uma amostragem e tomando um valor representativo por cada tratamento e repetição.

Para a obtenção dos dados de teor foliar de nitrogênio foram coletadas oito folhas por cada tratamento e repetição, ao longo das sete coletas realizadas. No campo eram coletadas as folhas diagnósticas, que correspondem as mais novas, totalmente desenvolvidas e com a lígula presente. No laboratório as folhas foram primeiramente lavadas em água corrente. Após a lavagem foram alocadas em saco de papel para secar em estufa com ventilação forçada, a 65°C, até atingir peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas para a determinação dos teores de nitrogênio. As análises químicas são determinadas nos extratos obtidos pela digestão sulfúrica por meio do método semi-micro Kjeldahl (Malavolta *et al.*, 1988).

Para a estimativa do IAF foi coletada uma amostra de forragem em uma área conhecida (0,25 m²) e com auxílio de um integrador modelo LI-3100C (Li-Cor®), estimou-se a área foliar. O cálculo foi realizado através da multiplicação da massa total, pela área foliar estimada pelo integrador e dividido pela área conhecida (0,25 m²).

3.2.2. Análise Estatística

3.2.2.1. Operador de Modelos de Transferência Radiativa Automatizada (ARTMO)

O ARTMO é um pacote de programas científico que consiste em Modelos de transferência radiativa (RTMs), como por exemplo PROSAIL, e várias caixas de ferramentas de estimativa que permitem o desenvolvimento e otimização de algoritmos de estimativa para converter imagens ópticas em mapas que mostram propriedades da vegetação (Verrelst *et al.*, 2012).

O programa possui uma caixa de ferramentas de avaliação de índices que é utilizada para calibrar e validar formulas genéricas, fornecendo todas as combinações de bandas (Rivera *et al.*, 2014). Através dessa ferramenta e do espectro completo coletado em campo (400-920 nm), foram testados diferentes índices de vegetação para encontrar as melhores combinações de bandas. O método utilizado para a seleção de bandas foi de validação cruzada com a técnica *k*-fold para garantir resultados mais robustos (Snee, 1977). Este método divide os dados disponíveis em *k*-subconjuntos. Destes *k*-subconjuntos de dados, os sub-conjuntos de dados *k*-1 são selecionados como um conjunto de dados de calibração e um único sub-conjunto de dados *k* é usado para a validação do modelo. O processo de validação cruzada é então repetido *k* vezes, com cada um dos *k* sub-conjuntos de dados usados como dataset de validação. Assim, todos os dados são utilizados para calibração e validação. Aqui, usamos um procedimento de validação cruzada de 4 vezes (*k* = 4). Após esse processo, o programa fornece a possibilidade de apresentar a quantidade de dados que o usuário precisar e os resultados estatísticos (R, R², NSE, RMSE, NRMSE), bandas espectrais e equações, tanto para os dados de validação quanto os de calibração. Nesse estudo foram escolhidos os primeiros 50 resultados em função dos dados de validação e dos melhores coeficientes de determinação (R²) encontrados entre os índices de vegetação e as variáveis estudadas. Essa metodologia aplicou-se primeiramente para as duas cultivares de forrageira separadamente (Mombaça e Marandú). Posteriormente foi realizado o estudo para todo o conjunto de dados independente das cultivares (Mombaça e Marandú).

3.2.2.2. Índices de vegetação

Com base nos índices estabelecidos para a obtenção de parâmetros biofísicos na literatura, uma série de índices de vegetação (Tabela 2) foram introduzidos na caixa de ferramentas de avaliação de índices acompanhada das variáveis estudadas ao longo do experimento (TFN, produtividade, altura e IAF). Os índices introduzidos no ARTMO foram uma série de índices genéricos, isto é, fórmulas nas quais as bandas específicas a serem utilizadas não são definidas, cuja formulação foi baseada em índices para a obtenção de diferentes parâmetros biofísicos da vegetação incluindo o nitrogênio (Tabela 2). O único índice que ao se testar manteve-se igual ao índice original descrito pelo autor foi o desenvolvido por Delegido *et al.* (2010). Esse índice é utilizado para a estimação do conteúdo de clorofila e está destacado na Tabela 2 com uma cor cinza. Para o cálculo do mesmo, o autor utiliza uma função matemática do tipo integral que se ajusta á uma curva espectral na região do vermelho e do red-edge. Como o software ARTMO não consegue trabalhar com funções desse tipo utilizou-se o software Excel para o calculo do NAOC. O mesmo foi realizado através do somatório da refletância entre 643

até 795 dividido pela largura entre essas bandas (152). O valor obtido em cada um dos parâmetros estudados foi o introduzido no software ARTMO para obter as melhores bandas em função dos parâmetros biofísicos.

Tabela 2. Índices de vegetação genéricos que foram introduzidos no ARTMO e que se relacionam com os parâmetros biofísicos. Sendo que $R\lambda$ representa a refletância e λ o comprimento de onda.

Referencia	Formula original	Nome genérico	Abreviação	Formula genérica
Rouse <i>et al.</i>, 1973	$\frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670}}$	Normalized Difference Index	NDI	$\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}$
Tian <i>et al.</i>, 2011	$\frac{R_{705}}{R_{717} + R_{491}}$	Three Ratio Band Index	TBI	$\frac{R_1}{R_2 + R_3}$
Gower, 1980	$R_{676} - 0.5 * (R_{746} + R_{665})$	Difference light Heigh	DLH	$R_1 - 0.5(R_2 + R_3)$
Delegido <i>et al.</i>, 2010	$1 - \frac{\int_{795}^{643} Ri * d\lambda}{R_{795} (795 - 643)}$	Normalized Area Over reflectance Curve	NAOC	Igual a original

3.2.2.3. Processamento dos dados

O fluxograma utilizado para o processamento dos dados foi descrito na Figura 1. Após a coleta realizada em campo, os espectros completos (400 a 920 nm) foram processados com auxílio do software ARTMO. Foram processadas as sete coletas de dados realizadas ao longo do experimento para cada uma das variedades de forrageiras tropicais (Mombaça e Marandú) de forma individual e posteriormente para o conjunto das duas cultivares. Foram testados os diferentes IV's (Tabela 2), para as quatro variáveis estudadas ao longo do experimento (teor foliar de nitrogênio (TFN), produtividade, altura e índice de área foliar - IAF), procurando encontrar as melhores bandas para as duas cultivares (Mombaça e Marandú) e também para o conjunto de dados. Após esse processamento com o software ARTMO, foram apresentados os resultados para Mombaça, Marandú e para o conjunto de dados, em função dos diferentes parâmetros biofísicos estudados (TFN, produtividade, altura e IAF) para posteriormente em função dos melhores resultados gerar modelos de predição das variáveis.

Figura 1. Fluxograma do processamento de dados.

A definição dos limites das regiões espectrais varia de acordo com a fonte consultada. Neste trabalho, foram adotados os limites: de 370 a 399 nm para a região do violeta, de 400 a 489 nm para o azul, 490 a 559 nm para o verde, 560 a 589 nm para o amarelo, 590 a 629 nm para o laranja, 630 a 699 nm para o vermelho, 700 a 779 nm para o red-edge e de 780 a 1.500 nm para o infravermelho próximo; os quais se aproximam dos propostos por Novo (2010).

3.3. Resultados e discussão

Nesse trabalho foram estudados os diferentes IVs (Tabela 2) em função dos parâmetros biofísicos (TFN, produtividade, altura e IAF) para as cultivares Mombaça, Marandú e para o conjunto de dados dessas duas forrageiras.

Sendo observado que em função de cada parâmetro biofísico e os diferentes IVs os resultados variaram. As melhores combinações às vezes se deram para a cultivar Mombaça, outras para a cultivar Marandú e também para o conjunto de dados das duas forrageiras. Diante dos resultados, pode-se afirmar que os IVs obtidos neste estudo podem ser aplicados para a estimação desses parâmetros através de radiometria direta. Dos primeiros 50 resultados fornecidos pelo software ARTMO, foram selecionados os que dentro de um ponto de vista físico e estatístico (coeficiente de determinação) se correlacionaram melhor com cada uma das variáveis estudadas. Os melhores resultados foram selecionados e destacados em cor cinza em cada uma das tabelas apresentadas para cada parâmetro biofísico estudado (Tabela 3,4,5 e 6). Também foram apresentados os RMSE e NRMSE (%) de cada um dos IVs estudados, os quais serão descritos nas Tabelas.

3.3.1. Teor de nitrogênio foliar

Os resultados obtidos para a variável teor foliar de nitrogênio (TFN), a partir dos IVs exibidos na Tabela 2, foram apresentados na Tabela 3. Primeiramente foi realizado o processamento dos IVs com o TFN através do software ARTMO, para cada uma das cultivares estudadas (Mombaça e Marandú) e para o conjunto

de dados das duas forrageiras. Vários autores tem estudado a utilização de IVs par determinação de N em diferentes culturas (Stroppiana *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2015; Camino *et al.*, 2018). Observando a Tabela 3 podemos perceber que de modo geral, os maiores coeficientes de determinação se corresponderam para a cultivar Mombaça. De todos os índices testados nesse estudo os que melhor desempenho obtiveram com o TFN foram o NDI e o TBI. Os mesmos, foram destacados na Tabela 3 com uma coloração cinza.

Para o índice de vegetação NDI as duas bandas do espectro que melhor se correlacionaram com a variável TFN foram 477 e 614, ou seja, uma na região do azul e outra na região do vermelho. O coeficiente de determinação encontrado foi de 0,54 e o erro quadrático médio (RSME) foi de 3,52. No caso do TBI, as bandas que se correlacionaram melhor com a variável TFN foram 507, 616 e 520, ou seja, duas bandas do verde (507 e 520 nm) e uma banda na região laranja (614 nm). Este comprimento de onda está situado entre as mudanças da região do do laranja para a região do vermelho no espectro eletromagnético, sendo assim, um comprimento de onda muito próximo da região do vermelho. O coeficiente de determinação foi de 0,53 e o erro quadrático médio (RSME) foi de 3,41. Na Figura 4, podemos observar o gráfico de distribuição do teor foliar de nitrogênio (TFN) e o índice de vegetação TBI.

A região do visível é caracterizada pela presença de baixa refletância na região do azul e vermelho, decorrente da forte absorção dos pigmentos do grupo da clorofila (Novo, 2010). Segundo Gil *et al.* (2002) a concentração de clorofila das folhas correlaciona-se positivamente com a concentração foliar de N uma vez que 70% do N contido nas folhas estão nos cloroplastos que participam da síntese e da estrutura das moléculas de clorofila e afeta no desenvolvimento e a produção das culturas. De modo geral, o NDVI é mais sensível à presença de pigmentos que participam dos processos fotossintéticos, em particular ao conteúdo de clorofila (Gitelson *et al.*, 1996; Huete *et al.*, 1999). Tian *et al.* (2011) também observaram que estudando IVs para estimação de nitrogênio na cultura do arroz, os TBI (Three Band Index) forneceram melhores resultados e foram propostos IVs otimizados para a estimativa do N. Portanto, a influência do nitrogênio sobre as forrageiras tropicais fez com que as bandas que melhor se correlacionaram se agrupassem nessa região do visível variando entre o azul, verde e vermelho. Segundo Schlemmera *et al.* (2013) estimando teores de N e clorofila no milho irrigado, adubado com cinco doses de N, obtiveram que as bandas que melhor se correlacionaram estavam na região do infravermelho próximo (780-800 nm), verde (540-560 nm) e vermelho (730-750 nm). Pellisier *et al.* (2015) estudando como detectar nitrogênio foliar em pastagens, utilizaram dados espectrais de plataformas aéreas (sensor ProSpecTIR-VS) e terrestre (FieldSpec ASD Inc.). Foram gerados modelos de estimativas de nitrogênio foliar e criados mapas de porcentagem de N em pastagens.

Loozen *et al.* (2019) usando espectrometria de campo mediram a reflectância de uma espécie de gramínea, Yorkshire nevoeiro (*Holcus lanatus L.*), cultivada sob diferentes proporções e níveis de nutrientes. Foram calculados 60 IVs encontrados na literatura e comparados com os IVs otimizados (entre eles o TBI) e desenvolvidos especificamente nesse estudo. Os resultados mostraram que para a estimação do nitrogênio (N) medido a partir do dossel, a determinação foi significativa para os IVs já existentes ($R^2 = 0,16 - 0,48$) e para os IVs otimizados ($R^2 = 0,59 - 0,72$).

Tabela 3. Resultados das melhores bandas encontradas a partir dos dados obtidos por radiometria direta para os diferentes IVs, em função do parâmetro biofísico TFN, para a cultivar Mombaça, Marandú e para o conjunto de dados das duas cultivares. Os índices originais (Tabela 2) foram renomeados devido à mudança das bandas selecionadas através do software ARTMO.

Índice	Cultivar	Bandas	RMSE	NRMSE (%)	R ²
NDI	Mombaça	477; 614 $\frac{R_{477} - R_{614}}{R_{477} + R_{614}}$	3,52	10,72	0,54
	Marandú		3,23	10,34	0,13
	Total		3,34	10,73	0,33
TBI	Mombaça	507; 616; 520 $\frac{R_{507}}{R_{616} + R_{520}}$	3,41	10,11	0,53
	Marandú		3,20	11,45	0,14
	Total		3,41	10,13	0,35
DLH	Mombaça	855;888;766 $R_{855} - 0,5(R_{888} + R_{766})$	36,67	148,68	0,45
	Marandú		35,44	129,26	0,001
	Total		36,48	148,50	0,10
NAOC	Mombaça	$1 - \frac{\int_{795}^{643} R_i * d\lambda}{R_{795} (795 - 643)}$	6,93	25,85	0,38
	Marandú		6,39	25,51	0,02
	Total		6,85	25,68	0,13

Na Figura 2 podemos observar o gráfico que correlaciona o NDI, para a cultivar Mombaça, com a variável TFN. A melhor combinação de bandas do espectro completo encontrada para o índice NDI foi; b1-477; b2-614. O modelo gerado foi do tipo linear, com uma determinação de 0,54 e p-value ≤ 1 %. Dessa forma, o TFN pode ser calculado através de radiometria direta em campo utilizando a equação 1:

$$\text{TFN (g/kg)} = -86,918 * \left(\frac{R_{477} - R_{614}}{R_{477} + R_{614}} \right) + 54,382 \quad (1)$$

Segundo Motomiya *et al.* (2012) estudando avaliar a resposta espectral do dossel da cultura do algodão sobre diferentes doses de N e a sua relação com teores nitrogênio na folha, observaram que o sensoriamento remoto a nível terrestre permite estimar indiretamente a quantidade de N absorvido pela planta. Os autores também observaram que o índice NDVI também demonstrou uma boa determinação com a estimativa de N para a cultura do algodão.

Figura 2. Gráfico de distribuição do TFN em função do índice de vegetação NDI para a cultivar Mombaça.

Na Figura 3 foi apresentada a matriz de correlação lineal entre o índice de NDI e a variável TFN, para a cultivar Mombaça. A mesma foi criada apartir do software ARTMO. Nela podemos observar quais são as regiões que melhor se correlacionam com a variável TFN dentro do espectro coletado em campo (400-920 nm). As regiões que possuem a coloração mais avermelhada são as que estão mais correlacionadas com o TFN. As mesmas coincidem com a região das bandas proporcionadas pelo ARTMO (477 e 614). Entre tanto, a matriz de correlação proporciona um alcance entre essas regiões que varia entre 430 até 500 (b1 ou b2) e 600 até 650 (b2 ou b1) nm.

Figura 3. Matriz de correlação linear entre o teor foliar de nitrogênio (TFN) e o índice de vegetação NDI para a cultivar Mombaça.

Na Figura 4 podemos observar o gráfico que correlaciona o TBI, para a cultivar Mombaça, com a variável TFN. A melhor combinação de bandas do espectro completo encontrada para o índice TBI foi: b1-507; b2-615; b3-520. O modelo gerado foi do tipo linear, com um coeficiente de determinação de 0,53 e p-value ≤ 1 %. Dessa forma, o TFN pode ser calculado através de radiometria direta em campo utilizando a equação 2:

$$\text{TFN (g/kg)} = 290,69 * \left(\frac{R_{507}}{R_{616} + R_{520}} \right) - 70,951 \quad (2)$$

Figura 4. Gráfico de distribuição do TFN em função do índice de vegetação TBI (Three Band Index) para a cultivar Mombaça.

3.3.2. Produtividade

O segundo parâmetro estudado ao longo desse experimento foi produtividade. Após a coleta realizada em campo foram processados os dados do espectro completo (400-920 nm), através do software ARTMO, com as diferentes produtividades obtidas ao longo do experimento visando encontrar através dos IVs testados as melhores combinações de bandas para a estimativa da produtividade. Esse procedimento foi realizado para cada uma das cultivares estudadas (Mombaça e Marandú) e para o conjunto de dados das duas forrageiras. Os resultados foram apresentados na Tabela 4.

De forma geral, podemos perceber que os maiores coeficientes de determinação se corresponderam para a cultivar Mombaça. De todos os índices testados os que melhores determinação obtiveram com a produtividade foram o TBI e o NAOC. Os mesmos, foram destacados na Tabela 4 com uma coloração cinza.

Vários autores citam que através da utilização de nutrientes como N em diferentes forrageiras tropicais é possível obter melhoras na produtividade e biomassa. Cunha *et al.* (2010) estudando a produtividade da cultivar Mombaça sobre diferentes adubações nitrogenadas, observou que a produtividade e a altura foram influenciadas positivamente pelas doses de N aplicadas ao longo do experimento. Bruno *et al.* (2015) afirmaram que o aumento das doses de N gerou um aumento de produtividade e matéria seca no capim Marandú.

Tabela 4. Resultados das melhores bandas encontradas a partir dos dados obtidos por radiometria direta para os diferentes IVs, em função do parâmetro biofísico produtividade, para a cultivar Mombaça, Marandú e para o conjunto de dados das duas cultivares.

Índice	Cultivar	Bandas	RMSE	NRMSE (%)	R ²
NDI	Mombaça	614; 507 $\frac{R_{614} - R_{507}}{R_{614} + R_{507}}$	797,50	16,42	0,51
	Marandú		1034,95	18,36	0,008
	Total		746,69	14,64	0,29
TBI	Mombaça	618;627;424 $\frac{R_{618}}{R_{627} + R_{424}}$	746,28	15,36	0,67
	Marandú		1172,44	18,29	0,07
	Total		943,52	16,26	0,25
DLH	Mombaça	856; 904; 766 $R_{856} - 0,5(R_{904} + R_{766})$	802,35	16,52	0,49
	Marandú		982,23	19,78	0,14
	Total		763,44	16,52	0,30
NAOC	Mombaça	$1 - \frac{\int_{795}^{643} Ri * d\lambda}{R_{795} (795 - 643)}$	898,59	14,69	0,59
	Marandú		1072,03	18,36	0,125
	Total		785,92	17,92	0,28

Na Figura 5 podemos observar o gráfico que correlaciona o TBI, para a cultivar Mombaça, com a variável produtividade. A melhor combinação de bandas do espectro completo encontrada para o índice TBI foi; b1-618; b2-627; b3-424. O modelo gerado foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,67, um erro quadrático médio (RSME) de 750 e um p-value $\leq 1\%$. Dessa forma, a produtividade pode ser calculada através de radiometria direta em campo utilizando a equação 3:

$$\text{Produtividade (kg/ha)} = 4 * 10^8 * e^{-17,26 * \left(\frac{R_{618}}{R_{627} + R_{424}} \right)} \quad (3)$$

Richardson *et al.* (1992) estudaram como os índices de vegetação (IVs), que usam combinações da região do vermelho (Red) e do infravermelho próximo (NIR), predizem produtividade através da refletância do dossel em pastagem. Xavier *et al.* (2006) estimando a produtividade de grãos de trigo, analisaram IVs de diferença normalizada (NB_NDVI *narrow band-normalized difference vegetation index*) com base em dados de banda estreita. Os mesmos foram coletados em campo sobre os dosséis de trigo, em seis estados diferentes de desenvolvimento, através do sensor ASD FieldSpec Pro FR. Os resultados demonstraram que as regiões do vermelho e infravermelho próximo são as de maior potencial para a estimativa de produtividade na cultura do trigo.

Por outro lado, Ren *et al.* (2019) estimando a razão de biomassa verde (GBR), que seria a relação da biomassa verde acima do solo, utilizaram índices de vegetação de faixa larga comuns em pastagens áridas como NDVI; SAVI (Índice de vegetação ajustado ao solo); MSAVI (Índice de vegetação modificado ajustado ao solo); CI (Índice de dossel); NCI (Índice de dossel normalizado) para a estimativa do GBR. Também estudaram os melhores índices de vegetação hiperespectral de banda estreita para a estimativa de GBR usando dados de sensoriamento remoto hiperespectral e medições de GBR durante as estações de crescimento da pastagem. Os resultados demonstraram que para a estimação do GBR as melhores correlações se deram para os índices formados a partir de faixa estreita e coletados diretamente em campo através de um espectrômetro portátil ASD (Analytical Spectral Device). O espectrômetro podia adquirir refletância entre 350 até 2500 nm com resolução de 1 nm. Os resultados demonstraram que os melhores índices de vegetação foram de faixa estreita, sendo as bandas selecionadas 2069 e 2042 nm.

Na Figura 6 podemos observar o gráfico que correlaciona o NAOC para a cultivar Mombaça, com a variável produtividade. O modelo gerado para o índice NAOC foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,59, um erro quadrático médio (RSME) de 900 e um p-value ≤ 1 %. Podemos observar que o NAOC foi definido na equação 4. Dessa forma, a produtividade pode ser calculada através de radiometria direta em campo utilizando a equação 5:

$$NAOC = 1 - \frac{\int_{795}^{643} R_i \cdot d\lambda}{R_{795} (795 - 643)} \quad (4)$$

$$Produtividade \text{ (kg/ha)} = 0,171 * e^{18,91 * NAOC} \quad (5)$$

As bandas espectrais que estão nas regiões de borda vermelha (700–750 nm) e vermelha (630–690 nm) são consideradas como as duas faixas úteis para estimar a concentração de clorofila (Blackburn, 1998). A combinação de bandas para gerar a Figura 6 oscilaram entre as bandas de 643 até 795 nm. O NAOC foi o único que manteve as bandas originais citadas pelo autor (Tabela 2). Esse índice utiliza a informação de todas as bandas entre a máxima absorção de clorofila (665 nm) e a região final do red-edge onde já não se produz a absorção dos pigmentos (783 nm).

Figura 5. Gráfico de distribuição da produtividade em função do índice de vegetação TBI (Three Band Index) para a cultivar Mombuca.

Figura 6. Gráfico de distribuição da produtividade em função do índice de vegetação NAOC para a cultivar Mombuca.

De forma geral, podemos observar que as bandas que melhor se correlacionaram com a variável produtividade oscilaram entre a região do visível (azul, verde e vermelho) e a região de borda vermelha e infravermelho próximo.

3.3.3. Altura

O terceiro parâmetro biofísico estudado foi a altura. Foram processados os dados do espectro coletado *in situ* (400-920 nm), através do software ARTMO, com as diferentes alturas obtidas ao longo do experimento visando encontrar através dos IVs testados as melhores combinações de bandas para a estimação da variável

altura. Esse procedimento foi realizado para cada uma das cultivares estudadas (Mombaça e Marandú) e para o conjunto de dados das duas forrageiras. Os resultados foram apresentados na Tabela 5.

De forma geral, podemos observar que os melhores resultados se obtiveram para a cultivar Marandú. Os melhores índices encontrados para definir a variável altura foram NDI, DLH e NAOC. Os mesmos, foram destacados na Tabela 5 com uma coloração cinza. Diferentes trabalhos têm demonstrado a influência do nitrogênio sobre o capim Marandú (Costa *et al.*, 2010; Martins *et al.*, 2006; Silva, 2004; Corrêa *et al.*, 2003) afirmando que a adubação nitrogenada influencia as características estruturais, altura e acúmulo de massa seca do capim Marandú.

Nesse estudo foram anotadas as medidas das alturas, em base a um calendário fixo de 28 dias, para a cultivar Marandú, em função dos diferentes tratamentos de N utilizados ao longo do experimento de campo.

Tabela 5. Resultados das melhores bandas encontradas a partir dos dados obtidos por radiometria direta para os diferentes IVs, em função do parâmetro biofísico altura, para a cultivar Mombaça, Marandú e para o conjunto de dados das duas cultivares.

Índice	Cultivar	Bandas	RMSE	NRMSE (%)	R ²
NDI	Mombaça	849;804	9,55	13,98	0,35
	Marandú	$\frac{R_{849} - R_{804}}{R_{849} + R_{804}}$	6,01	20,57	0,46
	Total		21,22	43,51	0,07
TRBI	Mombaça	835;829;808	11,33	16,62	0,093
	Marandú	$\frac{R_{835}}{R_{829} + R_{808}}$	6,95	10,18	0,20
	Total		21,74	44,75	0,002
DLH	Mombaça	793;863;773	11,22	16,46	0,10
	Marandú	$R_{793} - 0,5(R_{863} + R_{773})$	5,35	18,28	0,55
	Total		21,90	43,09	0,02
NAOC	Mombaça	$1 - \frac{\int_{795}^{643} Ri * d\lambda}{R_{795} (795 - 643)}$	9,68	14,17	0,39
	Marandú		5,94	11,41	0,49
	Total		22,85	45,86	0,0045

Na Figura 7 podemos observar o gráfico que correlaciona o NDI para a cultivar Marandú, com a variável altura. A melhor combinação de bandas do espectro completo encontrada para o índice NDI foi; b1-849; b2-804. O modelo gerado para o índice NDI foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,46, um erro quadrático médio (RSME) de 6 cm e um p-value ≤ 1 %. Dessa forma, a altura pode ser calculada através de radiometria direta em campo utilizando a equação 5:

$$\text{Altura (cm)} = 42,791 * e^{-90,72 * ((R_{849}) - (R_{804})) / ((R_{849}) + (R_{804}))} \quad (5)$$

A adubação, especialmente a nitrogenada, é fundamental para o aumento da produção de biomassa e massa de forragem. Canto *et al.* (2002) afirmam que a medida que se aumenta a altura do pasto, aumenta-se a massa de forragem. Varias pesquisas realizadas com forrageiras demonstraram que a máxima taxa de acúmulo de forragem é obtida quando a interceptação luminosa (IL) pelo dossel forrageiro é de 95% (Santos *et al.*, 2009; Sila *et al.*, 2009; Pereira *et al.*, 2011). Esta medida é um indicativo ótimo para entender o manejo de cada cultivar e como expressar o seu potencial de produção. Como a mensuração deste percentual as vezes é inviável devido ao alto custo do equipamento, e com a finalidade de tornar esta medida mais prática no dia a dia, Carnevali (2003) e Barbosa *et al.* (2011) afirmaram que a altura do dossel, na condição de pré pastejo, apresenta alto grau de associação com os valores de interceptação luminosa pelo dossel.

Figura 7. Gráfico de distribuição da altura em função do índice de vegetação NDI para a cultivar Marandú.

Na Figura 8 podemos observar a matriz de correlação lineal entre o índice NDI e a variável altura, para a cultivar Marandú. As bandas selecionadas para o índice NDI, através do software ARTMO, foram b1-849 e b2-804. A matriz representa a longitude de onda medida *in situ*, apartir do espectro coletado em campo (400-920 nm) e o coeficiente de determinação (R^2). As regiões que possuem a coloração mais avermelhada são as que estão mais correlacionadas com a variável altura. As mesmas coincidem com a região das bandas proporcionadas pelo ARTMO (849 e 804). Entre tanto, a matriz proporciona um alcance dessas regiões que nesse caso correspondem entorno de 800 e 900 nm.

As bandas espectrais proporcionadas pelo ARTMO para o índice NDI estão posicionadas na região do infravermelho próximo (NIR). Nessa faixa, tanto a morfologia interna das folhas quanto a estrutura da vegetação ocasionam uma alta reflectância da energia solar incidente (Lourenço & Landim, 2004). Por tanto, isso explicaria porque a altura obteve os melhores resultados para a região do NIR já que de alguma maneira está sendo medida a massa da pastagem e por tanto a estrutura da vegetação e a morfologia.

Figura 8. Matriz de correlação entre a altura e o índice de vegetação NDI para a cultivar Marandú.

Na Figura 9 podemos observar o gráfico que correlaciona o DLH para a cultivar Marandú, com a variável altura. O modelo gerado para o índice DLH foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,55, um erro quadrático médio (RSME) de 5,4 e um p-value $\leq 1\%$. As bandas utilizadas para esse índice foram; b1-793; b2-863; b3-773. As mesmas trabalham na região do red-edge (773 e 793) e na região do infravermelho próximo (863). Dessa forma, a altura pode ser calculada através de radiometria direta em campo utilizando a equação 7:

$$\text{Altura (cm)} = 30,565 * e^{163,57 * (R793 - 0,5 * (R863 + R773))} \quad (7)$$

Figura 8. Gráfico de distribuição da altura em função do índice de vegetação DLH para a cultivar Marandú.

Na Figura 10 podemos observar o gráfico que correlaciona o NAOC para a cultivar Marandú, com a variável altura. O modelo gerado para o índice NAOC foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,49, um erro quadrático médio (RSME) de 5,94 e um p-value $\leq 1\%$. Na equação 8 foi definido o NAOC. Sendo que, a altura pode ser calculada através de radiometria direta em campo utilizando a equação 9:

$$\text{NAOC} = 1 - \frac{\int_{795}^{643} R_i \cdot d\lambda}{R_{795} (795 - 643)} \quad (8)$$

$$\text{Altura (cm)} = 0,693 * e^{7,2732 * \text{NAOC}} \quad (9)$$

Como podemos observar o índice NAOC situa-se entre as regiões do vermelho e infravermelho próximo (NIR). Segundo Arne *et al.* (1995) a refletância na região do vermelho é uma das principais indutoras do acúmulo de clorofila. Nessa região é caracterizada por possuir uma baixa refletância, porém como já citado anteriormente a região do NIR se correlaciona com a estrutura interna das plantas e com a morfologia das plantas. Oliveira *et al.* (2015) estudando o capim digitária, observaram que a adubação nitrogenada promoveu decréscimo nos teores de matéria seca, eficiência do uso do nitrogênio e influenciou positivamente na altura. Pode-se inferir a partir dos dados deste experimento que a resposta da altura (indicador de biomassa) ocorreram de maneira exponencial.

De forma geral, podemos observar que as bandas que melhor se correlacionaram com a variável altura oscilaram entre a região do visível (vermelho), red-edge e do infravermelho próximo, demonstrando que existe uma vinculação entre a altura, a morfologia interna das folhas e a estrutura da vegetação.

Figura 9. Gráfico de distribuição da altura em função do índice de vegetação NAOC para a cultivar Marandú.

3.3.4. Índice de área foliar

O índice de área foliar é a relação entre a área de folhas e a superfície de solo que elas cobrem (m^2 de folha/ m^2 de solo), expressando o potencial de rendimento de forragem, relacionado com a utilização da energia solar, através da fotossíntese. O IAF considerado como ótimo, em uma planta forrageira, é aquele associado com altos rendimentos. Normalmente, ocorre quando as folhas interceptam cerca de 90% da energia radiante incidente (Costa *et al.*, 2004).

A região do red-edge (700-750 nm) localizada entre o vermelho (600-700 nm) e o infravermelho próximo (750-900 nm), é caracterizada pelo aumento acentuado na reflectância de vegetações verdes. Essa região tem sido considerada como sendo a mais favorável para estimar biomassa e IAF (Mutanga *et al.*, 2003; Delegido *et al.*, 2013). Pezzopane *et al.* (2019) estudando como estimar massa de forragem do capim Piatã sob diferentes sistemas de produção, com pleno sol e com sobreamento, utilizando índices de vegetação tais como NDVI, NDVI_RE (índices de diferença vermelha normalizada), SRI (índice de razão simples) e MSR (índice de clorofila) obtiveram que os melhores resultados para a estimação de massa foliar e IAF foram o SRI (R^2 entre 0,55 e 0,84) para os sistemas com pleno sol e MSR (R^2 entre 0,65 e 0,93) para áreas com sobreamento. Os comprimentos de onda utilizados para esse estudo foram três; 670,720 e 760 nm. Quando foram analisados todos os sistemas em conjunto (pleno sol e sobreamento) o índice que melhor se correlacionou foi o NDVI com um coeficiente de determinação que oscilou entre 0,65 e 0,93. Por tanto, vários estudos demonstram que essa região está intimamente ligada a estimativa de biomassa e do índice de área foliar.

Analisando os resultados obtidos para a variável IAF (Tabela 6), a partir dos IVs exibidos na Tabela 2, podemos observar que as melhores correlações se deram para o índice NAOC (demarcado na tabela com coloração cinza). O mesmo trabalha na região que oscila entre 643 e 795 nm. Ou seja, como já citado anteriormente, a região do vermelho, red-edge e infravermelho próximo. De forma geral, podemos observar que

os melhores coeficientes de determinação se deram para a cultivar Mombaça ($R^2=0,42$), Marandú ($R^2=0,65$) e para o conjunto de dados das duas forrageiras ($R^2=0,52$).

Tabela 4. Resultados das melhores bandas encontradas a partir dos dados obtidos por radiometria direta para os diferentes IVs, em função do parâmetro biofísico índice de área foliar (IAF), para a cultivar Mombaça, Marandú e para o conjunto de dados das duas cultivares.

Índice	Cultivar	Bandas	RMSE	NRMSE (%)	R^2
NDI	Mombaça	815; 760 $\frac{R_{815} - R_{760}}{R_{815} + R_{760}}$	1,80	0,27	0,22
	Marandú		1,30	0,42	0,49
	Total		1,53	0,34	0,30
TRBI	Mombaça	707; 713; 689 $\frac{R_{707}}{R_{713} + R_{689}}$	1,95	3,22	0,10
	Marandú		1,35	2,27	0,44
	Total		1,68	2,81	0,36
DLH	Mombaça	532; 547; 526 $R_{532} - 0,5(R_{547} + R_{526})$	1,71	0,40	0,32
	Marandú		1,43	0,30	0,31
	Total		1,58	0,35	0,33
NAOC	Mombaça	$1 - \frac{\int_{795}^{643} Ri * d\lambda}{R_{795} (795 - 643)}$	1,68	2,98	0,42
	Marandú		1,15	2,20	0,65
	Total		1,51	2,35	0,52

Na Figura 11 pode-se observar o gráfico do índice NAOC para estimação do IAF para a cultivar Mombaça. O modelo gerado foi do tipo exponencial, crescente, com um coeficiente de determinação de 0,42, um erro quadrático médio (RSME) de 1,7 e um p-value $\leq 1\%$. A combinação de bandas manteve-se igual as citadas pelo autor Delegido *et al.* (2010) e a formula utilizada foi a apresentada na equação 10. Dessa forma, o IAF, para a cultivar Mombaça, pode-se calcular através de radiometria direta em campo utilizando a equação 11:

$$NAOC = 1 - \frac{\int_{795}^{643} Ri * d\lambda}{R_{795} (795 - 643)} \quad (10)$$

$$IAF = 0,0225 * e^{10,013 * NAOC} \quad (11)$$

Figura 10. Gráfico de distribuição do índice de área foliar (IAF) em função do índice de vegetação NAOC para a cultivar Mombuca.

Na Figura 12 pode-se observar o gráfico do índice NAOC para estimação do IAF para a cultivar Marandú. O modelo gerado foi do tipo exponencial, crescente, com um coeficiente de determinação de 0,65, um erro quadrático médio (RSME) de 1,2 e um p-value $\leq 1\%$. O NAOC já foi definido na equação 10. Dessa forma, o IAF para a cultivar Marandú pode-se calcular através de radiometria direta em campo utilizando a equação 12;

$$\text{IAF} = 0,0183 * e^{10,369 * \text{NAOC}} \quad (12)$$

Delegido *et al.* (2011) criaram o índice denominado NAOC (curva de refletância da área normalizada). Este índice integra a curva de reflectância entre 643 e 795 nm, incluindo a região da borda vermelha. Sibanda *et al.* (2019) estudando avaliar a força das bandas da região da borda vermelha (Red-Edge) derivadas do instrumento multiespectral Sentinel-2 (ER) na estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e no mapeamento da capacidade de armazenamento de dossel (CSC) para aplicações hidrológicas em ecossistemas infestados de acácias, obtiveram modelos ótimos para estimar o IAF para mapear CSC que foram obtidos com base nas bandas centradas em 705 nm (Band 5), 740 nm (Band 6), 783 nm (Band 7) e 865 nm (Band 8a) do Sentinel-2. Ou seja, trabalharam na mesma região utilizada para determinar o IAF através do índice de NAOC.

Figura 11. Gráfico de distribuição do índice de área foliar (IAF) em função do índice de vegetação NAOC para a cultivar Marandú.

Na Figura 13 pode-se observar o gráfico do índice NAOC para estimação do IAF para as duas forrageiras em conjunto (Mombaça e Marandú). O modelo gerado foi do tipo exponencial, crescente, com um coeficiente de determinação de 0,52, um erro quadrático médio (RSME) de 1,5 e um p-value $\leq 1\%$. O NAOC já foi definido na equação 10. Dessa forma, o IAF para qualquer forrageira tropical poderia se calcular através de radiometria direta em campo utilizando a equação 13:

$$IAF = 0,0209 * e^{10,157 * NAOC} \quad (13)$$

Figura 12. Gráfico de distribuição do índice de área foliar (IAF) em função do índice de vegetação NAOC para o conjunto de dados (Mombaça e Marandú).

De forma geral, podemos afirmar que o parâmetro biofísico IAF foi o único de todos os estudados, que representou as duas cultivares de forrageiras por separado (Mombaça e Marandú) e para o conjunto de dados. O índice NAOC, demonstrou uma relação das bandas do vermelho, borda vermelha e infravermelho próximo para determinar o IAF.

3.4. Conclusões

Os resultados obtidos pelo presente trabalho mostraram ser possível uma predição dos parâmetros biofísicos por meio de espectroscopia *in situ*. Por sua vez, neste trabalho, seria necessária uma validação de dados. Mais pesquisas são necessárias para o correto entendimento dos fatores que influenciam a resposta espectral das pastagens tropicais em nível terrestre.

Os IVs avaliados que mais se destacaram para a predição do TFN utilizaram os comprimentos de onda: 477 nm da região do azul; 507 nm da região do verde; 520 nm da região do verde; 614 nm da região do laranja; 616 nm da região do laranja. O IV que mais se destacou foi o NDI e o TBI.

Para a predição da produtividade foram TBI e NAOC. Os mesmos utilizaram comprimentos de onda de: 424 nm na região do azul; 618 nm na região do vermelho; 627 nm na região do vermelho; e toda a região que varia entre 643 até 795 nm (vermelho-red edge-infravermelho próximo).

Para a predição de altura foram NDI, DLH e NAOC. Os mesmos utilizaram comprimentos de onda de: região que varia entre 643 até 795 nm (vermelho-red edge-infravermelho próximo); 773 nm na região do red-edge; 793 nm na região do infravermelho próximo; 804 nm na região do infravermelho próximo; 849 na região do infravermelho próximo; 863 na região do infravermelho próximo.

Os IVs avaliados que mais se destacaram para a predição de IAF utilizaram comprimentos de onda desde 643 até 795 nm (vermelho-red edge-infravermelho próximo). Nesse caso o índice que melhor se correlacionou foi NAOC.

De forma geral, podemos afirmar que para a cultivar Mombaça os melhores resultados se deram para os parâmetros teor foliar de nitrogênio e produtividade e para a cultivar Marandú foi a altura. Para o conjunto de dados o melhor parâmetro biofísico foi para o IAF. Os coeficientes de determinação indicam que o modelo pode explicar os valores observados no campo, ou seja, de 38 ao 65% da variável dependente (TFN, produtividade, IAF) consegue ser explicada.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa da doutoranda e os recursos para a realização do projeto. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por fomentar o projeto de pesquisa nº 2013/22435-9, na aquisição dos sensores utilizados nesse projeto.

REFERÊNCIAS

Abrahão, S. A., Assis, F. De, Pinto, D. C., & Queiroz, D. M. De. (2009). Revista Brasileira de Zootecnia Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia Vegetation spectral indices to discriminate nitrogen rates in tanzania grass, 3598.

- Allen, W. A., & Richardson, A. J. (1968). Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 1023–1028.
- Andrade, A. C., Miranda, D., Fonseca, D. a, Queiroz, D. S., Salgado, L. T., & Cecon, P. R. (2003). Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier). *Ciência Agrotecnica, edição esp*(November), 1643–1651.
- Arne, S., Appelgren, M. and, & Krekling, T. (1995). Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 41, 177–185.
- Asrar, G., Kanemasu, E. T., Jackson, R. D., & Pinter, P. J. (1985). Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 211–220. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90095-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90095-1)
- Barbosa, R. A., Júnior, N., Vilela, H. H., Silva, C., Pacheco, V., Euclides, B., ... Sousa, D. L. (2011). Morphogenic and structural characteristics of guinea grass pastures submitted to three frequencies and two defoliation severities Características morfogênicas e estruturais de pastos de capim-tanzânia submetidos a três freq. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 947–954.
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2–3), 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Boddey, R. M., MacEdo, R., Tarré, R. M., Ferreira, E., De Oliveira, O. C., De, C., ... Urquiaga, S. (2004). Nitrogen cycling in Brachiaria pastures: The key to understanding the process of pasture decline. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(2), 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.010>
- Bruno, A., Oliveira, B., Andrade, A. C., Magalhães, J. A., Rodrigues, H. N., Mehl, H. U., ... Santos, D. S. (2015). Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia ISSN: 1982-1263 Produtividade do capim-digitária (*Digitaria* spp .) sob diferentes doses de nitrogênio 1 Productivity of Digitaria grass in different doses of nitrogen, (1993), 70–75.
- Camino, C., González-dugo, V., Hernández, P., Sillero, J. C., & Zarco, P. J. (2018). Int J Appl Earth Obs Geoinformation Improved nitrogen retrievals with airborne-derived fluorescence and plant traits quantified from VNIR-SWIR hyperspectral imagery in the context of precision agriculture. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 70(February), 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.04.013>
- Canto, M. W. Do, Cecato, U., Almeida Júnior, J., Jobim, C. C., Agulhon, R. A., Gai, V. F., ... Queiroz, M. F. S. (2002). Produção Animal no Inverno em Capim-Tanzânia Diferido no Outono e Manejado em Diferentes Alturas de Pasto. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 31(4), 1624–1633. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982002000700004>
- Carnevali, R. A. (2003). Estado de São Paulo - Brasil Orientador: Prof. Dr. SILA CARNEIRO DA SILVA Estado de São Paulo - Brasil.
- Chapman, D. F. ., & Lemaire, G. (1993). *Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation*. (BAKER, M.J). Wellington: Grassland for our world.
- Clevers, J. G. P. W., & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>

- Colombo, R., Bellingeri, D., Fasolini, D., & Marino, C. M. (2003). Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 86(1), 120–131. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00094-4)
- Corrêa, L. D. A., & Santos, P. M. (2003). Manejo e utilização de plantas forrageiras dos gêneros Panicum, Brachiaria e Cynodon. *Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos 34*, 36p.
- Corsi, M. ., & Nussio, L. G. (1992). Manejo do capim-elefante: correção e adubação do solo. In: *SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS*, 87–115.
- Costa, K. A. P., Faquin, V., & Oliveira, I. P. (2010). Doses e fontes de nitrogênio na recuperação de pastagens do capim-marandu. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 62(1), 192–199. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352010000100026>
- Costa, N. de L., Magalhães, J. A., Townsend, C. R., & Paulino, V. T. (2004). Fisiologia e manejo de plantas forrageiras. *Documentos 85, Embrapa Rondônia*, 27p. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0532>
- Costa, N. de L., Townsend, C. R., Fogaça, F. H. dos S., Magalhães, J. A., Bendahan, A. B., & Santos, F. J. de S. (2016). Produtividade de forragem e morfogênese de Brachiaria brizantha cv. Marandu sob níveis de nitrogênio. *Pubvet*, 10(10), 731–735. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v10n10.731-735>
- Cunha, C. A. H. da. (2005). *Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em capim Tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e doses de nitrogênio*. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.11.2004.TDE-30112004-154918>
- Cunha, O. F. R., & Santos, Antônio Clementino dos; Araújo, Leandro Coelho de; Ferreira, E. M. (2010). PRODUTIVIDADE DO Panicum maximum (MOMBAÇA) EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE NITROGÊNIO. *Revista Da FZVA*, 17(1), 136–145.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., & Gholz, H. L. (1990). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology*, 7(1-2-3-4), 33–48. <https://doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.33>
- Dall’Olmo, G., Gitelson, A. A., & Rundquist, D. C. (2003). Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, 30(18), 8–11. <https://doi.org/10.1029/2003GL018065>
- Danelichen, V. H. D. M., Velasque, M. C. S., Musis, C. R. De, Machado, N. G., Nogueira, J. D. S., & Biudes, M. S. (2014). Estimativas De Índice De Área Foliar De Uma Pastagem Por Sensoriamento Remoto No Pantanal Mato-Grossense. *Ciência e Natura*, 36(3), 373–384. <https://doi.org/10.5902/2179460X13168>
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsi, F., & Cho, M. (2008). LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(4), 409–426. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2008.01.001>
- Dash, J., & Curran, P. J. (2007). Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). *Advances in Space Research*, 39(1), 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.034>
- De Alencar, C. A. B., Cóser, A. C., Martins, C. E., De Oliveira, R. A., Da Cunha, F. F., & Figueiredo, J. L. A. (2010). Altura de capins e cobertura do solo sob adubação nitrogenada, irrigação e pastejo nas estações do ano. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 32(1), 21–27. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.319>

- Delegido, J., Alonso, L., González, G., & Moreno, J. (2010). Estimating chlorophyll content of crops from hyperspectral data using a normalized area over reflectance curve (NAOC). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.003>
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., & Moreno, J. (2011). Evaluation of sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11(7), 7063–7081. <https://doi.org/10.3390/s110707063>
- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J. P., Alonso, L., & Moreno, J. (2013). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 46, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.12.001>
- Dias Filho, M. B. (2014). Diagnóstico das Pastagens no Brasil. *Embrapa Amazônia Oriental, Documentos*, 22. https://doi.org/10.1163/_q3_SIM_00374
- Diker, K., & Bausch, W. C. (2003). Potential use of nitrogen reflectance index to estimate plant parameters and yield of maize. *Biosystems Engineering*, 85(4), 437–447. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00097-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00097-7)
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Euclides, V. P. B., Valle, C. B., Macedo, M. C. M., Almeida, R. G., Montagner, D. B., & Barbosa, R. A. (2010). Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39, 151–168. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300018>
- Fagundes, J. L., Fonseca, D. M. Da, Mistura, C., Morais, R. V. De, Vitor, C. M. T., Gomide, J. A., ... Costa, L. T. Da. (2006). Características morfogênicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 35(1), 21–29. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000100003>
- Fagundes, J. L., Moreira, A. L., Freitas, A. W. de P., Henrichs, R., & Rocha, F. C. (2012). Forage production of Tifton 85 fertilized with nitrogen and subjected to continuous stocking. *Rev. Bras. Saúde Prod. Anim*, 13(2), 306–317.
- Fernandes, J. C. ., Buzetti, S. ., Dupas, E. ., Teixeira Filho, M. C. M. ., & Andreotti, M. . (2015). Sources and rates of nitrogen fertilizer used in Mombasa guineagrass in the Brazilian Cerrado region. *African Journal of Agricultural Research*, 10(10). <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.x>
- Fonseca, E. L., Rosa, L. M. G., & Fontana, D. C. (2002). Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(0100–204X), 365–371. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002000300018>.
- Foster, A. J., Kakani, V. G., Ge, J., Gregory, M., & Mosali, J. (2016). Discriminant analysis of nitrogen treatments in switchgrass and high biomass sorghum using leaf and canopy-scale reflectance spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 37(10), 2252–2279. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1171926>
- Foster, A. J., Kakani, V. G., & Mosali, J. (2017). Estimation of bioenergy crop yield and N status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. *Precision Agriculture*, 18(2), 192–209. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9455-8>

- Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G., & Milton, E. J. (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>
- Galindo, F. S., Buzetti, S., Filho, M. C. M. T., Dupas, E., & Ludkiewicz, M. G. Z. (2017). Application of different nitrogen doses to increase nitrogen efficiency in Mombasa guinegrass (*Panicum maximum* cv. mombasa) at dry and rainy seasons. *Australian Journal of Crop Science*, 11(12), 1657–1664. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.12.pne907>
- Galindo, F. S., Buzetti, S., Filho, M. C. M. T., Dupas, E., & Ludkiewicz, M. G. Z. (2018). Revista de agricultura neotropical. *Journal of Neotropical Agriculture*, 5(3), 1–9. Retrieved from <http://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/2132/2327>
- Garcez Neto, A. F., Nascimento Junior, D. do, Regazzi, A. J., Fonseca, D. M. da, Mosquim, P. R., & Gobbi, K. F. (2002). Respostas morfológicas e estruturais de *Panicum maximum* cv. Mombasa sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e alturas de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 31(5), 1890–1900. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982002000800004&lng=pt&tlng=pt
- Gil, P. T. De, Fontes, P. C. R., Cecon, P. R., & Ferreira, F. A. (2002). Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. *Horticultura Brasileira*, 20(1999), 611–615. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000300009>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Gower, J. F. R. (1980). Observations of in situ fluorescence of chlorophyll-a in Saanich Inlet. *Boundary-Layer Meteorol.*, 18, 235–245.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009). *Análise multivariada de dados*.
- Huete, A. ., Justice, C. ., & Leeuwen, V. W. . (1999). MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document. *Remote Sensing of Environment*, 3, 1–120. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.019>
- IBGE. (2017). a G R O P E C U Á R I O. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.*, 7(01036157), 1–180. <https://doi.org/01036157>
- IBM. (1997). SPSS Statistics Base.
- Jensen, J. R., Epiphany, J. C. N., Formaggio, A. R., Santos, A. R. dos, Rudorff, B. F. T., Almeida, C. M. de, & Galvão, L. S. (2009). *Sensoriamento remoto do ambiente uma perspectiva em recursos terrestres* (2nd ed.). Parêntese Editora.
- Kluge, R. A. L. (2004). Fisiologia vegetal: apontamentos de aulas teóricas de fotossíntese.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Eschweizerbartxxx Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>

- Lemaire, G. ., Hogdson, J. ., & Chabbi, A. (2011). *Grassland productivity and ecosystem services*. Cabi, Wallingford. <https://doi.org/10.1079/9781845938093.0000>
- LIU, W. T. H. (2015). *Aplicações de sensoriamento remoto* (2nd ed.). Campo Grande: Oficina de Textos.
- Loozen, Y., Karssenbergh, D., de Jong, S. M., Wang, S., van Dijk, J., Wassen, M. J., & Rebel, K. T. (2019). Exploring the use of vegetation indices to sense canopy nitrogen to phosphorous ratio in grasses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75(August 2018), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.012>
- Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Main-korn, M., & Bieniarz, J. (2016). Sentinel-2 Sen2Cor : L2A processor for users, 2016(1).
- Lourenço, R. W., & Landim, P. M. B. (2004). Estudo Da Variabilidade Do " Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada / Ndvi " Utilizando Krigagem Indicativa Study on the Variability of " Normalized Difference Vegetation Index / Ndvi " By Indicative Kriging. *Holos Environment*, 4, 38–55.
- Lyra, W. da S., Silva, E. C. da, Araújo, M. C. U. de, Fragoso, W. D., & Veras, G. (2010). Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais. *Química Nova*, 33(7), 1594–1597. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422010000700030&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt
- Malavolta, E., Vitti, G. C., & de Oliveira, S. A. (1988). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações* (Third edit). Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=Lu9EAAAAYAAJ>
- Martha, G. B., Alves, E., & Contini, E. (2012). Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agricultural Systems*, 110, 173–177. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.001>
- Martins, R. L., Junior, P. R., Fernandes, A. C., Grise, M. M., & Muraro, G. B. (2006). brizantha cv MARANDU E Panicum maximum cv MOMBAÇA , EM RESPOSTA A DIFERENTES DOSES DE NUTRIENTES , EM UMUARAMA-PR Marandu and Panicum maximum cv Mombaça , in Reply the Doses of Nutrients , in Umuarama-PR, 59–64.
- McManus, C., Barcellos, J. O. J., Formenton, B. K., Hermuche, P. M., De Carvalho, O. A., Guimarães, R., ... Neto, J. B. (2016). Dynamics of cattle production in Brazil. *PLoS ONE*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147138>
- Mehl, H. U., Henrique, B., Rodrigues, N., Mourão, E., & Costa, D. L. (2013). No Title.
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106(1), 135–141.
- Molin, J. P., Amaral, L. R. ., & Colaço, A. (2015). *Agricultura de precisão*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Monteiro, F. A. (2013). Uso de corretivos e fertilizantes. *Forragicultura: Ciência, Tecnologia e Gestão de Recursos Forrageiros. Jaboticabal: Maria de Lourdes Brandel–ME.*, 275–290.
- Morais, L. F. de;, Carvalho, C. A. B. de;, Anjos, A. N. A. ., Viegas, C. R., & Silva, P. H. F. da. (2018). Resumo Avanços na avaliação de pastagens cultivadas com forrageiras tropicais no Brasil : Uma Revisão Abstract Advances in the evaluation of pastures cultivated with tropical forages in Brazil : A Review Resúmen Avances en la evaluación de pastos cultivad, (June), 125–136. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V11.N2.13>
- Moreira, M. A. (2005). *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. UFV.

- Motomiya, A. V. de A., Molin, J. P., Motomiya, W. R., & Biscaro, G. A. (2012). Diagnose nutricional com o uso de sensor óptico ativo em algodoeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(11), 1159–1165. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100003>
- Mutanga, O., Skidmore, A. K., & Van Wieren, S. (2003). Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(4), 263–272. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00158-2)
- Nascimento Junior, D. D., Silva, S. C. da, & Adese, B. (2004). *Panicum maximum*,. *System*, 19–22.
- Novo, E. M. L. . (2010). *Sensoriamento Remoto: Principios e aplicações*. (E. Blücher, Ed.) (4ed ed.). São Paulo.
- Oliveira, A., Andrade, A., Magalhães, J., Rodrigues, B., Mehl, H., Santos, F., ... Costa, N. (2015). Produtividade do capim-digitária (*Digitaria* spp.) sob diferentes doses de nitrogênio. *PubVet*, 9(2), 70–75. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v9n2.70-75>
- Pacheco-Labrador, J., González-Cascón, R., Pilar Martín, M., & Riaño, D. (2014). Understanding the optical responses of leaf nitrogen in mediterranean holm oak (*Quercus ilex*) using field spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26(1), 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.013>
- Parsons, A. J., & Chapman, D. F. (2000). The principles of pasture growth and utilization. In A. Hopkins & W. Holmes (Eds.), *Grass: its production and utilization* (3rd ed, pp. 31–89). Oxford: Blackwell Science for the British Grassland Society.
- Pellissier, P. A., Ollinger, S. V., Lepine, L. C., Palace, M. W., & McDowell, W. H. (2015). Remote sensing of foliar nitrogen in cultivated grasslands of human dominated landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 167, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.009>
- Pereira, V. V., da Fonseca, D. M., Martuscello, J. A., dos Braz, T. G. S., Santos, M. V., & Cecon, P. R. (2011). Características morfogênicas e estruturais de capim-mombaça em três densidades de cultivo adubado com nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40(12), 2681–2689. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011001200010>
- Pestana, M. H., & Gageiro, J. N. (2005). *Análise de dados para ciências sociais: a complementaridade do SPSS*. (4th ed.). Lisboa, Silabo.
- Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. de C., Bosi, C., Crippa, P. H., Santos, P. M., & Nardachione, E. C. (2019). Assessment of Piatã palisadegrass forage mass in integrated livestock production systems using a proximal canopy reflectance sensor. *European Journal of Agronomy*, 103(June 2018), 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.005>
- Ponzoni, F. J., Shimabukuro, Y. E., & Kuplich, T. M. (2012). *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. Oficina de Textos. Retrieved from <http://www.lojaofitexto.com.br/sensoriamento-remoto-da-vegetacao-2-ed-/p>
- Primavesi, A. C., Primavesi, O., Corrêa, L. D. A., Cantarella, H., Gabriel, A., Freitas, A. R. De, & Vivaldi, L. J. (2004). Adubação Nitrogenada em Capim- Coastcross : Efeitos na Extração de Nutrientes e Recuperação Aparente do Nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 33(1), 68–78.
- Queiroz, D.M.; Dias, G.P.; Mantovani, E. C. . (2000). *Agricultura de Precisão na Produção de Grãos*. . Viçosa, MG: Agricultura de precisão. : Universidade Federal de Viçosa.

- Region, A. J., Grande, R., & Sul, D. (2015). Determinação de Teores de Nitrogênio Foliar em Azevém (*Lolium multiflorum* Lam .) Nativo na Região do Alto Jacuí , Rio Grande Do Sul.
- Ren, H., & Zhou, G. (2019). Estimating green biomass ratio with remote sensing in arid grasslands. *Ecological Indicators*, 98(79), 568–574. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.043>
- Richardson, A. J., & Everitt, J. H. (1992). Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity. *Geocarto International*, 7(1), 63–69. <https://doi.org/10.1080/10106049209354353>
- Rivera, J. P., Verrelst, J., Delegido, J., Veroustraete, F., & Moreno, J. (2014). On the semi-automatic retrieval of biophysical parameters based on spectral index optimization. *Remote Sensing*, 6(6), 4927–4951. <https://doi.org/10.3390/rs6064927>
- Rosa, R. (2009). *Introdução ao sensoriamento remoto*. (EDUFU, Ed.) (7 ed.). Uberlândia.
- Rosado, T. L., Gontijo, I., Almeida, M. S. de, Neto, A. C., & Simon, C. da P. (2016). PRODUCTION AND TILLERING OF MOMBAÇA GRASS WITH DIFFERENT SOURCES AND LEVELS OF APPLIED NITROGEN. *ENGENHARIA NA AGRICULTURA*, 24(2), 139–147.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *NASA SP-351 I* (pp. 309–317). Washington, DC. Washington.: Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.
- Salimon, C., & Anderson, L. (2017). How strong is the relationship between rainfall variability and Caatinga productivity? a case study under a changing climate. *Annals of the Brazilian Academy of Science*, In Press, 90, In Press. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170143>
- Santos, A. G. T. ., & Viera, A. . (2011). Alturas de pastejo recomendadas para as principais forrageiras considerando 95% de interceptação luminosa, 2(Cadernos de Pós-Graduação da FAZU).
- Santos, H. G. ., Jacomine, P. K. T. ., Anjos, L. H. C. ., Oliveira, V. Á. D. ., Lumberreras, J. F. ., Coelho, M. R. ., ... Oliveira, J. B. de. . (2013). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (3rd ed.). Brasília: Embrapa.
- Schlemmer, M., Gitelson, A., Schepers, J., Ferguson, R., Peng, Y., Shanahana, J., & Rundquist, D. (2013). Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25(1), 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003>
- Sibanda, M., Mutanga, O., Dube, T., Vundla, T. S., & Mafongoya, P. L. (2019). Estimating LAI and mapping canopy storage capacity for hydrological applications in wattle infested ecosystems using Sentinel-2 MSI derived red edge bands. *GIScience & Remote Sensing*, 56(1), 68–86. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1492213>
- Sila Carneiro da Silva; Adriana Amaral de Oliveira Bueno; Greg, M. C. U. F. O. B. J. H. C. M., & Moraes, C. A. J. P. G. de. (2009). SWARD STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND HERBAGE ACCUMULATION OF *Panicum maximum* cv. MOMBAÇA SUBJECTED TO ROTATIONAL STOCKING MANagements. *Sciencia Agriculture*, 66(1), 8–19. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000100002>
- Silva, S. C. da; (2004). Fundamentos para o manejo do pastejo de plantas forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum*. In *Simpósio Manejo Estratégico Da Pastagem* (pp. 347–386). Viçosa: Anais: UFV, DZO. Retrieved from <http://forragicultura.com.br/arquivos/FundamentosparamanejoBrachiariaePanicum.pdf>

- Simões, C. R., Rossiello, R. O. P., Graciosa, M. G., Machado, M. L., & Silva, C. F. da. (2015). Imagens multiespectrais para avaliação de índice de área foliar e massa seca do capim “Tifton 85”, sob adubação nitrogenada. *Ciência Rural*, 45(4), 697–703.
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Snee, R. (1977). Validation and regression models: methods and examples. *Technometrics*, 19, 415–428.
- Stroppiana, D., Boschetti, M., Brivio, P. A., & Bocchi, S. (2009). Plant nitrogen concentration in paddy rice from field canopy hyperspectral radiometry. *Field Crops Research*, 111(1–2), 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.11.004>
- Sudduth, K. A.; Drummond, S. T.; Kitchen, N. R. (2015). Operational characteristics of commercial crop canopy sensors for nitrogen application in maize. In *Precision agriculture* (v. 15, pp. 51–58).
- Thenkabail, P. S. ., Smith, R. B. ., & De-Pauw, E. . (2000). Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71, 158–182.
- Tian, Y. C., Yao, X., Yang, J., Cao, W. X., Hannaway, D. B., & Zhu, Y. (2011). Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. *Field Crops Research*, 120(2), 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.002>
- Tong, X., Duan, L., Liu, T., & Singh, V. P. (2018). Combined use of in situ hyperspectral vegetation indices for estimating pasture biomass at peak productive period for harvest decision. *Precision Agriculture*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9592-3>
- Velho, P. (2016). ANAIS DO II SIMPÓSIO MANEJO SUSTENTÁVEL DAS PASTAGENS DE RONDÔNIA. *II SIMPÓSIO*.
- Verrelst, J., Romijn, E., & Kooistra, L. (2012). Mapping vegetation density in a heterogeneous river floodplain ecosystem using pointable CHRIS/PROBA data. *Remote Sensing*, 4(9), 2866–2889. <https://doi.org/10.3390/rs4092866>
- Wang, J., Wang, T., Skidmore, A. K., Shi, T., & Wu, G. (2015). Evaluating different methods for grass nutrient estimation from canopy hyperspectral reflectance. *Remote Sensing*, 7(5), 5901–5917. <https://doi.org/10.3390/rs70505901>
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastiaanssen, W. (2002). Manual for Surface Energy Balance Algorithms for Land, 1–98.
- Werner, J. C. (1986). *Adubacao de pastagens*. (Boletim té). Nova Odessa: instituto de Zootecnia.
- Xavier, A. C., Rudorff, B. F. T., Moreira, M. A., Alvarenga, B. S., de Freitas, J. G., & Salomon, M. V. (2006). HYPERSPECTRAL FIELD REFLECTANCE MEASUREMENTS TO ESTIMATE WHEAT GRAIN YIELD AND PLANT HEIGHT. *Science Agricultural*, 63, 130–138. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000200004>
- Xue, L., & Yang, L. (2009). Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.06.002>

- Zanchi, F., Waterloo, M. J., G Aguiar, L. J., von RANDOW, C., Kruijt, B., Luiz CARDOSO, F., & Manzi, A. O. (2009). Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil, 335(392), 335–348. Retrieved from <http://dare.ubvu.vu.nl/bitstream/handle/1871/32404/228524.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Zhang, B., Zhang, L., Xie, D., Yin, X., Liu, C., & Liu, G. (2016). Application of synthetic NDVI time series blended from landsat and MODIS data for grassland biomass estimation. *Remote Sensing*, 8(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs8010010>

4. ESTIMATIVA DE PARAMETROS BIOFÍSICOS DE FORRAGEIRAS TROPICAIS A PARTIR DO SATÉLITE SENTINEL-2

Amparo Cisneros Garcia¹, Peterson Ricardo Fiorio¹, Jesus Delegido Gomez², Patricia Menezes Santos³, Gustavo Bayma³, Sandra Furlan Nogueira³

¹Departamento Engenharia de Biosistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil

²Laboratori de Processament d'Imatges, Universitat de Valencia, Valencia, España

³Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Resumo

O principal nutriente para a manutenção da produtividade em forrageiras é o nitrogênio (N). Diversos autores asseguram que o principal efeito do N é aumentar a produção de matéria seca (MS) e, consequentemente, capacidade de suporte do pasto, medida em unidades animais por hectare (UA/ha). Nos últimos anos, o uso de técnicas de sensoriamento remoto tem se expandido nas áreas de ciências agrárias, mostrando-se uma ferramenta muito útil. O uso de Índices de vegetação (IVs) é imprescindível para o monitoramento da cultura durante seu desenvolvimento na lavoura e para a criação de modelos de estimativa de biomassa. Duas das forrageiras mais utilizadas no Brasil são as cultivares Mombaça e Marandú, por tanto, o objetivo deste trabalho foi utilizar diferentes IVs, obtidos por meio de sensor passivo e simulados para o satélite Sentinel-2, para estimar alguns parâmetros biofísicos, tais como: a produtividade, o teor foliar de nitrogênio (TFN), a altura e o Índice de Área Foliar (IAF), das espécies de forrageiras tropicais submetidas a diferentes doses de N na região de São Paulo. Os dados de refletividade medidos em campo foram transformados para as bandas do satélite Sentinel-2. Posteriormente, foram testados, em áreas com plantio de *Brachiaria Brizantha* cv. Piatã e *Brachiaria Decumbens*, com os diferentes IVs (NDVI, TRBI, DLH, TBDO e NAOC), para as quatro variáveis estudadas ao longo do experimento (TFN, produtividade, altura e índice de área foliar - IAF). Diante dos resultados gerados pelos mapas, três das variáveis estudadas apresentam correlações, TFN, produtividade e IAF. Em situações onde a pastagem recebe nitrogênio, o TFN aumenta e a produtividade e o IAF. O TFN obteve a melhor correlação para o índice TBI com um R^2 de 0,38. Para o parâmetro produtividade o melhor índice encontrado foi o DO com um R^2 de 0,54 e para o IAF o melhor índice se correspondeu com o NDI com um R^2 de 0,54.

Palavras-chave: Mombaça; Marandú; Índices de vegetação; Parâmetros biofísicos

Abstract

The main nutrient for maintaining productivity in forages is nitrogen (N). Several authors assert that the main effect of N is to increase dry matter (DM) and, consequently, grass support capacity, measured in animal units per hectare (UA / ha). In recent years, the use of remote sensing techniques has expanded in the areas of agricultural science, proving to be a very useful tool. The use of vegetation indices (IVs) is essential for the monitoring of the crop during its development in the field and for the creation of biomass estimation models. The objective of this work was to use different IVs, obtained through a passive sensor and simulated for the Sentinel-2 satellite, to estimate some biophysical parameters such as: productivity, foliar nitrogen content (TFN), height and leaf area index (LAI) of tropical forage species submitted to different N rates in the region of. The field-measured reflectivity data were transformed to the Sentinel-2 satellite bands. Subsequently, were tested in areas with planting of *Brachiaria Brizantha* cv. Piatã and *Brachiaria Brizantha Decumbens* (NDVI, TRBI, DLH, TBDO and NAOC), for the four variables studied during the experiment (TFN,

productivity, height and leaf area index - LAI). Considering the results generated by the maps, three of the studied variables present correlations, TFN, productivity and LAI. In situations where pasture receives nitrogen, TFN increases and productivity and LAI. The TFN obtained the best correlation for the TBI index with an R^2 of 0,38. For the productivity parameter the best index found was the DO with an R^2 of 0,54 and for the LAI the best index corresponded with the NDI with an R^2 of 0,54.

Keywords: Mombaça; Marandú; Vegetation index; Biophysical parameters

4.1. Introdução

O aumento na demanda por alimentos e a pressão pelo uso da terra tem impulsionado mudanças na pecuária brasileira. No período de 1950 a 2006, a produção de carne bovina aumentou cerca de seis vezes, tornando o país um dos maiores produtores mundiais (Martha *et al.*, 2012). Até a década de 70, a expansão da fronteira agrícola foi o principal fator de aumento da produção de carne bovina do país (Martha *et al.*, 2012). A partir de 1975, no entanto, o aumento de produção passou a ser explicado principalmente pelos aumentos de produtividade, que refletiram aumentos na taxa de lotação animal das pastagens e no ganho de peso individual dos bovinos, decorrentes da adoção de tecnologias pelos produtores (Martha *et al.*, 2012). Segundo De Alencar *et al.* (2010) as principais espécies utilizadas pelo seu elevado potencial produtivo e pela sua qualidade são as cultivares dos gêneros *Pennisetum*, *Cynodon*, *Panicum* e *Urochloa*. As gramíneas do gênero *Urochloa*, assim como as *Panicum*, estão entre as forrageiras mais utilizadas em sistema de produção animal no Brasil (Silva, 2004).

A fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes interferem diretamente no crescimento das plantas e na produtividade das pastagens, sendo que a reposição insuficiente de nutrientes é apontada como uma das causas de degradação de pastagens no Brasil (Boddey *et al.*, 2004). Alguns estudos mostram que o principal nutriente para a manutenção da produtividade em forrageiras é o nitrogênio (N) (Werner, 1986). Corsi e Nussio (1992) asseguram que o principal efeito do N é aumentar a produção de matéria seca (MS) e, consequentemente, capacidade de suporte do pasto (UA/ha). Outros autores também têm demonstrado a influencia positiva do N sob o aumento da matéria seca (MS), relação lamina/colmo, teores de proteína bruta e índice de área foliar para diferentes tipos de forrageiras tropicais (Andrade *et al.*, 2003; Cunha, 2005; Cunha *et al.*, 2010; De Alencar *et al.*, 2010; Fagundes *et al.*, 2012; Bruno *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2015; Region *et al.*, 2015; Foster *et al.*, 2016).

Segundo Zhang *et al.* (2016) informações de dinâmicas de crescimento da biomassa de forragem em pastagens são de grande importância para o aprimoramento da sua capacidade produtiva, para o estabelecimento de metodologias de manejo do pastejo e para fins ecológicos. Desta forma, o estudo de métodos que caracterizem o ambiente pastoril é extremamente importante, pois possibilitam aperfeiçoamento da eficiência de utilização da forragem, oferecendo respostas mais confiáveis em relação ao animal, e proporcionam um retorno financeiro ao produtor.

Segundo Morais *et al.* (2018), a estimativa da massa de forragem em pastagens pode ser realizada através de métodos diretos e indiretos, porém os métodos indiretos apresentam vantagens em relação aos métodos diretos, visto que não necessitam de corte da biomassa de forragem amostrada e permitem a avaliação

em grandes áreas. Assim, as técnicas de sensoriamento remoto (SR) apresentam-se com uma ferramenta viável para criar metodologias de manejo das forrageiras tropicais, permitindo estimar a produtividade em grandes áreas de pastagem sem necessidade de realizar coleta de amostras *in situ*. Salimon *et al.* (2017) afirmam que a utilização de SR auxilia a medição de biomassa de forragem através de um contraste entre diferentes comprimentos de onda e os demais alvos, além de apresentar um custo baixo e conseguir abranger grandes áreas em curto espaço de tempo. Medições remotas de refletância espectral em dossel podem fornecer um método rápido e não destrutivo para avaliação de parâmetros biofísicos como índice de área foliar (IAF), biomassa, altura ou conteúdo de nitrogênio na planta.

Diferentes formas de uso das leituras dos sensores vêm sendo propostas. Sudduth *et al.* (2015) afirmam que muitos dos algoritmos utilizados pelos sensores, empregam como dados de entrada a informação espectral do dossel de plantas em formato de índices de vegetação (IV's), que geralmente envolvem a região do visível (VIS) e do infravermelho próximo (Molin *et al.*, 2015), regiões de 370 a 699 nm e de 780 a 1.500 nm, respectivamente. O potencial dos IVs para determinação das variáveis biofísicas tem sido amplamente demonstrado em numerosos estudos: eles são intuitivos, simples e rápidos (Colombo *et al.*, 2003; Gitelson *et al.*, 2005; Clevers *et al.*, 2013). Segundo Gnyp *et al.* (2015), o uso de IVs é imprescindível para o monitoramento da cultura durante seu desenvolvimento na lavoura e para a criação de modelos de estimativa de biomassa.

Estudos com índices de vegetação têm surgido nos últimos anos, procurando identificar as melhores bandas espectrais para diferentes parâmetros biofísicos. Segundo Baret (1991) a refletância do dossel depende de uma interação complexa de vários fatores internos e externos que podem variar significativamente no tempo e no espaço e também de um tipo de cultura para outro. O autor também relata que nenhuma relação existente é universal entre a variável dossel e uma assinatura espectral. Consequentemente, essas relações empíricas simples serão específicas de local, tempo e cultura e, portanto, não diretamente aplicáveis para uso operacional em grande escala (Baret *et al.*, 1991; Colombo *et al.*, 2003). Delegido *et al.* (2010) encontraram um novo índice chamado NAOC (Normalized area over reflectance curve) com base no cálculo da área sob a curva de refletância no intervalo entre o vermelho e o infravermelho próximo (NIR), dividido pelo máximo valor da refletância. Dessa forma, ofereceu um método simples para estimar a clorofila das folhas a partir de SR, sem a necessidade de medições adicionais.

No entanto, um problema fundamental da abordagem dos IVs, para estimação de parâmetros biofísicos, é sua falta de singularidade para cada cultivo. Tian *et al.* (2011) estudaram como determinar o conteúdo de nitrogênio no arroz e demonstraram que alguns índices publicados apresentaram boas correlações. Porém, esse estudo demonstrou que é possível melhorar os resultados através da utilização de novos índices de três bandas e com bandas específicas para essa cultura. Esses novos índices ainda precisariam ser testados com mais sensores remotos baseados no solo e verificados amplamente em outros locais.

O N interfere diretamente no teor de clorofila e, consequentemente, nas características espectrais da mesma e nas variáveis que compõem a produtividade final. Espera-se que as leituras da resposta espectral das pastagens sejam diretamente influenciadas pela quantidade de N disponibilizado e absorvido pela planta, podendo ser observadas suas diferenças no nível terrestre e orbital.

Assim, o objetivo deste trabalho foi utilizar diferentes IVs, obtidos por meio de sensor hiperespectral passivo, simulando os resultados para o satélite Sentinel-2, para estimar alguns parâmetros biofísicos, tais como:

a produtividade, o teor foliar de nitrogênio (TFN), a altura e IAF, de forrageiras tropicais submetidas a diferentes doses de N na região de São Paulo.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Descrição do tratamento experimental e obtenção dos dados de campo

O experimento foi realizado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em Piracicaba, São Paulo, com latitude 22°42'15" S, longitude 47°37'23" O e altitude 546 m. O solo é classificado como Nitossolo Vermelho eutroférico latossólico (Santos *et al.*, 2013). O clima da região é do tipo subtropical úmido (Cwa), segundo a classificação de Köppen-Geiger, com verão quente e inverno seco, com temperatura média inferior a 18 °C no mês mais frio e superior a 22 °C no mês mais quente (Kottek *et al.*, 2006). As parcelas foram semeadas a lanço, sendo o capim *Panicum maximum* cv. Mombaça semeado no início de fevereiro de 2016 e o *Urochloa brizantha* cv. Marandú em abril de 2016. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, totalizando dois blocos, cada um composto por quatro tratamentos de nitrogênio (N) e duas repetições por tratamento. Os tratamentos estão descritos conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos experimentais.

Parcelas	Doses de N (kg/ha/ciclo)	Nomenclatura Utilizada	Total aplicado (kg/ha/ano)	Descrição
Mombaça	0	M0	0	Controle
	25	M1	200	Dose baixa
	50	M2	400	Dose média
	75	M3	600	Dose alta
Marandú	0	B0	0	Controle
	25	B1	175	Dose baixa
	50	B2	350	Dose média
	75	B3	525	Dose alta

A área experimental foi dividida em 32 parcelas, 16 para a cultivar Mombaça e 16 para Marandú. Cada parcela possuía uma área de 20 m². Para coleta dos dados hiperespectrais do dossel de plantas foi utilizado o sensor *HandHeld 2Spectroradiometer*. Este equipamento se caracteriza por ser um sensor hiperespectral passivo, que trabalha em comprimentos de onda que compreendem o espectro visível e infravermelho próximo (325 nm a 1075 nm), com uma precisão de ± 1 nm e uma resolução espectral de 3 nm. Foram coletados 10 pontos para cada tratamento e repetição, totalizando 160 pontos para cada uma das forrageiras. No local foi instalado um sistema de irrigação por aspersão, a fim de controlar a umidade do solo e não comprometer o cultivo ao longo do ciclo de estudo. Para obter diferenças estruturais dentro do dossel e respeitar o momento ideal de colheita, foram adotados cortes fixos de 21 dias para a cultivar Mombaça e de 28 dias para a cultivar Marandú. Para a padronização dos cortes seguiu-se a metodologia proposta por Silva (2004) que após a compilação de diferentes dados e pesquisas, determinou alturas de resíduo de 30 e 15 cm para *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Urochloa brizantha* cv. Marandú respectivamente. A coleta de dados para a cultivar Mombaça começou em

outubro de 2016, porém não foram realizadas leituras espectrais no período de dezembro de 2016, em função de fatores climáticos desfavoráveis. O experimento foi finalizado no mês de abril de 2017. Para a cultivar Marandú o experimento de campo começou em outubro de 2016, porém não foram realizadas leituras espectrais no mês de janeiro de 2017, em função da ocorrência de chuvas durante o ciclo. O experimento foi finalizado no meio de maio de 2017. As adubações foram realizadas com ureia, contendo uma concentração de 46% de N. Foram avaliados neste experimento, dados hiperespectrais de dossel, produtividade, altura (cm) e teor foliar de nitrogênio, ao final de cada ciclo de cultivo.

Para obter a produtividade foi construído uma moldura quadrada de 0,7 m² e lançada aleatoriamente dentro de cada parcela. Posteriormente, a massa coletada dentro da moldura foi pesada. Após a pesagem da massa total retirou-se uma subamostra de aproximadamente 200 g/parcela de massa verde, para a separação botânica, subdividida em folha, bainha+colmo e material morto. Em seguida o material vegetativo foi encaminhado à estufa de ventilação forçada a 65°C por 72 horas para a determinação da porcentagem de matéria seca (% MS). Após este procedimento foi possível estimar a % MS das frações nesta área e, conseqüentemente, estimar os componentes produtivos (kg ha⁻¹) da produtividade total de forragem.

Para a obtenção dos dados de teor foliar de nitrogênio foram coletadas oito folhas por cada tratamento e repetição, ao longo das sete coletas realizadas. No campo eram coletadas as folhas diagnósticas, que correspondem as mais novas, totalmente desenvolvidas e com a lígula presente. No laboratório as folhas foram primeiramente lavadas em água corrente. Após a lavagem foram alocadas em saco de papel para secar em estufa com ventilação forçada, a 65°C, até atingir peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas para a determinação dos teores de nitrogênio. As análises químicas são determinadas nos extratos obtidos pela digestão sulfúrica por meio do método semi-micro Kjeldahl (Malavolta *et al.*, 1988).

Para a estimação do IAF foi coletada uma amostra de área conhecida (0,25 m²) e com auxílio de um integrador modelo LI-3100C (Li-Cor®), estimou-se a área foliar. O IAF, nesse caso, foi obtido multiplicando-se a massa total coletada em campo pela área foliar estimada pelo integrador e dividido pela área conhecida (0,25 m²).

4.2.2. Obtenção de dados orbitais derivados do satélite Sentinel -2

Sentinel-2 é uma missão de observação da terra desenvolvida pela ESA (European Space Agency) dentro do programa Copernicus. O satélite gera imagens de alta resolução superespectral em órbita e apoia o monitoramento das mudanças na vegetação dentro dos diferentes estágios de crescimento, por sua ampla largura de faixa e alto tempo de revisitação (10 dias no equador com um satélite e 5 dias com 2 satélites sob condições sem nuvens que resultam em 2 a 3 dias em latitudes médias). Cada satélite Sentinel-2 possui um instrumento / sensor Multiespectral Imager (MSI) com uma faixa de 290 km. Proporciona um conjunto versátil de 13 bandas espectrais desde o visível, infravermelho próximo até o infravermelho de ondas curtas, ou seja, de 443 nm a 2190 nm, apresentando quatro bandas a 10 m (bandas VIS e NIR), seis bandas a 20 m (red-edge e SWIR) e três bandas a 60 m (correção atmosférica) de resolução espacial. Em comparação com os últimos sensores, o Sentinel-2 incorpora três novas bandas espectrais na região da borda vermelha (red-edge), que são centradas em 705, 740 e 783 nm, que fornecem informações importantes sobre o estado da vegetação (Drusch *et al.*, 2012). Uma visão geral das configurações de banda é dada na Tabela 2.

Tabela 2. Bandas espectrais do Sentinel-2.

Numero de banda	Nome da banda	Comprimento de onda central (nm)	Largura de banda (nm)	Resolução espacial (m)
1	Coastal aerosol	443	27	60
2	Blue	490	98	10
3	Green	560	45	10
4	Red	665	38	10
5	Vegetation red-edge	705	19	20
6	Vegetation red-edge	740	18	20
7	Vegetation red-edge	783	28	20
8	NIR	842	145	10
8a	Vegetation red-edge	865	33	20
9	Water vapour	945	26	60
10	SWIR-cirrus	1380	75	60
11	SWIR	1610	143	20
12	SWIR	2190	242	20

4.2.3. Analise estatística

4.2.3.1. ARTMO

O Operador de Modelos de Transferência Radiativa Automatizada (ARTMO) é um pacote de software científico que consiste em Modelos de transferência radiativa (RTMs), como por exemplo PROSAIL, e várias caixas de ferramentas de estimativa que permitem o desenvolvimento e otimização de algoritmos de estimativa para converter imagens ópticas em mapas que mostram propriedades da vegetação (Verrelst *et al.*, 2012). Primeiramente, e após a coleta dos dados hiperespectrais, foi utilizado o software ARTMO para transformar o espectro coletado em campo (de 400 a 920 nm) e citado no artigo 2, para as bandas do satélite Sentinel-2 que se situam desde a banda 1 até a banda 8a (Tabela 2). O módulo utilizado para realizar essa transformação foi “Spectral Resample” que permite ler arquivos de texto com espectros completos e transformar em diferentes sensores (Landsat, SPOT, MERIS, Sentinel, etc) que podem ser escolhidos conforme definido pelo módulo Sensor. Os dados selecionados foram então reamostrados de acordo com as configurações de banda do sensor escolhido (Sentinel-2).

Segundo Rivera *et al.* (2014) a caixa de ferramentas de avaliação de índices desenvolvida para o software ARTMO é utilizada para calibrar e validar as formulas genéricas, fornecendo todas as combinações de bandas que para o estudo realizado abrange desde a região do visível (VIS) até o NIR (400-920 nm). O método utilizado para a seleção de bandas foi de validação cruzada com a técnica *k*-fold para garantir resultados mais robustos (Snee, 1977). Este método divide os dados disponíveis em *k*-subconjuntos. Destes *k*-subconjuntos de dados, os sub-conjuntos de dados *k*-1 são selecionados como um conjunto de dados de calibração e um único sub-conjunto de dados *k* é usado para a validação do modelo. O processo de validação cruzada é então repetido *k* vezes, com cada um dos *k* sub-conjuntos de dados usados como dataset de validação. Assim, todos os dados são utilizados para calibração e validação. Aqui, usamos um procedimento de validação cruzada de 4 vezes (*k* = 4). Após esse processo, o software fornece a possibilidade de apresentar a quantidade de dados que o usuário

precisar e os resultados estatísticos (R , R^2 , NSE, RMSE, NRMSE), bandas espectrais e equações, tanto para os dados de validação quanto os de calibração. Nesse estudo foram escolhidos os primeiros 50 resultados em função dos dados de validação e dos melhores coeficientes de determinação (R^2) encontrados entre os diferentes índices de vegetação testados e as variáveis estudadas. Essa metodologia aplicou-se primeiramente para as duas cultivares de forrageira separadamente (Mombaça e Marandú). Posteriormente foi realizado o estudo do conjunto de dados (Mombaça e Marandú) para gerar índices de vegetação que pudessem ser aplicados para forrageiras tropicais em geral. Dos primeiros 50 resultados fornecidos pelo software ARTMO, foram selecionados os que dentro de um ponto de vista físico e estatístico (coeficiente de correlação) se correlacionaram melhor com cada uma das variáveis estudadas.

4.2.3.2. Índices de vegetação

Com base nos índices estabelecidos para a obtenção de parâmetros biofísicos na literatura, uma série de índices de vegetação (Tabela 3) foram introduzidos na caixa de ferramentas de avaliação de índices acompanhada das variáveis estudadas ao longo do experimento (TFN, produtividade, altura e IAF). Os IVs inseridos no ARTMO foram uma série de índices definidos para a obtenção de diferentes parâmetros biofísicos, as fórmulas foram introduzidas de forma genérica, isto é, sem especificar as bandas espectrais definidas pelos autores originais (Tabela 3). O único índice que ao se testar manteve-se igual ao índice original descrito pelo autor foi o desenvolvido por Delegido *et al.* (2010). Esse índice é utilizado para a estimação do conteúdo de clorofila e está destacado na Tabela 3 com uma cor cinza. Para o cálculo do mesmo, o autor utiliza uma função matemática do tipo integral que se ajusta a uma curva espectral na região do vermelho e do red-edge. Como o software ARTMO não consegue trabalhar com funções desse tipo manteve-se a fórmula original descrita pelo autor com as bandas utilizadas para o mesmo e adaptada para o satélite Sentinel-2.

Tabela 3. Índices de vegetação genéricos que foram introduzidos no ARTMO e que se relacionam com os parâmetros biofísicos estudados nesse trabalho. Sendo que R representa a refletância e λ o comprimento de onda.

Abreviação	Formula original	Nome genérico	Referencia	Formula genérica
NDVI	$\frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670}}$	Normalized Difference Vegetation Index	Rouse <i>et al.</i> , 1973	$\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}$
TRBI	$\frac{R_{705}}{R_{717} + R_{491}}$	Three Ratio Band Index	Tian <i>et al.</i> , 2011	$\frac{R_1}{R_2 + R_3}$
DLH	$R_{676} - 0.5 * (R_{746} + R_{665})$	Difference light Heigh	Gower, 1980	$R_1 - 0.5 (R_2 + R_3)$
TBDO	$R_{740-750} * \left(\frac{1}{R_{660-670}} - \frac{1}{R_{720-730}} \right)$	Three Band Dall'Olmo	(Dall'Olmo <i>et al.</i> , 2003)	$R_1 * \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_3} \right)$
NAOC	$1 - \frac{(R_{665} * 40) + (R_{705} * 35) + (R_{740} * 43)}{(R_{783} * 118)}$	Normalized Area Over reflectance Curve	Delegido <i>et al.</i> , 2010	Adaptada pelo autor para Sentinel-2

4.2.3.3. Processamento dos dados

O fluxograma utilizado para o processamento dos dados foi descrito na Figura 1. Após a coleta realizada em campo, os espectros completos (400 a 920 nm) foram transformados para as bandas do satélite Sentinel-2 com auxílio do software ARTMO. Posteriormente, foram testados os diferentes IVs (Tabela 3), para as quatro variáveis estudadas ao longo do experimento (teor foliar de nitrogênio (TFN), produtividade, altura e índice de área foliar - IAF). Foram encontradas as melhores bandas para as duas cultivares (Mombaça e Marandú) e também foram estudados os dados em conjunto. Após esse processamento com o software ARTMO, foi observado que os melhores coeficientes de correlação corresponderam ao conjunto de dados e geraram-se a espacialização dos resultados desse estudo por meio de mapas.

Figura 1. Fluxograma do processamento de dados.

4.2.3.4. Análise espacial dos IVs

Os valores IVs apresentados nesse trabalho foram gerados com dados das duas cultivares Mombaça e Marandú, para posteriormente serem aplicados de maneira geral para a cultivar Piatã, para a estimativa de parâmetros biofísicos. Esta estimativa foi testada em uma área situada na região de São Carlos, São Paulo, pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), com latitude 21°58'27.46"S e longitude 47°51'3.27"O. A área de estudo estava plantada com *Brachiaria Brizantha* cv. Piatã no caso dos piquetes A e C e no piquete B estava plantada com *Brachiaria Decumbens*. O clima da região é do tipo subtropical úmido (Cwa), segundo a classificação de Köppen-Geiger.

Para espacializar os valores dos IVs foram utilizadas imagens de satélite do Sentinel-2. A imagem escolhida foi do dia 25 de abril de 2018. Esta imagem foi corrigida atmosféricamente convertendo a refletância do topo da atmosfera em refletância de superfície (Louis *et al.* 2016), utilizando o procedimento Sen2Cor disponível na caixa de ferramentas Sentinel-2 SNAP (Sentinel Application Platform). Foram processadas as imagens para obter uma resolução de 10 x 10 metros. Após esta etapa, foram realizados os cálculos dos índices encontrados para as bandas do Sentinel-2 e com o auxílio do software ArcGIS foram gerados os mapas para melhor visualização dos resultados.

A área de estudo estava dividida em três sistemas (A, B, C) conforme pode ser observado na Figura 2, sendo o sistema A (piquetes 1 e 2), sistema B (piquetes 3 e 4) e sistema C (piquetes 5 e 6).

O sistema A é de integração lavoura pecuária (ILP), no qual a cada três anos um terço da área de pastagem é reformada juntamente com o cultivo de milho. Os sistemas ILP envolvem o cultivo de culturas agrícolas e pastagens na mesma área em plantios em rotação, consorciação e/ou sucessão, possibilitando o aumento da eficiência na utilização dos recursos naturais, a preservação do meio ambiente, a estabilidade de produção e a renda do produtor. O sistema A possui duas repetições, adubação nitrogenada e método de pastejo rotacionado. Cada uma das repetições possui 6 piquetes, dos quais dois são cultivados com milho. A adubação

realizada nesse piquete foi com ureia, totalizando-se uma dose de 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio no período de novembro de 2017 a maio de 2018. O pastejo rotacionado caracteriza-se pela mudança periódica e freqüente dos animais de um piquete para o outro, objetivando dar um período de descanso para as forrageiras. O sistema B possui uma cultivar diferente, *Brachiaria decumbens*, é o sistema foi do tipo extensivo sob método de pastejo contínuo e sem adubação, com duas repetições. Esse tipo de sistema é o mais comumente utilizado no Brasil devido ao menor custo de produção. O sistema C é um sistema intensivo com duas repetições e sobre método de pastejo rotacionado. A área também foi adubada com nitrogênio (180 kg ha⁻¹ no período de novembro de 2017 a maio de 2018) e cada repetição possui 6 piquetes.

A condição de cada área no dia da avaliação está detalhada na Tabela 4. No que se refere aos sistemas A e C o manejo foi pelo método rotacionado, com diferentes estados de desenvolvimento do capim Piatã dentro do mesmo sistema. Porém, no sistema B o manejo foi método de pastejo contínuo e, portanto, toda a área era caracterizada pelo mesmo estado de desenvolvimento ou crescimento da cultivar Decumbens. O ciclo de rotação no sistema intensivo (Sistema C) e ILP (Sistema A) foi de 36 dias sendo que no intensivo o piquete em pastejo fica sendo pastejado por 6 dias (com período de descanso de 30 dias) e o no ILP por 9 dias (com período de descanso de 27 dias).

Tabela 4. Estado de desenvolvimento da pastagem de capim Piatã em dois sistemas de produção (A e C) e Decumbens (B), duas repetições de área (1 e 2 repetições do sistema A; 3 e 4 repetições do sistema B e 5 e 6 repetições do sistema C) e nas subdivisões em piquetes no dia 25 de Abril de 2018. Milho = áreas sob cultivo de milho em sistemas ILP; crescimento = piquetes em rebrota nas áreas sob manejo rotacionado; pré-pastejo = piquetes logo antes da entrada dos animais nas áreas sob pastejo rotacionado; pastejo = piquetes sendo pastejados pelos animais; pós-pastejo = piquetes logo após a saída dos animais nas áreas sob pastejo rotacionado.

Sistema	Repetição da área	Piquetes	Milho	Crescimento	Pré-pastejo	Pastejo	Pos-pastejo
A	1	1			x		
		2		x			
		3					x
		4				x	
		5	x				
		6	x				
	2	1			x		
		2		x			
		3					x
		4				x	
		5	x				
		6	x				
B	3	7				x	
	4	8				x	
C	5	1					x
		2				x	
		3			x		
		4		x			
		5		x			
		6		x			
	6	1					x
		2				x	
		3			x		
		4		x			
		5		x			
		6		x

Figura 2. Distribuição da área da cultivar Piatã, dividida em três sistemas (A, B, C). O manejo do sistema A é integração lavoura-pecuária (ILP), o sistema B consiste em extensivo sob método de pastejo contínuo e o sistema C é intensivo sob método de pastejo rotacionado. Cada um deles possui duas repetições de área, sendo o sistema A (piquetes 1 e 2), sistema B (piquetes 3 e 4) e sistema C (piquetes 5 e 6). Os sistemas A e C possuíam duas repetições, com 6 piquetes cada uma. No caso do sistema C são duas repetições. Os números dentro de cada uma das repetições identificam os piquetes.

4.3. Resultados e Discussão

Nesse trabalho foram estudados os diferentes IVs (Tabela 3) relacionados com parâmetros biofísicos das cultivares Mombaça e Marandú. Os melhores IVs para as cultivares Mombaça e Marandú foram aplicados também para a cultivar Piatã, visando ampliar a aplicação dessa metodologia para outras variedades de forrageiras.

Após esse estudo, foi observado que os melhores resultados foram para o conjunto de dados das duas forrageiras, uma vez que os coeficientes de determinação foram maiores, quando comparados com cada uma das cultivares de modo individual. Diante dos resultados observados na Tabela 5, podemos observar que os IVs obtidos neste estudo podem ser aplicados em diferentes variedades de forrageiras tropicais visando estimar diferentes parâmetros biofísicos.

Na Tabela 5 estão apresentados os comprimentos de onda das bandas do Sentinel-2 que demonstraram melhor desempenho para o conjunto de dados de forrageiras. Dos primeiros 50 resultados fornecidos pelo software ARTMO, foram selecionados os que dentro de um ponto de vista físico e estatístico (coeficiente de correlação) se correlacionaram melhor com cada uma das variáveis estudadas (Tabela 5).

Tabela 5. Resultados das melhores bandas encontradas a partir do satélite Sentinel-2 para os diferentes IVs, em função dos parâmetros biofísicos estudados (TFN, produtividade, altura e IAF) para o conjunto de dados das cultivares Mombaça e Marandú. Os índices originais (Tabela 2) foram renomeados devido à mudança das bandas selecionadas através do software ARTMO.

Índice	TFN	Produtividade	Altura	IAF
NDI	$\frac{R_{443} - R_{560}}{R_{443} + R_{560}}$	$\frac{R_{665} - R_{443}}{R_{665} + R_{443}}$	$\frac{R_{865} - R_{842}}{R_{865} + R_{842}}$	$\frac{R_{783} - R_{740}}{R_{783} + R_{740}}$
	$R^2 = 0,18$	$R^2 = 0,37$	$R^2 = 0,06$	$R^2 = 0,54$
TBI	$\frac{R_{490}}{R_{665} + R_{560}}$	$\frac{R_{443}}{R_{665} + R_{490}}$	$\frac{R_{443}}{R_{665} + R_{490}}$	$\frac{R_{740}}{R_{783} + R_{665}}$
	$R^2 = 0,38$	$R^2 = 0,45$	$R^2 = 0,15$	$R^2 = 0,56$
NAOC	$R^2 = 0,13$	$R^2 = 0,34$	$R^2 = 0,08$	$R^2 = 0,57$
DLH	$R_{443} - 0,5(R_{665} + R_{490})$	$R_{865} - 0,5(R_{740} + R_{842})$	$R_{783} - 0,5(R_{865} + R_{443})$	$R_{783} - 0,5(R_{865} + R_{740})$
	$R^2 = 0,28$	$R^2 = 0,25$	$R^2 = 0,002$	$R^2 = 0,42$
DO	$R_{443} * \left(\frac{1}{R_{740}} - \frac{1}{R_{560}} \right)$	$R_{865} * \left(\frac{1}{R_{783}} - \frac{1}{R_{740}} \right)$	$R_{490} * \left(\frac{1}{R_{865}} - \frac{1}{R_{842}} \right)$	$R_{783} * \left(\frac{1}{R_{705}} - \frac{1}{R_{842}} \right)$
	$R^2 = 0,24$	$R^2 = 0,54$	$R^2 = 0,006$	$R^2 = 0,4$

Para a variável altura os coeficientes de correlação (R^2) foram praticamente nulos (Tabela 5), uma vez que as duas forrageiras são morfologicamente diferentes. Apesar de ambas cultivares apresentarem hábito de crescimento cespitoso, em condições normais de cultivo a cultivar mombaça apresenta porte mais elevado e folhas mais largas e compridas que a cultivar marandú (Embrapa, 1984; Savidan, 1990). Para as outras variáveis estudadas (TFN, produtividade e IAF) nota-se que as correlações foram melhores quando comparados com a

variável altura. Na Tabela 5 destacaram-se em cor cinza os melhores resultados obtidos em função dos coeficientes de determinação. A continuação analizaremos os resultados para justificar a metodologia utilizada nesse estudo. Para isso, também se mostraram os mapas gerados para cada um dos parâmetros biofísicos estudados obtidos a partir do satélite Sentinel-2 sobre o campo experimental.

4.3.1. Teor foliar de nitrogênio

Na Figura 3, foi apresentada a melhor combinação para a variável TFN. Nesse caso, de todos os índices testados o que melhor se correlacionou foi o IV Three Band Index (TBI). Tian *et al.* (2011) compararam os desempenhos de 61 IVs publicados para estimativas de N na cultura do arroz, e alegaram que seus TBIs recentemente propostos melhoraram os já citados por outros autores para a estimativa de N nessa cultura. Pacheco-Labrador *et al.* (2014) também estudaram o desempenho de 82 IVs para árvore nativa da região do mediterrâneo *Quercus ilex* e determinaram que para a predição de N também os TBIs propostos melhoraram os resultados. No entanto, seus estudos mostraram que esses IVs são sensíveis a espécies de vegetação específicas, estágios de crescimento e áreas de estudo. Esse fato justificaria que as bandas selecionadas pelo software ARTMO, para as duas variedades de forrageiras tropicais estudadas, sejam diferentes das citadas por Tian *et al.* (2011) na Tabela 2.

A melhor combinação de bandas do Sentinel-2 encontradas para o índice TBI foi; b1-490; b2-665; b3-560. O modelo gerado foi do tipo linear, com uma correlação de 0,38 e p-value $\leq 1\%$. Dessa forma, o TFN pode ser calculado através de imagens obtidas do satélite Sentinel-2 utilizando a equação 1:

$$\text{TFN (g/kg)} = 228,27 \left(\frac{R_{490}}{R_{665} + R_{560}} \right) - 35,262 \quad (1)$$

Figura 3. Gráfico de distribuição do TFN (g/kg), em função do índice de vegetação TBI para o conjunto de dados das cultivares Mombaça e Marandú.

A região do espectro que se correlacionou com o nitrogênio foi a do visível. A região do visível é caracterizada pela presença de baixa refletância na região do azul e vermelho, decorrente da forte absorção dos pigmentos do grupo da clorofila (Novo, 2010). Esses pigmentos, geralmente encontrados nos cloroplastos, são: clorofila (65%), xantofilas (29%) e carotenos (6%). Dentro das bandas de absorção, existem duas centradas aproximadamente em 480 nm devido à presença de carotenos, e 680 nm, relacionada ao processo de fotossíntese. Destaca-se também ainda um pico de refletância em torno de 550 nm, correspondente a região do verde do espectro visível, o que explica a coloração verde das plantas (Rosa, 2009). Portanto, a influência do nitrogênio sobre as forrageiras tropicais fez com que as bandas que melhor se correlacionaram se agrupassem nessa região (b1-490; b2-665; b3-560).

Foster *et al.* (2016) estudando forrageiras, também encontraram que os comprimentos de onda considerados mais importantes para a separação dos N tratamentos foram 520-560, 650-690 nm (VIS) e 710-730 nm (red-edge). Stroppiana *et al.* (2009) identificaram para a cultura do arroz correlações satisfatórias entre IVs e concentração de N no dossel envolvendo 2 comprimentos de onda da região do visível (verde e azul). Ou seja, ainda que o coeficiente de determinação tenha sido de 0,38, as bandas que se correlacionaram com o TFN corresponderam às citadas por outros autores.

Vários estudos têm aplicado sensores multiespectrais em dosséis para encontrar a correlação entre IVs e o TFN, mas ainda não obtiveram resultados satisfatórios. Clevers *et al.* (2013) testaram o potencial de Sentinel-2 e Sentinel-3 em estimar o teor total de clorofila e N em milho, soja, batata e gramíneas através de medidas de espectrorradiômetro obtidas para quatro locais diferentes. Os autores testaram vários índices e verificaram que o índice de clorofila de ponta vermelha (CIred-edge), o índice de clorofila verde (CIgreen) e o índice de clorofila terrestre do MERIS são estimadores precisos e lineares da clorofila do dossel e do conteúdo de N para Sentinel-2 e Sentinel-3. Os resultados confirmaram a importância das bandas de borda vermelha em particular para o satélite Sentinel-2, devido à combinação com sua moderada resolução espacial de 20 m.

Com o intuito de aplicar essa metodologia para estimação do TFN foi utilizada a equação 1 e a partir de uma imagem Sentinel-2 da área de estudo cultivada com Piatã (Sistemas A, B e C da Figura 2) foi gerada a Figura 4. A resolução espacial da imagem para estimar o TFN foi de 10 m já que a formula 1 utiliza as bandas originais do Sentinel-2. Os resultados obtidos indicam que a técnica foi sensível para detectar diferenças no TFN em pastagens sob diferentes condições de adubação, de manejo e de tempo de rebrota. Os valores de TFN encontrados para toda a área variaram entre 68 g/kg até 100 g/kg. O sistema B foi o único que não recebeu adubação nitrogenada, e apresentou os menores valores de TFN. Dentro do sistema B o TFN variou entre 68 e 80 g/kg.

No caso do sistema A, os piquetes 1, 2 e 3 da repetição 1, foram influenciados pelas árvores presentes na lateral da área e, por esse motivo, metade dos pixels dentro de cada área apresenta uma coloração mais avermelhada. Os piquetes 1, das duas repetições, estão em fase de pré-pastejo (crescendo há 27 dias) e os pixels nessas áreas possuem uma coloração mais avermelhada quando comparados com os piquetes 2 e 3, apresentando um melhor vigor vegetativo em função de maior biomassa (maior tempo de crescimento) e conteúdo de nitrogênio decorrente da fertilização pretérita desse sistema (Abrahão *et al.*, 2009). No que se refere aos piquetes 2 e 3, nas duas repetições, a coloração dos pixels é semelhante apesar de que o piquete 2 está em fase de crescimento (crescendo há 9 dias) e o piquete 3 em fase de pós-pastejo (crescendo há 3 dias). A rebrota das pastagens após a desfolha nessa época (abril) é mais lenta e a defasagem no período de crescimento (apenas 6

dias) dos piquetes não deve ter sido suficiente para promover diferença dentro da imagem. A taxa de crescimento das plantas forrageiras logo após o pastejo está relacionada com a intensidade de desfolha e, normalmente, é mais baixa no início da rebrota (Parsons *et al.*, 2000). No caso do piquete 4, nas duas repetições, pode-se observar que a coloração é semelhante. O maior conteúdo de N na folha foi observado dentro do sistema A no piquete sob pastejo (piquete 4). Já que o sistema A é um sistema de integração lavoura pecuária, os piquetes 5 e 6 foram plantados com milho e, no momento da passagem do satélite, os mesmos estavam em um estado de colheita (repetição 2) e pós-colheita (repetição 1). O milho na repetição 1 estava colhido e a imagem representa a refletância dos restos de plantas de milho sobre o solo. Desta forma, pela presença de plantas de milho na repetição 2, foi possível identificar maior teor foliar de nitrogênio.

O sistema C trata-se de um sistema intensivo sob método de pastejo rotacionado com duas repetições. Os piquetes 1 estavam em fase de pós-pastejo há 4 dias e, portanto, demonstram uma quantidade de nitrogênio menor (80 g/kg) quando comparados com outros piquetes do mesmo sistema. Os piquetes 2 estavam em fase de pastejo há 4 dias e a coloração é mais avermelhada com um TFN aproximadamente de 90 g/kg. Os piquetes 3 estavam em uma fase de pré-pastejo, com crescimento de 27 dias, sendo o maior TFN (100 g/kg) dentro do sistema C. Os piquetes 4, 5, 6 estavam em fase de crescimento com 21, 15 e 9 dias respectivamente, é por isso que apresentaram variações no TFN relacionadas ao tempo de rebrota de cada um após a desfolha.

De forma geral, pode-se observar que os sistemas A e C, que receberam fertilização nitrogenada, sendo que os piquetes em fase de pré-pastejo apresentaram os maiores valores de TFN, cerca de 100 g/kg. Isso é devido a que ao estar em fase de pré-pastejo (por volta de 30 dias de crescimento) a quantidade de biomassa é maior e por tanto o conteúdo de N também é maior. Foster et al. (2016) estudando a discriminação de doses de N através de sensores hiperespectrais a nível de folha e dossel, encontraram que os dados do espectro de folhas são menos variáveis quando comparados com os dados de dossel, podendo fornecer uma boa estimativa da composição bioquímica dentro da planta usando IVs relacionados à clorofila para estimar parâmetros biofísicos, como biomassa e composição bioquímica da vegetação.

Figura 4. Mapa do teor foliar de nitrogênio (TFN) para sistemas pecuários cultivados com Piatã, elaborado a partir da equação 1 e gerado através de uma imagem do Sentinel-2 obtida no dia 25 de abril de 2018. O sistema de coordenadas foi UTM, zona 22S. A resolução da imagem obtida através do satélite Sentinel-2 foi de 10 m.

4.3.2. Produtividade

A Figura 5 apresenta a regressão entre o índice de vegetação DO (Dall’Olmo) e a variável produtividade. Para esta variável, entre os índices testados, a relação com o índice de vegetação DO foi a que apresentou o melhor coeficiente de determinação (r^2). Nesse estudo, a melhor combinação de bandas do Sentinel-2 encontradas foi para o índice de três bandas DO, sendo; b1-865; b2-783; b3-740. O modelo gerado foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,54 e um p-value $\leq 1\%$. Dessa forma, a produtividade pode ser calculada através de imagens obtidas do satélite Sentinel-2 utilizando a equação 2:

$$\text{Produtividade (kg/ha)} = 218,6 e^{7,518 \cdot R_{865} \left(\frac{1}{R_{783}} - \frac{1}{R_{740}} \right)} \quad (2)$$

Figura 5. Gráfico de distribuição da produtividade em função do índice de vegetação DO para o conjunto de dados das cultivares Mombaça e Marandú.

Diversos estudos têm demonstrado que os IVs de banda estreita podem ser cruciais no fornecimento de informações essenciais e potenciais para quantificar as características bioquímicas ou biofísicas da vegetação (Darvishzadeh *et al.*, 2008; Foster *et al.*, 2017). Simões *et al.* (2015), analisando as respostas do capim Tifton 85 (*Cynodon spp.*) à adubação nitrogenada, utilizando IVs calculados a partir de imagens multiespectrais, indicaram que os melhores índices para estimar produtividade foram NDVI e Índice de cobertura verde (ICV). Tong *et al.* (2018) estudando gramíneas na China do tipo C3 e C4, na região do espectro entre 400-900 nm, obtiveram que para o tipo C4 as regiões do espectro com maiores correlações, para os índices estudados, foram da região do visível até o infravermelho próximo. Os melhores resultados observados pelos autores obtiveram-se para os índices com três bandas sendo a melhor combinação de bandas, para estimativa de produtividade, b1-711; b2-582; b3-718 com um coeficiente de determinação de 0,730.

Com o intuito de aplicar essa metodologia para estimar a produtividade foi utilizada a equação 2 e a partir da mesma imagem de Sentinel-2 utilizada na Figura 4, foi gerada a Figura 6. A resolução da imagem do

Sentinel-2 foi de 20 m já que as bandas originais utilizadas para calcular o índice são de 20 m. Os valores de biomassa de forragem encontrados para a área toda oscilaram entre 400 kg ha⁻¹ até 4000 kg ha⁻¹. O sistema B foi o único que não recebeu adubação nitrogenada e encontrava-se sob lotação contínua, apresentando menor biomassa de forragem no momento da avaliação (800 kg ha⁻¹) se comparado com os dois sistemas (A e C) que receberam nitrogênio e que foram manejados sob lotação rotacionada.

No sistema A, os piquetes 1, 2 e 3 da repetição 1 foram influenciados pelas árvores em volta da cerca e, portanto, os pixels dentro de cada área têm uma coloração diferente, oscilando a produtividade entre 500 até 2000 kg ha⁻¹ (Figura 6). Analisando os piquetes 5 e 6, da repetição 1, as produtividades foram semelhantes (600 kg ha⁻¹) já que o milho estava no mesmo estágio de desenvolvimento. Porém nos piquetes 5 e 6 na repetição 2, os valores de biomassa foram maiores, devido a que a repetição 2 estava em estado de colheita e a repetição 1 em estado de pós-colheita. No que se refere a repetição 2 do sistema A, os piquetes 2 e 3 apresentaram uma produtividade semelhante. Como já explicado para o TFN, a defasagem no tempo de crescimento dos dois piquetes não foi suficiente promover diferença na imagem por satélite. A maior produtividade no sistema A foi apresentada pelo piquete 4 com aproximadamente 1500 kg ha⁻¹.

O sistema B foi o que apresentou menores valores de produtividade, já que este sistema não recebeu adubação nitrogenada e também apresentou menores valores de TFN.

No sistema C, os piquetes 1 estavam em fase de pós-pastejo há 4 dias e, portanto, demonstram uma produtividade menor (700 kg ha⁻¹) quando comparado com outros piquetes do mesmo sistema. Os piquetes 2 estavam em fase de pastejo há 4 dias, e a produtividade oscilou entre 500 kg ha⁻¹ até 1600 kg ha⁻¹. Os piquetes 3 estavam em uma fase de pré-pastejo com crescimento de 27 dias, foram as maiores produtividades dentro do sistema C, oscilando entre 1600 e 1800 kg ha⁻¹. Os piquetes 4, 5 e 6 estavam em fase de crescimento e as diferenças observadas na produtividade foram relacionadas ao tempo de rebrota de cada um, já que os piquetes 4, 5 e 6 estavam crescendo há 21, 15 e 9 dias respectivamente.

De forma geral, podemos observar que para os sistemas que receberam adubação (A e C), obtiveram-se os maiores valores de produtividade, sendo que os piquetes em fase de pré-pastejo foram os que apresentaram os maiores valores de produtividade.

Figura 6. Mapa de produtividade para sistemas pecuários cultivados com Piatã, elaborado a partir da equação 2 e gerado através de uma imagem do Sentinel-2 obtida no dia 25 de abril de 2018. Sistema de coordenadas UTM, zona 22S. A resolução da imagem obtida através do satélite Sentinel-2 foi de 20 m.

4.3.3. Índice de área foliar

O IAF é um importante parâmetro do dossel vegetal, pois é intrinsecamente ligado à capacidade de interceptar a radiação fotossinteticamente ativa, e portanto correlacionado com a fotossíntese (Asrar, *et al.*, 1985). Três índices resultaram em coeficientes de determinação semelhantes: TBI, NAOC e NDI (Tabela 4).

As clorofilas têm fortes picos de absorção em duas regiões do espectro; azul e vermelho. Como o pico do azul se sobrepõe à absorbância dos carotenoides, geralmente não é usado para estimar o conteúdo de clorofila. É por isso, que em estudos de sensoriamento remoto se utiliza a absorvância máxima da clorofila na região vermelha entre 660 e 680 nm (Sims *et al.*, 2002). Kluge (2004) estudando a fotossíntese em plantas observou que a molécula de clorofila absorve no pico de 680 nm, já que os elétrons oriundos da água são transferidos para a cadeia transportadora de elétrons da fotossíntese. Frampton *et al.* (2013), estudando as bandas do Sentinel-2 para estimação de parâmetros biofísicos em cultivos agrícolas, afirmou que a banda 665 (banda vermelha) captura a absorção devido à clorofila. Nas proximidades de 700 nm, na transição para a região do infravermelho próximo, começa um crescimento acentuado da refletância conhecido como borda vermelha ou red-edge. Segundo Curran (1990) essa região é considerada como o limite entre o processo de absorção pela clorofila no vermelho e o processo de espalhamento do infravermelho próximo devido à estrutura interna das folhas.

Na Figura 7 pode-se observar o gráfico do índice TBI para estimação do IAF. O modelo gerado foi do tipo linear, decrescente, com um coeficiente de determinação de 0,56 e um p-value $\leq 1\%$. A combinação de bandas selecionadas pelo software ARTMO para esse índice foram; b1-740; b2-783; b3-665. Segundo a Tabela 2, a banda 1 e 2 pertencem à região conhecida como infravermelho próximo (red-edge) e a banda 3 está na faixa do vermelho. Dessa forma, o IAF pode se calcular através de imagens obtidas do satélite Sentinel-2 utilizando a equação 3:

$$\text{IAF} = -43,725 \left(\frac{R_{740}}{R_{783} + R_{665}} \right) + 36,252 \quad (3)$$

Allen e Richardson (1968) estudando a refletância de diferentes camadas foliares de algodão observaram que quando se sobrepõem as folhas ocorre um aumento (em comparação com a refletância individual) nos níveis de refletância na região do infravermelho próximo até que se atinja um valor estável máximo ou também denominado refletância infinita. Dash e Curran (2007) estudando um novo índice chamado índice de clorofila terrestre MERIS (MTCI) utilizaram dados de três bandas centradas em 681, 708 e 753 nm (bandas 8, 9 e 10 na configuração da banda padrão MERIS) para a determinação de clorofila. Nesse estudo os autores observaram que quanto maior era a absorvância na região do vermelho, maior era o deslocamento da curva de refletância para a direita, ou seja, na região do red-edge. Na fórmula 3, pode-se observar que o índice TBI utiliza duas bandas do red-edge (b1-740; b2-783) e uma banda do vermelho (b3-665).

Diversos autores (Dash *et al.*, 2007; Deleghido *et al.*, 2011) tem demonstrado que o IAF tem uma forte influencia na declividade da curva de refletividade na região do red-edge, e que quando o IAF aumenta a clorofila produz um deslocamento dessa curva para o vermelho. É por isso, que um aumento do IAF produz uma diminuição da refletividade na banda de 740 nm, como pode se observar na Figura 7.

Figura 7. Gráfico de distribuição do IAF em função do índice de vegetação TBI (**Three Band Index**) para a cultivar Mombaça e Marandú.

Na figura 8 pode-se observar o gráfico de distribuição do índice NAOC para a variável IAF. Sendo que, o coeficiente de determinação foi de 0,57 e o modelo foi do tipo exponencial e crescente e um p-value ≤ 1 %. Dessa forma, o IAF pode se calcular através de imagens obtidas do satélite Sentinel-2 e utilizando a equação 4:

$$IAF = 0,038e^{7,2054 \left(1 - \frac{40 \cdot R_{665} + 35 \cdot R_{705} + 43 \cdot R_{740}}{118 \cdot R_{783}} \right)} \quad (4)$$

Figura 8. Gráfico de distribuição do IAF em função do índice de vegetação NAOC para o conjunto de dados das cultivares Mombaça e Marandú.

A combinação de bandas para gerar a Figura 8 foi; b1-665; b2-705; b3-740; b4-783. Esse índice foi o único que manteve as bandas originais citadas pelo autor (Tabela 3). Esse índice utiliza a informação de todas as bandas entre a máxima absorção de clorofila (665 nm) e a região final do red-edge onde já não se produz a absorção dos pigmentos (783 nm), por tanto, é coerente que a correlação entre esse índice e o IAF seja positiva, já que ao aumentar o IAF se produz um deslocamento de toda a curva espectral entre 665 e 783 nm para direita e para baixo, aumentando a área sobre a curva espectral.

O terceiro índice que apresenta uma boa correlação com o IAF é o NDI, o mesmo utiliza as bandas de 783 e 740 nm. Na Figura 9 podemos observar o gráfico de distribuição desse índice NDI para a variável IAF. Sendo que, o coeficiente de determinação foi de 0,54 e o modelo foi do tipo potencial e crescente e um p-value $\leq 1\%$. Esse índice é o único índice de duas bandas e as mesmas estão posicionadas na região do red-edge. Dessa forma, o IAF pode se calcular através de imagens obtidas do satélite Sentinel-2 e utilizando a equação 5:

$$IAF = 49,328 * \left(\frac{R_{783} - R_{740}}{R_{783} + R_{740}} \right)^{1,2113} \quad (5)$$

Figura 9. Gráfico de distribuição do IAF em função do índice de vegetação NDI para o conjunto de dados das cultivares Mombaça e Marandú.

Esses foram os resultados para os índices TBI, NAOC e NDI. Porém, para entender melhor qual desses seria o mais adequado para estimar a variável IAF foram calculados os mesmos com as bandas encontradas, em seguida foi realizado um ROI (Region of interest) com 512 pixels, para posteriormente obter os valores médios por pixel através das equações obtidas (3, 4 e 5). Como resultado desse processamento foi elaborada a Figura 10, mostrando os histogramas dos três índices estudados, onde se comparam os valores obtidos para a variável IAF e o número de repetições para cada valor de IAF no pixel do ROI realizado. O processamento das informações foi realizado através do software Sentinel Application Platform (SNAP).

Analisando a Figura 10 observa-se que o índice TBI para a estimação do IAF, um valor médio por pixel de 5,28 e um coeficiente de variação de 1,15. Quando comparamos o TBI com os resultados obtidos para NAOC e NDI, pode-se afirmar que são bem distantes, uma vez que para NAOC varia entre 0,75 y 2,5 y para

NDI varia entre 1,5 e 3. Revisando outros trabalhos na literatura, vemos que Zanchi *et al.* (2009) estudando o IAF e a biomassa para pastagem no estado de Rondônia, Brasil, obtiveram valores de IAF que oscilaram entre 1,4 e 2,8. Danelichen *et al.* (2014), avaliando a estimativa do IAF de uma área de pastagem no pantanal mato-grossense encontrou, utilizando imagens do o sensor MODIS, o valor de 1,76 e através da metodologia de Allen *et al.* (2002) obteve um valor de 1,38. Ou seja, a maioria de estudos realizados para pastagem obtiveram valores entre 1 e 3, coerentes com os resultados apresentados para o índice NAOC e NDI.

Em suma, o índice TBI foi desconsiderado como método para o cálculo da variável IAF devido aos resultados obtidos e apresentados na Figura 10, já que ao aplica-lo em uma imagem de Sentinel-2 sobrestima muito o valor do IAF. Como citado anteriormente, o índice TBI utilizou uma banda do vermelho (665 nm) que satura quando a absorção é máxima, não demonstrando diferenças no aumento de IAF, e portanto mantendo a refletância invariável ao aumento da biomassa. Esse fato é visível na Figura 7, onde se observa que para os valores de TBI baixos (ao redor de 0,7) os valores de IAF variam entre 3 e 9 que é praticamente todo o alcance de variação de IAF nos dados experimentais, produzindo uma gran incertidumbre dentro dos resultados.

Figura 10. Área de interesse e histograma onde se representa o numero de vezes que se repete um pixel para a variável IAF, em função de cada IV estudado; TBI, NAOC e NDI.

Os índices NAOC e NDI obtiveram resultados semelhantes para o calculo do IAF. Porém para seleccionar o melhor índice para essa variável, foi realizada a Figura 10, mostrando os valores máximos, mínimos, promedios e coeficientes de variação (CV) dos pixels selecionados através do ROI (Region of interest).

O NDI possui um CV menor quando é comparado com o índice NAOC e TBI. Assim, considera-se que o melhor índice para representar a variável IAF a partir de Sentinel-2 seria o NDI.

Com o intuito de aplicar essa metodologia para estimar a variável IAF a partir do IV gerado com a equação 5 a partir da imagem do Sentinel-2 foi criada a Figura 11. A resolução espacial da imagem utilizada foi de 20 m devido às bandas utilizadas pelo satélite Sentinel-2. Como nas outras figuras, a área foi dividida em três sistemas (A, B, C). Os valores de IAF encontrados para toda a área variaram entre 1 e 4,6. O sistema B foi o único que não recebeu adubação nitrogenada e, portanto, foi o que apresentou menores valores de IAF, (entre 1 e 1,8), quando comparado com os dois sistemas (A e C) que receberam nitrogênio.

No sistema A, os piquetes 1, 2 e 3 da repetição 1 foram influenciados pela árvores em volta da cerca, o que acarreta em uma coloração diferente, variando os valores entre 2 e 4,6. Os valores de IAF dos piquetes 5 e 6 apresentaram valores de IAF semelhantes (em torno de 1,5) e maiores que os dos piquetes 5 e 6 da repetição 2, pois a repetição 2 estava em fase de colheita e a repetição 1 em estado de pós-colheita. No que se refere a repetição 2 do sistema A, os piquetes 2 e 3 obtiveram um valor de IAF semelhante apesar de estarem em diferentes estádios de desenvolvimento (crescimento e pós-pastejo, respectivamente). Como explicado para o TFN e produtividade, a diferença entre esses estádios de desenvolvimento não foi suficiente como para obter uma diferença nos valores obtidos por satélite. O maior valor de IAF dentro do sistema A ocorreu no piquete 4, com um valor aproximado de 3.

No sistema C, os piquetes 1 estavam em fase de pós-pastejo há 4 dias, por isso demonstram um valor de IAF menor (1,8), quando comparado com outros piquetes do mesmo sistema. No caso dos piquetes 2, estavam em fase de pastejo há 4 dias e o IAF oscilou entre 1,5 e 2,8. O piquete 3, estava em uma fase de pré-pastejo com crescimento de 27 dias, foram os maiores valores de IAF dentro da repetição 6, oscilando entre 3 e 3,3. O piquete 3 da repetição 5 também obteve valores oscilando entre 3 e 3,3. Os piquetes 4, 5,6 estavam em fase de crescimento, é por isso que o IAF varia entre os mesmos. Podemos observar que esses piquetes em cada uma das repetições obtêm valores diferentes de IAF, sendo a repetição 5 a que obteve maiores valores de IAF para o pastejo em crescimento.

De forma geral, podemos observar que para os sistemas que receberam adubação (A e C) apresentaram os maiores valores de produtividade, TFN e IAF, sendo que os piquetes em fase de pré-pastejo foram os que apresentaram maiores resultados.

Figura 11. Mapa de IAF para sistemas pecuários cultivados com Piatã, elaborado a partir da equação 5 e gerado através de uma imagem do Sentinel-2 obtida no dia 25 de abril de 2018. Sistema de coordenadas UTM, zona 22S. A resolução da imagem obtida através do satélite Sentinel-2 foi de 20 m.

4.4. Conclusões

A utilização de dados de campo integrados aos dados de IVS obtidos por sensores orbitais é de grande utilidade após as avaliações das estimativas, já que forneceriam informações úteis e validariam o estudo realizado nesse trabalho. Portanto, as estimativas de parâmetros biofísicos, por meio de dados do satélite Sentinel-2 necessitariam de validação de suas estimativas e produtos.

Das quatro variáveis estudadas, três possuem correlacionadas (TFN, produtividade e IAF) diante os resultados gerados nos mapas, já que demonstraram que quando a pastagem recebe nitrogênio a quantidade de biomassa aumenta e consequentemente a produtividade e o IAF. Por tanto, a utilização de adubos nitrogenados influencia nas características do dossel e na refletância do mesmo.

Dos quatro parâmetros biofísicos avaliados, três (TFN, produtividade e IAF) apresentaram correlação com os IVs utilizados. Assim, foi possível observar que os dados obtidos através do satélite Sentinel-2 podem contribuir na estimativa de parâmetros biofísicos em extensas áreas. Foi observado que os maiores valores de TFN, produtividade e IAF ocorreram nos piquetes A e C, em função da adubação nitrogenada.

O TFN obteve a melhor correlação para o índice TBI com um R^2 de 0,38. Para o parâmetro produtividade o melhor índice encontrado foi o DO com um R^2 de 0,54 e para o IAF o melhor índice se correspondeu com o NDI com um R^2 de 0,54.

Trabalhos futuros devem considerar a validação dos dados derivados de imagens de satélite com dados obtidos em campo.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa da doutoranda e os recursos para a realização do projeto. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por fomentar o projeto de pesquisa nº 2013/22435-9, na aquisição dos sensores utilizados nesse projeto.

REFERÊNCIAS

- Abrahão, S. A., Assis, F. De, Pinto, D. C., & Queiroz, D. M. De. (2009). Revista Brasileira de Zootecnia Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia Vegetation spectral indices to discriminate nitrogen rates in tanzania grass, 3598.
- Allen, W. A., & Richardson, A. J. (1968). Interaction of light with a plant canopy. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 1023–1028.
- Andrade, A. C., Miranda, D., Fonseca, D. a, Queiroz, D. S., Salgado, L. T., & Cecon, P. R. (2003). Adubação nitrogenada e potássica em capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier). *Ciência Agrotecnica, edição esp*(November), 1643–1651.
- Arne, S., Appelgren, M. and, & Krekling, T. (1995). Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 41, 177–185.

- Asrar, G., Kanemasu, E. T., Jackson, R. D., & Pinter, P. J. (1985). Estimation of total above-ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 17(3), 211–220. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90095-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90095-1)
- Barbosa, R. A., Júnior, N., Vilela, H. H., Silva, C., Pacheco, V., Euclides, B., ... Sousa, D. L. (2011). Morphogenic and structural characteristics of guinea grass pastures submitted to three frequencies and two defoliation severities Características morfológicas e estruturais de pastos de capim-tanzânia submetidos a três freq. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 947–954.
- Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2–3), 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Boddey, R. M., MacEdo, R., Tarré, R. M., Ferreira, E., De Oliveira, O. C., De, C., ... Urquiaga, S. (2004). Nitrogen cycling in Brachiaria pastures: The key to understanding the process of pasture decline. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(2), 389–403. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.010>
- Bruno, A., Oliveira, B., Andrade, A. C., Magalhães, J. A., Rodrigues, H. N., Mehl, H. U., ... Santos, D. S. (2015). Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia ISSN: 1982-1263 Produtividade do capim-digitária (Digitaria spp .) sob diferentes doses de nitrogênio 1 Productivity of Digitaria grass in different doses of nitrogen, (1993), 70–75.
- Camino, C., González-dugo, V., Hernández, P., Sillero, J. C., & Zarco, P. J. (2018). Int J Appl Earth Obs Geoinformation Improved nitrogen retrievals with airborne-derived fluorescence and plant traits quantified from VNIR-SWIR hyperspectral imagery in the context of precision agriculture. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 70(February), 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.04.013>
- Canto, M. W. Do, Cecato, U., Almeida Júnior, J., Jobim, C. C., Agulhon, R. A., Gai, V. F., ... Queiroz, M. F. S. (2002). Produção Animal no Inverno em Capim-Tanzânia Diferido no Outono e Manejado em Diferentes Alturas de Pasto. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 31(4), 1624–1633. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982002000700004>
- Carnevali, R. A. (2003). Estado de São Paulo - Brasil Orientador: Prof. Dr. SILVA CARNEIRO DA SILVA Estado de São Paulo - Brasil.
- Chapman, D. F., & Lemaire, G. (1993). *Morphogenetic and structural determinants of plant regrowth after defoliation*. (BAKER, M.J). Wellington: Grassland for our world.
- Clevers, J. G. P. W., & Gitelson, A. A. (2013). Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and -3. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23(1), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.10.008>
- Colombo, R., Bellingeri, D., Fasolini, D., & Marino, C. M. (2003). Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 86(1), 120–131. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00094-4)
- Corrêa, L. D. A., & Santos, P. M. (2003). Manejo e utilização de plantas forrageiras dos gêneros Panicum, Brachiaria e Cynodon. *Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos 34*, 36p.
- Corsi, M., & Nussio, L. G. (1992). Manejo do capim-elefante: correção e adubação do solo. In: *SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS*, 87–115.

- Costa, K. A. P., Faquin, V., & Oliveira, I. P. (2010). Doses e fontes de nitrogênio na recuperação de pastagens do capim-marandu. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 62(1), 192–199. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352010000100026>
- Costa, N. de L., Magalhães, J. A., Townsend, C. R., & Paulino, V. T. (2004). Fisiologia e manejo de plantas forrageiras. *Documentos 85, Embrapa Rondônia*, 27p. <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0532>
- Costa, N. de L., Townsend, C. R., Fogaça, F. H. dos S., Magalhães, J. A., Bendahan, A. B., & Santos, F. J. de S. (2016). Produtividade de forragem e morfogênese de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob níveis de nitrogênio. *Pubvet*, 10(10), 731–735. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v10n10.731-735>
- Cunha, C. A. H. da. (2005). *Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em capim Tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e doses de nitrogênio*. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.11.2004.TDE-30112004-154918>
- Cunha, O. F. R., & Santos, Antônio Clementino dos; Araújo, Leandro Coelho de; Ferreira, E. M. (2010). PRODUTIVIDADE DO *Panicum maximum* (MOMBAÇA) EM FUNÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE NITROGÊNIO. *Revista Da FZVA*, 17(1), 136–145.
- Curran, P. J., Dungan, J. L., & Gholz, H. L. (1990). Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiology*, 7(1-2-3-4), 33–48. <https://doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.33>
- Dall’Olmo, G., Gitelson, A. A., & Rundquist, D. C. (2003). Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical Research Letters*, 30(18), 8–11. <https://doi.org/10.1029/2003GL018065>
- Danelichen, V. H. D. M., Velasque, M. C. S., Musis, C. R. De, Machado, N. G., Nogueira, J. D. S., & Biudes, M. S. (2014). Estimativas De Índice De Área Foliar De Uma Pastagem Por Sensoriamento Remoto No Pantanal Mato-Grossense. *Ciência e Natura*, 36(3), 373–384. <https://doi.org/10.5902/2179460X13168>
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsi, F., & Cho, M. (2008). LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(4), 409–426. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2008.01.001>
- Dash, J., & Curran, P. J. (2007). Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). *Advances in Space Research*, 39(1), 100–104. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.02.034>
- De Alencar, C. A. B., Cóser, A. C., Martins, C. E., De Oliveira, R. A., Da Cunha, F. F., & Figueiredo, J. L. A. (2010). Altura de capins e cobertura do solo sob adubação nitrogenada, irrigação e pastejo nas estações do ano. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 32(1), 21–27. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i1.319>
- Delegido, J., Alonso, L., González, G., & Moreno, J. (2010). Estimating chlorophyll content of crops from hyperspectral data using a normalized area over reflectance curve (NAOC). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.003>
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L., & Moreno, J. (2011). Evaluation of sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, 11(7), 7063–7081. <https://doi.org/10.3390/s110707063>

- Delegido, J., Verrelst, J., Meza, C. M., Rivera, J. P., Alonso, L., & Moreno, J. (2013). A red-edge spectral index for remote sensing estimation of green LAI over agroecosystems. *European Journal of Agronomy*, 46, 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.12.001>
- Dias Filho, M. B. (2014). Diagnóstico das Pastagens no Brasil. *Embrapa Amazônia Oriental, Documentos*, 22. https://doi.org/10.1163/_q3_SIM_00374
- Diker, K., & Bausch, W. C. (2003). Potential use of nitrogen reflectance index to estimate plant parameters and yield of maize. *Biosystems Engineering*, 85(4), 437–447. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00097-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00097-7)
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Euclides, V. P. B., Valle, C. B., Macedo, M. C. M., Almeida, R. G., Montagner, D. B., & Barbosa, R. A. (2010). Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39, 151–168. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300018>
- Fagundes, J. L., Fonseca, D. M. Da, Mistura, C., Morais, R. V. De, Vitor, C. M. T., Gomide, J. A., ... Costa, L. T. Da. (2006). Características morfológicas e estruturais do capim-braquiária em pastagem adubada com nitrogênio avaliadas nas quatro estações do ano. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 35(1), 21–29. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982006000100003>
- Fagundes, J. L., Moreira, A. L., Freitas, A. W. de P., Henrichs, R., & Rocha, F. C. (2012). Forage production of Tifton 85 fertilized with nitrogen and subjected to continuous stocking. *Rev. Bras. Saúde Prod. Anim*, 13(2), 306–317.
- Fernandes, J. C. ., Buzetti, S. ., Dupas, E. ., Teixeira Filho, M. C. M. ., & Andreotti, M. . (2015). Sources and rates of nitrogen fertilizer used in Mombasa guineagrass in the Brazilian Cerrado region. *African Journal of Agricultural Research*, 10(10). <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.x>
- Fonseca, E. L., Rosa, L. M. G., & Fontana, D. C. (2002). Caracterização espectral de *Paspalum notatum* em diferentes níveis de adubação nitrogenada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(0100–204X), 365–371. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002000300018>.
- Foster, A. J., Kakani, V. G., Ge, J., Gregory, M., & Mosali, J. (2016). Discriminant analysis of nitrogen treatments in switchgrass and high biomass sorghum using leaf and canopy-scale reflectance spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 37(10), 2252–2279. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1171926>
- Foster, A. J., Kakani, V. G., & Mosali, J. (2017). Estimation of bioenergy crop yield and N status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. *Precision Agriculture*, 18(2), 192–209. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9455-8>
- Frampton, W. J., Dash, J., Watmough, G., & Milton, E. J. (2013). Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>
- Galindo, F. S., Buzetti, S., Filho, M. C. M. T., Dupas, E., & Ludkiewicz, M. G. Z. (2017). Application of different nitrogen doses to increase nitrogen efficiency in Mombasa guineagrass (*Panicum maximum* cv. mombasa) at dry and rainy seasons. *Australian Journal of Crop Science*, 11(12), 1657–1664. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.12.pne907>

- Galindo, F. S., Buzetti, S., Filho, M. C. M. T., Dupas, E., & Ludkiewicz, M. G. Z. (2018). Revista de agricultura neotropical. *Journal of Neotropical Agriculture*, 5(3), 1–9. Retrieved from <http://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/2132/2327>
- Garcez Neto, A. F., Nascimento Junior, D. do, Regazzi, A. J., Fonseca, D. M. da, Mosquim, P. R., & Gobbi, K. F. (2002). Respostas morfológicas e estruturais de *Panicum maximum* cv. Mombaça sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e alturas de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 31(5), 1890–1900. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982002000800004&lng=pt&tlng=pt
- Gil, P. T. De, Fontes, P. C. R., Cecon, P. R., & Ferreira, F. A. (2002). Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. *Horticultura Brasileira*, 20(1999), 611–615. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362011000300009>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Gower, J. F. R. (1980). Observations of in situ fluorescence of chlorophyll-a in Saanich Inlet. *Boundary-Layer Meteorol.*, 18, 235–245.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009). *Análise multivariada de dados*.
- Huete, A. ., Justice, C. ., & Leeuwen, V. W. . (1999). MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document. *Remote Sensing of Environment*, 3, 1–120. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.07.019>
- IBGE. (2017). a G R O P E C U Á R I O. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.*, 7(01036157), 1–180. <https://doi.org/01036157>
- IBM. (1997). SPSS Statistics Base.
- Jensen, J. R., Epiphany, J. C. N., Formaggio, A. R., Santos, A. R. dos, Rudorff, B. F. T., Almeida, C. M. de, & Galvão, L. S. (2009). *Sensoriamento remoto do ambiente uma perspectiva em recursos terrestres* (2nd ed.). Parêntese Editora.
- Kluge, R. A. L. (2004). Fisiologia vegetal: apontamentos de aulas teóricas de fotossíntese.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Eschweizerbartxxx Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Lemaire, G. ., Hogdson, J. ., & Chabbi, A. (2011). *Grassland productivity and ecosystem services*. Cabi, Wallingford. <https://doi.org/10.1079/9781845938093.0000>
- LIU, W. T. H. (2015). *Aplicações de sensoriamento remoto* (2nd ed.). Campo Grande: Oficina de Textos.
- Loozen, Y., Karssenbergh, D., de Jong, S. M., Wang, S., van Dijk, J., Wassen, M. J., & Rebel, K. T. (2019). Exploring the use of vegetation indices to sense canopy nitrogen to phosphorous ratio in grasses. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 75(August 2018), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.012>

- Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Main-knorn, M., & Bieniarz, J. (2016). Sentinel-2 Sen2Cor : L2A processor for users, 2016(1).
- Lourenço, R. W., & Landim, P. M. B. (2004). Estudo Da Variabilidade Do " Índice De Vegetação Por Diferença Normalizada / Ndvi " Utilizando Krigagem Indicativa Study on the Variability of " Normalized Difference Vegetation Index / Ndvi " By Indicative Kriging. *Holos Environment*, 4, 38–55.
- Lyra, W. da S., Silva, E. C. da, Araújo, M. C. U. de, Fragoso, W. D., & Veras, G. (2010). Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais. *Química Nova*, 33(7), 1594–1597. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422010000700030&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt
- Malavolta, E., Vitti, G. C., & de Oliveira, S. A. (1988). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações* (Third edit). Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Retrieved from <https://books.google.es/books?id=Lu9EAAAAYAAJ>
- Martha, G. B., Alves, E., & Contini, E. (2012). Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agricultural Systems*, 110, 173–177. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.001>
- Martins, R. L., Junior, P. R., Fernandes, A. C., Grise, M. M., & Muraro, G. B. (2006). brizantha cv MARANDU E Panicum maximum cv MOMBAÇA , EM RESPOSTA A DIFERENTES DOSES DE NUTRIENTES , EM UMUARAMA-PR Marandu and Panicum maximum cv Mombaça , in Reply the Doses of Nutrients , in Umuarama-PR, 59–64.
- McManus, C., Barcellos, J. O. J., Formenton, B. K., Hermuche, P. M., De Carvalho, O. A., Guimarães, R., ... Neto, J. B. (2016). Dynamics of cattle production in Brazil. *PLoS ONE*, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147138>
- Mehl, H. U., Henrique, B., Rodrigues, N., Mourão, E., & Costa, D. L. (2013). No Title.
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-destructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106(1), 135–141.
- Molin, J. P., Amaral, L. R. ., & Colaço, A. (2015). *Agricultura de precisão*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Monteiro, F. A. (2013). Uso de corretivos e fertilizantes. *Forragicultura: Ciência, Tecnologia e Gestão de Recursos Forrageiros. Jaboticabal: Maria de Lourdes Brandel–ME.*, 275–290.
- Morais, L. F. de;, Carvalho, C. A. B. de;, Anjos, A. N. A. ., Viegas, C. R., & Silva, P. H. F. da. (2018). Resumo Avanços na avaliação de pastagens cultivadas com forrageiras tropicais no Brasil : Uma Revisão Abstract Advances in the evaluation of pastures cultivated with tropical forages in Brazil : A Review Resúmen Avances en la evaluación de pastos cultivad, (June), 125–136. <https://doi.org/10.5935/PAeT.V11.N2.13>
- Moreira, M. A. (2005). *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. UFV.
- Motomiya, A. V. de A., Molin, J. P., Motomiya, W. R., & Biscaro, G. A. (2012). Diagnose nutricional com o uso de sensor óptico ativo em algodoeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(11), 1159–1165. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001100003>
- Mutanga, O., Skidmore, A. K., & Van Wieren, S. (2003). Discriminating tropical grass (Cenchrus ciliaris) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(4), 263–272. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(02\)00158-2](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00158-2)
- Nascimento Junior, D. D., Silva, S. C. da;, & Adese, B. (2004). Panicum maximum,. *System*, 19–22.
- Novo, E. M. L. . (2010). *Sensoriamento Remoto: Princípios e aplicações*. (E. Blücher, Ed.) (4ed ed.). São Paulo.

- Oliveira, A., Andrade, A., Magalhães, J., Rodrigues, B., Mehl, H., Santos, F., ... Costa, N. (2015). Produtividade do capim-digitária (*Digitaria* spp.) sob diferentes doses de nitrogênio. *PubVet*, 9(2), 70–75. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v9n2.70-75>
- Pacheco-Labrador, J., González-Cascón, R., Pilar Martín, M., & Riaño, D. (2014). Understanding the optical responses of leaf nitrogen in mediterranean holm oak (*Quercus ilex*) using field spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26(1), 105–118. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.013>
- Parsons, A. J., & Chapman, D. F. (2000). The principles of pasture growth and utilization. In A. Hopkins & W. Holmes (Eds.), *Grass: its production and utilization* (3rd ed, pp. 31–89). Oxford: Blackwell Science for the British Grassland Society.
- Pellissier, P. A., Ollinger, S. V., Lepine, L. C., Palace, M. W., & McDowell, W. H. (2015). Remote sensing of foliar nitrogen in cultivated grasslands of human dominated landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 167, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.06.009>
- Pereira, V. V., da Fonseca, D. M., Martuscello, J. A., dos Braz, T. G. S., Santos, M. V., & Cecon, P. R. (2011). Características morfogênicas e estruturais de capim-mombaça em três densidades de cultivo adubado com nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40(12), 2681–2689. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011001200010>
- Pestana, M. H., & Gageiro, J. N. (2005). *Análise de dados para ciências sociais: a complementaridade do SPSS*. (4th ed.). Lisboa, Silabo.
- Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. de C., Bosi, C., Crippa, P. H., Santos, P. M., & Nardachione, E. C. (2019). Assessment of Piafã palisadegrass forage mass in integrated livestock production systems using a proximal canopy reflectance sensor. *European Journal of Agronomy*, 103(June 2018), 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.005>
- Ponzoni, F. J., Shimabukuro, Y. E., & Kuplich, T. M. (2012). *Sensoriamento remoto no estudo da vegetação*. Oficina de Textos. Retrieved from <http://www.lojaofitexto.com.br/sensoriamento-remoto-da-vegetacao-2-ed/-p>
- Primavesi, A. C., Primavesi, O., Corrêa, L. D. A., Cantarella, H., Gabriel, A., Freitas, A. R. De, & Vivaldi, L. J. (2004). Adubação Nitrogenada em Capim- Coastcross : Efeitos na Extração de Nutrientes e Recuperação Aparente do Nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 33(1), 68–78.
- Queiroz, D.M.; Dias, G.P.; Mantovani, E. C. . (2000). *Agricultura de Precisão na Produção de Grãos*. , Viçosa, MG: Agricultura de precisão. : Universidade Federal de Viçosa.
- Region, A. J., Grande, R., & Sul, D. (2015). Determinação de Teores de Nitrogênio Foliar em Azevém (*Lolium multiflo- rum* Lam .) Nativo na Região do Alto Jacuí , Rio Grande Do Sul.
- Ren, H., & Zhou, G. (2019). Estimating green biomass ratio with remote sensing in arid grasslands. *Ecological Indicators*, 98(79), 568–574. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.043>
- Richardson, A. J., & Everitt, J. H. (1992). Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity. *Geocarto International*, 7(1), 63–69. <https://doi.org/10.1080/10106049209354353>
- Rivera, J. P., Verrelst, J., Delegido, J., Veroustraete, F., & Moreno, J. (2014). On the semi-automatic retrieval of biophysical parameters based on spectral index optimization. *Remote Sensing*, 6(6), 4927–4951. <https://doi.org/10.3390/rs6064927>

- Rosa, R. (2009). *Introdução ao sensoriamento remoto*. (EDUFU, Ed.) (7 ed.). Uberlândia.
- Rosado, T. L., Gontijo, I., Almeida, M. S. de, Neto, A. C., & Simon, C. da P. (2016). PRODUCTION AND TILLERING OF MOMBAÇA GRASS WITH DIFFERENT SOURCES AND LEVELS OF APPLIED NITROGEN. *ENGENHARIA NA AGRICULTURA*, 24(2), 139–147.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., & Deering, D. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *NASA SP-351 I* (pp. 309–317). Washington, DC. Washington.: Proceedings of the 3rd Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.
- Salimon, C., & Anderson, L. (2017). How strong is the relationship between rainfall variability and Caatinga productivity? a case study under a changing climate. *Annals of the Brazilian Academy of Science, In Press*, 90, In Press. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170143>
- Santos, A. G. T. ., & Viera, A. . (2011). Alturas de pastejo recomendadas para as principais forrageiras considerando 95% de interceptação luminosa, 2(Cadernos de Pós-Graduação da FAZU).
- Santos, H. G. ., Jacomine, P. K. T. ., Anjos, L. H. C. ., Oliveira, V. Á. D. ., Lumberras, J. F. ., Coelho, M. R. ., ... Oliveira, J. B. de. . (2013). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (3rd ed.). Brasília: Embrapa.
- Schlemmer, M., Gitelson, A., Schepers, J., Fergusson, R., Peng, Y., Shanahana, J., & Rundquist, D. (2013). Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25(1), 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.04.003>
- Sibanda, M., Mutanga, O., Dube, T., Vundla, T. S., & Mafongoya, P. L. (2019). Estimating LAI and mapping canopy storage capacity for hydrological applications in wattle infested ecosystems using Sentinel-2 MSI derived red edge bands. *GIScience & Remote Sensing*, 56(1), 68–86. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1492213>
- Sila Carneiro da Silva; Adriana Amaral de Oliveira Bueno; Greg, M. C. U. F. O. B. J. H. C. M., & Morais, C. A. J. P. G. de. (2009). SWARD STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND HERBAGE ACCUMULATION OF Panicum maximum cv. MOMBAÇA SUBJECTED TO ROTATIONAL STOCKING MANAGERMENTS. *Scientia Agriculture*, 66(1), 8–19. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000100002>
- Silva, S. C. da; (2004). Fundamentos para o manejo do pastejo de plantas forrageiras dos gêneros Brachiaria e Panicum. In *Simpósio Manejo Estratégico Da Pastagem* (pp. 347–386). Viçosa: Anais: UFV, DZO. Retrieved from <http://forragicultura.com.br/arquivos/FundamentosparamanejoBrachiariaePanicum.pdf>
- Simões, C. R., Rossiello, R. O. P., Graciosa, M. G., Machado, M. L., & Silva, C. F. da. (2015). Imagens multiespectrais para avaliação de índice de área foliar e massa seca do capim “Tifton 85”, sob adubação nitrogenada. *Ciência Rural*, 45(4), 697–703.
- Sims, D. A., & Gamon, J. A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Snee, R. (1977). Validation and regression models: methods and examples. *Technometrics*, 19, 415–428.
- Stroppiana, D., Boschetti, M., Brivio, P. A., & Bocchi, S. (2009). Plant nitrogen concentration in paddy rice from field canopy hyperspectral radiometry. *Field Crops Research*, 111(1–2), 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.11.004>

- Sudduth, K. A.; Drummond, S. T.; Kitchen, N. R. (2015). Operational characteristics of commercial crop canopy sensors for nitrogen application in maize. In *Precision agriculture* (v. 15, pp. 51–58).
- Thenkabail, P. S. ., Smith, R. B. ., & De-Pauw, E. . (2000). Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71, 158–182.
- Tian, Y. C., Yao, X., Yang, J., Cao, W. X., Hannaway, D. B., & Zhu, Y. (2011). Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. *Field Crops Research*, 120(2), 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.002>
- Tong, X., Duan, L., Liu, T., & Singh, V. P. (2018). Combined use of in situ hyperspectral vegetation indices for estimating pasture biomass at peak productive period for harvest decision. *Precision Agriculture*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9592-3>
- Velho, P. (2016). ANAIS DO II SIMPÓSIO MANEJO SUSTENTÁVEL DAS PASTAGENS DE RONDÔNIA. *II SIMPÓSIO*.
- Verrelst, J., Romijn, E., & Kooistra, L. (2012). Mapping vegetation density in a heterogeneous river floodplain ecosystem using pointable CHRIS/PROBA data. *Remote Sensing*, 4(9), 2866–2889. <https://doi.org/10.3390/rs4092866>
- Wang, J., Wang, T., Skidmore, A. K., Shi, T., & Wu, G. (2015). Evaluating different methods for grass nutrient estimation from canopy hyperspectral reflectance. *Remote Sensing*, 7(5), 5901–5917. <https://doi.org/10.3390/rs70505901>
- Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., & Bastiaanssen, W. (2002). Manual for Surface Energy Balance Algorithms for Land, 1–98.
- Werner, J. C. (1986). *Aduacao de pastagens*. (Boletim té). Nova Odessa: instituto de Zootecnia.
- Xavier, A. C., Rudorff, B. F. T., Moreira, M. A., Alvarenga, B. S., de Freitas, J. G., & Salomon, M. V. (2006). HYPERSPECTRAL FIELD REFLECTANCE\MEASUREMENTS TO ESTIMATE WHEAT GRAIN\YIELD AND PLANT HEIGHT. *Science Agricultural*, 63, 130–138. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000200004>
- Xue, L., & Yang, L. (2009). Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2008.06.002>
- Zanchi, F., Waterloo, M. J., G Aguiar, L. J., von RANDOW, C., Kruijt, B., Luiz CARDOSO, F., & Manzi, A. O. (2009). Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil, 335(392), 335–348. Retrieved from <http://dare.ubvu.vu.nl/bitstream/handle/1871/32404/228524.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Zhang, B., Zhang, L., Xie, D., Yin, X., Liu, C., & Liu, G. (2016). Application of synthetic NDVI time series blended from landsat and MODIS data for grassland biomass estimation. *Remote Sensing*, 8(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/rs8010010>