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

**Análise hiperespectral de folhas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú
submetidas a doses crescentes de nitrogênio**

Mitsuhiko Reinaldo Hashioka Takushi

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2018**

Mitsuhiko Reinaldo Hashioka Takushi
Tecnólogo em Mecanização em Agricultura de Precisão

Análise hiperespectral de folhas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú submetidas a doses crescentes de nitrogênio

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

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

Takushi, Mitsuhiko Reinaldo Hashioka

Análise hiperespectral de folhas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú submetidas a doses crescentes de nitrogênio / Mitsuhiko Reinaldo Hashioka Takushi. - - Piracicaba, 2018.

79 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Teor foliar de nitrogênio 2. Predição de nitrogênio 3. Análise discriminante linear 4. Regressão por quadrados mínimos parciais 5. Índice de vegetação I. Título

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, criador de todas as coisas, pelo conforto nos meus momentos de tristeza e desânimo, e por toda a força que Ele me concedeu para chegar onde estou e ser quem eu sou.

Ao Prof. Dr. Peterson Ricardo Fiorio, pelos ensinamentos, pela paciência e por todo suporte técnico e científico durante todo o trabalho, e principalmente pelo apoio inicial para que fosse possível a minha vinda à cidade de Piracicaba.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao Departamento de Engenharia de Biossistemas e aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela oportunidade e troca de conhecimento essenciais para minha formação.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À Amparo e ao Hugo pela amizade e apoio nos árduos momentos em campo, pelas festas e comemorações por cada etapa do nosso projeto, pelos momentos tristes e felizes que passamos juntos, e pelo apoio técnico que demos um ao outro.

À Thuane pela grande amizade e por ter sido minha “coorientadora” nesses anos, pelo carisma e apoio que foram importantes e pelo grande apoio técnico que me foi provido.

À minha *abuelita* Ana, *ojichan* Mitsuhiro e *uncle* Christian pelo apoio emocional e financeiro.

À minha namorada Jordana pelo carinho e suporte emocional desde o início do mestrado.

Ao meu casal de amigos Daniel e Lorena, que os considero como família, pelo apoio emocional.

À república Piracicasa (Amélia, Bruno, Cleverson, Rafael, Rodolfo e Rodrigo) pela amizade, companheirismo e paciência.

Aos colegas de laboratório (Ana, Erica, Maurício, Miller, Pedro, Taila e Tiago) pelo apoio emocional e técnico.

À Piracicaba, cidade tão acolhedora e que me trouxe amigos que guardarei com muito carinho.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado!

EPÍGRAFE

“IF THERE IS NO STRUGGLE, THERE IS NO PROGRESS.”
(FREDERICK DOUGLASS)

“NINGUÉM CRESCE SOZINHO.”
(SHUNJI NISHIMURA)

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. <i>Brachiaria brizantha</i> cv. Marandú e a importância do nitrogênio na pastagem	13
2.2. Influência fisiológica do nitrogênio sobre a planta	15
2.3. Espectroscopia de reflectância na vegetação.....	18
2.4. Utilização de sensores remotos no monitoramento do nitrogênio em culturas	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1. Características da área experimental	25
3.2. Instalação do experimento: Parcelas e Tratamentos.....	26
3.3. Manejo da pastagem	26
3.4. Coleta de folhas e aquisição de dados	27
3.5. Preparação dos dados: Remoção de ruídos e outliers.....	30
3.6. Análise descritiva	30
3.7. Análise discriminante linear (LDA)	31
3.8. Análise de regressão por quadrados mínimos parciais (PLSR).....	31
3.9. Índices de vegetação.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Resposta espectral de folhas de <i>B. brizantha</i> cv. Marandú e teste de comparação de médias.....	35
4.2. Análise Discriminante do espectro de folhas de <i>B. brizantha</i> cv. Marandú.....	47
4.3. Regressão para predição do teor de nitrogênio de folhas de <i>B. brizantha</i> cv. Marandú.....	57
4.4. Performance dos Índices de Vegetação de folhas de <i>B. brizantha</i> cv. Marandú.....	65
5. CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS	71

RESUMO

Análise hiperespectral de folhas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú submetidas a doses crescentes de nitrogênio

O sensoriamento remoto é uma estratégia que pode ajudar no monitoramento da qualidade das pastagens. Objetivou-se com esse estudo analisar a resposta espectral das folhas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú, adubada com doses crescentes de ureia, para diferenciar e prever teores foliares de nitrogênio (TFN). Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso (DBC), composto por quatro blocos e quatro tratamentos, totalizando 16 parcelas. Foram utilizadas doses crescentes de adubação com ureia: 0, 25, 50, 75 kg de N/ha/corte. Ao longo do experimento foram realizadas 7 coletas, sendo coletadas 8 folhas por parcela. Essas folhas foram submetidas à análise hiperespectral e posterior análise química do teor de nitrogênio. Ao analisar a resposta espectral das folhas, observou-se diferenças estatísticas entre os tratamentos na região do visível em todas as coletas, com ênfase na região de 550 nm (verde). Por meio de análise discriminante linear (LDA) realizada para cada coleta, os centróides gerados por todos os tratamentos apresentaram diferenças significativas, com exceção do LD1 nas coletas 6 e 7 que não apresentou distinção entre os tratamentos de 50 e 75 kg de N/ha/corte, e LD2 na coleta 5 que não apresentou distinção entre os tratamentos de 0 e 50 kg de N/ha/corte. As equações de regressão multivariada obtidas pelo método de quadrados mínimos parciais (PLSR), geraram valores razoáveis a bons de R^2 (0,53 a 0,83) na predição dos TFN, onde os comprimentos de onda com maior peso nessas regressões estão na região do *red edge* (715 a 720 nm). Por fim, ao testar a performance de alguns Índices de Vegetação da literatura, as coletas 4, 6 e 7 apresentaram bons coeficientes de determinação (R^2) que variaram de 0,65 a 0,73; uma característica em comum nos índices que melhor estimaram os TFN é a presença de comprimentos de ondas que fazem parte da região do *red edge*.

Palavras-chave: Teor foliar de nitrogênio; Predição de nitrogênio; Análise discriminante linear; Regressão por quadrados mínimos parciais; Índice de vegetação

ABSTRACT

Hyperspectral analysis of *Brachiaria brizantha* cv. Marandú leaves under contrasting nitrogen levels

Remote sensing is a set of techniques that can help to monitor pasture quality. The object of this study is to analyze the spectral response from *Brachiaria brizantha* cv. Marandú leaves, under contrasting nitrogen levels, to differentiate and predict leaf nitrogen content. The treatments were set in a Randomized Block Design, composed of four blocks and four treatments, totaling 16 plots. Increasing doses of urea fertilization were used: 0, 25, 50, 75 kg N/ha/mowing. During the experiment, 7 data collections were performed, and 8 leaves per plot were extracted for each data collection. These leaves were submitted to hyperspectral data extraction and subsequent chemical analysis to quantify the nitrogen content. When analyzing the spectral pattern of the leaves, statistical differences among samples with different nitrogen levels were noticeable in the visible range of the spectrum in all the collections, with emphasis on the 550 nm region (green). Through linear discriminant analysis (LDA), performed for each collection, the generated centroids by the samples of each nitrogen level presented significant differences, except for LD1 in collections 6 and 7, which did not present a distinction between treatments of 50 and 75 kg of N/ha/mowing, and LD2 in collection 5 that did not distinguish between treatments of 0 and 50 kg of N/ha/mowing. The partial least square regression (PLSR) method generated reasonable to good values of R^2 (0.53 to 0.83) for the prediction of leaf nitrogen content, where the wavelengths with the highest coefficient in these models are in the red edge region of the spectrum (715 to 720 nm). Finally, when testing the performance of some Vegetation Indexes from literature, collections 4, 6 and 7 presented good determination coefficients (R^2) ranging from 0.65 to 0.73; a common feature in the indexes that best estimate the nitrogen content is the presence of wavelengths from the red edge region of the spectrum.

Keywords: Leaf nitrogen content; Nitrogen prediction; Linear discriminant analysis; Partial least square regression; Vegetation index

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema dos principais passos da fotossíntese de plantas C ₄ e suas interações.....	16
Figura 2.2. Curva de fator de reflectância típica de uma folha verde.....	18
Figura 2.3. Deslocamento do <i>red edge</i> em folhas de Acer com diferentes quantidades de clorofila ...	22
Figura 3.1. Localização da área experimental	255
Figura 3.2. Croqui do delineamento experimental e posição dos aspersores presentes na área	26
Figura 3.3. Linha do tempo das atividades em campo para aquisição dos dados.....	27
Figura 3.4. Manejo de pastagem.....	27
Figura 3.5. Sequência da coleta de folhas	28
Figura 3.6. Croqui representativo dos pontos de coleta	28
Figura 3.7. Sequência para obtenção dos dados hiperespectrais	29
Figura 4.1. Respostas espectrais de folhas de <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 1	36
Figura 4.2. Respostas espectrais de folhas de <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 2	37
Figura 4.3. Respostas espectrais de folhas de <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 3	38
Figura 4.4. Respostas espectrais de folhas de <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 4	40
Figura 4.5. Respostas espectrais de folhas de <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 5	41
Figura 4.6. Respostas espectrais de folhas de <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 6	42
Figura 4.7. Respostas espectrais de folhas de <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 7	43
Figura 4.8. Respostas espectrais da região do visível e teor de nitrogênio de folhas de <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú	455
Figura 4.9. Análise discriminante da Coleta 1 e teste de comparação de médias dos centroides.	48
Figura 4.10. Análise discriminante da Coleta 2 e teste de comparação de médias dos centroides.	50
Figura 4.11. Análise discriminante da Coleta 3 e teste de comparação de médias dos centroides.	51

Figura 4.12. Análise discriminante da Coleta 4 e teste de comparação de médias dos centroides.	53
Figura 4.13. Análise discriminante da Coleta 5 e teste de comparação de médias dos centroides.	54
Figura 4.14. Análise discriminante da Coleta 6 e teste de comparação de médias dos centroides.	55
Figura 4.15. Análise discriminante da Coleta 7 e teste de comparação de médias dos centroides.	56
Figura 4.16. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais das Coletas 1, 2, 3 e 5 para estimativa do teor de nitrogênio foliar da <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú	59
Figura 4.17. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais da Coleta 4 para estimativa do teor de nitrogênio foliar da <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú	61
Figura 4.18. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais da Coleta 6 para estimativa do teor de nitrogênio foliar da <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú	62
Figura 4.19. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais da Coleta 7 para estimativa do teor de nitrogênio foliar da <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú	63
Figura 4.20. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais Geral para estimativa do teor de nitrogênio foliar da <i>B. Brizantha</i> cv. Marandú	64

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio é um dos principais setores que movem a economia brasileira, sendo que a área empregada para produção de pastagens é maior quando comparada com demais culturas agrícolas. A *Brachiaria brizantha* cv. Marandú está presente em pelo menos 50% de toda a pastagem introduzida no cerrado, evidenciando a hegemonia desta cultivar na agropecuária brasileira (EMBRAPA, 2018). A produção agrícola é cada vez mais tecnificada e por se tratar de uma cultura que abrange extensas áreas do país, existe a necessidade de se realizar um manejo adequado que vise o aumento da produtividade, conservando o solo e diminuindo a degradação ambiental.

Um fator primordial para a melhoria da produção de forragem é a adubação, sendo a nitrogenada de suma importância para a altura e a produtividade das pastagens. Porém, a adubação nitrogenada é feita, muitas vezes, de forma desequilibrada em diversas regiões do país. Algumas áreas não recebem a dose suficiente para aproveitar o máximo potencial produtivo da terra e da forrageira, enquanto que outras recebem uma sobredose gerando desperdício de insumo.

Forrageiras com deficiência de nitrogênio possuem a capacidade fotossintética reduzida, apresentam subprodução de biomassa e uma qualidade inferior. Em contrapartida, a absorção de nitrogênio pela planta pode ser impossibilitada, mesmo quando esse nutriente se encontra em excesso no solo, devido aos processos físico-químicos (volatilização, lixiviação e imobilização por microrganismos). Estes processos ocasionam problemas ambientais, tais como a contaminação de lençóis freáticos e poluição atmosférica. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de estratégias de diagnóstico nutricional das plantas forrageiras, para determinar o melhor manejo e momento correto para aplicação de adubações.

O sensoriamento remoto é uma estratégia que pode ajudar no monitoramento da qualidade das pastagens. Sensoriamento remoto é a ciência que estuda a extração de informação de objetos ou áreas a uma certa distância com o auxílio de veículos, tais como aeronaves e satélites. Tal ciência tem progredido devido aos avanços tecnológicos que provêm os recursos necessários para realizar o monitoramento. Uma das técnicas de sensoriamento é chamada de análise hiperespectral, que utiliza luz (natural ou artificial) para realizar análise físico-química de uma matéria com equipamentos de alta resolução espectral. A obtenção desses dados pode ser feita com sensores hiperespectrais que farão leituras na folha ou no dossel da planta sem destruição do tecido vegetal, ao contrário de técnicas tradicionais em laboratório que além de destruir componentes da planta, são de custo elevado e demoram para serem realizadas.

A partir de dados hiperespectrais, é possível o uso de várias ferramentas estatísticas para descobrir quais informações da curva espectral podem ser úteis para detectar a necessidade da planta por nitrogênio e a quantidade do mesmo, e desta forma, ajudar o produtor a obter alta produtividade de suas pastagens a partir diagnósticos imediatos. Isto seria uma forma de pôr em prática um dos preceitos da agricultura de precisão que visa melhorar o manejo de cultivos por encontrar uma harmonia entre o uso de insumos agrícolas e a heterogeneidade espacial que a lavoura ou pastagem apresenta.

Trabalhos que buscam correlação da resposta eletromagnética da planta com atributos nutricionais estão avançados para culturas como trigo, cana de açúcar, milho, beterraba, soja, entre outras; ao passo que culturas como forrageiras, particularmente as pastagens (cultura de maior predominância territorial), não tem sido o foco da comunidade científica nos últimos anos. Assim seria possível se diferenciar doses aplicadas a pastagens ou até mesmo prever o teor de nitrogênio na folha utilizando-se da radiação eletromagnética.

Objetivou-se com esse estudo analisar a resposta espectral das folhas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú, adubada com doses crescentes de ureia, para diferenciar e prever teores foliares de nitrogênio (TFN) em diferentes cortes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. *Brachiaria brizantha* cv. Marandú e a importância do nitrogênio na pastagem

O agronegócio move a economia do Brasil com setores com forte potencial de crescimento. E dentro desse contexto, o país aparece, em 2015, como o maior produtor, consumidor e exportador de sementes de plantas forrageiras, contando com cerca de 115 milhões de hectares de pastagens cultivadas, das quais aproximadamente 51,4 milhões de hectares encontram-se estabelecidas com *B. brizantha* cv. Marandú (EMBRAPA, 2016). Tal cultivar está presente em pelo menos 50% de toda a pastagem introduzida no cerrado, evidenciando a hegemonia desta cultivar na agropecuária brasileira (EMBRAPA, 2018).

A *Brachiaria brizantha* cv. Marandú foi lançada nos anos 70, sendo recomendada para cerrados de média a boa fertilidade. O nome “Marandú” veio do Guarani e significa “Novidade”, escolhido por expressar, na época, o destaque desta nova cultivar para o cerrado. Como características agronômicas e zootécnicas, a *Brachiaria brizantha* cv. Marandú apresenta bom valor nutricional; resistência às cigarrinhas-das-pastagens; tolerância ao frio e à seca; alta produção de massa verde e de sementes viáveis; persistência e boa capacidade de rebrota. Ela é indicada para a produção animal por, além das características supracitadas, aceitar pastejo rotacionado, e ser utilizada para a produção de feno e silagem de qualidade (EMBRAPA, 1984).

Por se tratar de uma cultura que abrange extensas áreas do país, existe a necessidade de se realizar um manejo mais adequado, sobretudo de adubação, visando o maior aproveitamento dos recursos. O nitrogênio, entre todos os nutrientes, é quantitativamente o mais importante para o crescimento (MONTEIRO *et al.*, 2004) e o segundo limitador para o desenvolvimento de pastagens (JARVIS *et al.*, 1995). O nitrogênio está presente em proteínas, cloroplastos e em outras moléculas que participam da síntese dos compostos orgânicos que compõem a estrutura vegetal, e, portanto, é responsável por características relacionadas ao tamanho das plantas, tais como tamanho de folhas e caule, e emergência e desenvolvimento da parte aérea (WERNER, 1986).

O nitrogênio estimula os pontos de crescimento presentes nas gemas axilares das plantas (RYLE, 1964), ocasionando maior aparecimento de perfilhos e, conseqüentemente, uma maior densidade populacional (JEWISS, 1972). Com o passar do tempo, o peso do perfilho é o responsável pelo aumento na produção de matéria seca do capim-Marandú (ALEXANDRINO *et al.*, 2004). Se o manejo da adubação nitrogenada for mantido constante, e dependendo do

intervalo de corte, o incremento de nitrogênio pode levar ao aumento na proporção de perfilhos reprodutivos (SARMENTO *et al.*, 2005; LAFARGE, 2006).

O aproveitamento do nitrogênio presente no solo é baixo porque ele está presente em combinações orgânicas, ficando indisponível para ser absorvido pelo sistema radicular das plantas. Então, faz-se necessário o uso da adubação nitrogenada com o intuito de complementar a quantidade fornecida pelo solo e aumentar a produtividade da forragem (OKUMURA; MARIANO, 2012). O estudo realizado por Cardoso *et al.* (2015), que avaliaram o efeito de duas fontes (ureia e sulfato de amônio) e três doses de nitrogênio (170, 340 e 510 kg/ha/ano) na produção do capim-Marandú, mostrou que a altura e a produtividade das plantas aumentam com a adubação de nitrogênio em ambas as fontes. Estes resultados reforçam àqueles encontrados por Martins *et al.* (2006), que avaliariam a produção de matéria seca em pastagens degradadas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú e *Panicum maximum* cv. Mombaça em resposta à adubação com nitrogênio, fósforo e potássio, e encontraram que o nitrogênio foi o nutriente que proporcionou maiores produções de matéria seca em ambas as cultivares.

A deficiência de nitrogênio retarda o desenvolvimento da planta, pois reduz o crescimento das folhas e do sistema radicular; reduz o número de perfilhos; leva ao envelhecimento precoce das folhas; causa o alongamento desproporcional do sistema radicular, com menor quantidade de raízes laterais. Além disso, é possível observar a presença de clorose nas folhas, apresentando a coloração amarelada em forma de “V” nas extremidades do limbo foliar. Para evitar a deficiência de nitrogênio na planta, é recomendado um teor médio de 13 a 20 g de N/kg da parte aérea do capim-Marandú (EMBRAPA, 2007).

Os sinais de deficiência aparecem em decorrência à redistribuição, via floema, dos nutrientes nas plantas, no qual um nutriente pode ser carregado de uma folha velha para uma mais nova. Os elementos são classificados quanto à mobilidade na planta - móveis (N, P, K, Mg, Cl, Mo), pouco móveis (S, Cu, Fe, Mn, Zn) e imóveis (Ca, B) - que apresenta relevância prática. Quando há a diminuição no suprimento de nutrientes, começam a aparecer os sinais de carência dos elementos móveis e pouco móveis nas folhas velhas e dos elementos imóveis nas folhas e nos órgãos mais novos (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

A identificação e a correção da deficiência podem ocorrer dentro do mesmo ano, uma vez que o intervalo de tempo entre os cortes ou entre as fases de pastejo é curto, possibilitando a calagem ou a fertilização ao final de cada ciclo. A correta identificação das deficiências nutricionais da forragem é de suma importância para solucionar o problema (EMBRAPA, 2007).

2.2. Influência fisiológica do nitrogênio sobre a planta

A adubação nitrogenada causa mudanças na estrutura do dossel pois estimula a formação de tecidos, principalmente tecidos foliares (OLIVEIRA *et al.*, 2007). Além disso, a adubação proporciona o aumento da área foliar da planta por incrementos no crescimento e na expansão da folha e, portanto, resulta em maior área de interceptação luminosa (GARCEZ, 2013). Este efeito provavelmente se dá porque o fornecimento de nitrogênio aumenta o sequestro de carbono da atmosfera (DUPAS *et al.*, 2016), aumentando a taxa fotossintética com consequente incremento da produção de fibra e forragem (LUYSSAERT *et al.*, 2008).

A ureia é um fertilizante utilizado no Brasil como fonte de nitrogênio para as plantas, com baixo custo, alta concentração de nitrogênio, facilidade de produção e boa solubilidade (CANTARELLA, 2007). No solo a ureia ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) passa pela hidrólise catalisada pela enzima urease, liberando compostos que são absorvidos pela raiz da planta (amônio - NH_4^+ -, íon nitrato - NO_3^- - após sofrer nitrificação, e em menor concentração, aminoácidos ou peptídeos) ou perdidos pela lixiviação e/ou volatilização. O processo de hidrólise da ureia pode durar dois ou três dias, decorrente da forma e quantidade de ureia aplicada, da umidade, temperatura e pH do solo (REYNOLDS *et al.*, 1985). A ureia é assimilada de maneiras diferentes nas forrageiras e isso se deve aos processos metabólicos que estão associados às plantas C_3 e C_4 . Um estudo realizado por Merigout *et al.* (2008) com o objetivo de avaliar o efeito de três fontes de nitrogênio (ureia, nitrato de amônio e sulfato de amônio) no metabolismo, concluiu que a maior eficiência de utilização da ureia é vista em plantas de metabolismo C_4 e sua assimilação se dá principalmente pelas raízes.

O nitrogênio possui uma alta influência fisiológica sobre a planta por estar presente em todos os aminoácidos, proteínas e ácidos nucléicos, participando de vários processos bioquímicos. Sintomas como a queda no desenvolvimento e rendimento da cultura, mudança na arquitetura da raiz e a senescência precoce das folhas, podem ser observados quando ocorre a carência do aporte de nitrogênio. Estes sintomas são o reflexo da diminuição na síntese de clorofila, taxa fotossintética, aminoácidos essenciais, e na energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos, além da mudança de expressão de genes envolvidos no metabolismo de carbono e nitrogênio (MALAVOLTA *et al.*, 1997; HERMANS *et al.*, 2006; KANT; BI; ROTHSTEIN, 2011).

A *Brachiaria brizantha* cv. Marandú possui o metabolismo fotossintético do tipo C_4 (Figura 2.1), caracterizado por altas taxas de fotossíntese líquida, eficiência na utilização do nitrogênio, da energia solar, e na produção de fotoassimilados (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Figura 2.1. Esquema dos principais passos da fotossíntese de plantas C₄ e suas interrelações (Adaptado de CASTRO *et al.*, 2005)

O metabolismo C₄ é um sistema adicional à via C₃ que as plantas desenvolveram, principalmente as forragens. A rota de fotossíntese da C₄ possui várias alterações no desenvolvimento da folha, biologia e bioquímica celular que aumenta o suprimento de gás carbônico (CO₂) e reduz a competição entre a carboxilação e a oxigenação. Sob o ponto de vista da biologia, existe uma bainha vascular (células que circundam os feixes vasculares) e, quando essa estrutura é observada em corte transversal, tem a aparência de uma coroa (Kranz). Plantas com esse tipo de anatomia possuem cloroplastos dimórficos ocasionados pela diferença no tipo e quantidade de enzima presente; pela localização do amido que estão em maior frequência nos cloroplastos de células da bainha vascular; e pela estrutura do cloroplasto (EDWARDS *et al.*, 2004; CASTRO *et al.*, 2005). Sob o ponto de vista da bioquímica, o CO₂ entra pelas células mesofílicas e é fixado no citosol, reagindo com o fosfoenolpiruvato (PEP) para formar o oxalacetato. Posteriormente, ele pode ser reduzido a malato, na presença do NADPH, ou pode ser aminado a aspartato. As enzimas presentes no meio é que determina se a planta formará malato ou aspartato. Esses compostos são transportados até as células da bainha do feixe vascular, onde ocorre a descarboxilação para liberar CO₂ e serem regenerados em piruvato. O CO₂ liberado entra no ciclo de Calvin pela Rubisco para ser refixado. O piruvato retorna para as células mesofílicas sendo convertido em PEP para regenerar o CO₂ pela enzima fosfoenol piruvato carboxilase - PEPc (CASTRO *et al.*, 2005).

Existem várias consequências importantes para as plantas C₄ devido às suas diferenças na biologia e bioquímica celular. Uma delas é que as plantas C₄ lidam melhor com temperaturas mais altas, permitindo que seus sistemas de captação de luz possam suportar intensidades luminosas muito maiores (LONG, 1999). Além disso, a presença da bainha vascular influencia na taxa fotossintética da planta, possibilitando que a absorção de CO₂ seja muito maior, já que elas conseguem armazenar mais carbono na forma de ácidos de 4 carbonos (oxalacetato, malato e aspartato) pela Rubisco (BUCHANAN *et al.*, 2000). Assim, a planta consegue um gerenciamento melhor da abertura estomática, prevenindo a perda d'água.

A fotossíntese necessita da presença e atuação de várias moléculas e enzimas para ocorrer, e, por isso, a taxa fotossintética não pode ser contínua ao longo da vida da planta (TAIZ; ZEIGER, 2013). O processo de fotossíntese utiliza enzimas como a Rubisco, porém, o suprimento de energia (ATP) e o metabolismo de regeneração das enzimas não atendem à demanda das células fotossintéticas (YELLE *et al.*, 1989; CHEN *et al.*, 2005). Essa deficiência é o primeiro ponto de regulação do metabolismo, pois, o aumento da taxa fotossintética fica limitada pelo maior consumo da Rubisco e energia, que não são repostas na mesma velocidade.

Ao fim da fotossíntese, são liberadas cadeias de carbono ou carboidratos, que são substratos na biossíntese de outros compostos estruturais e/ou compostos do metabolismo vegetal. A síntese de aminoácidos (componentes das proteínas) é uma das principais vias dos carboidratos após serem produzidos (TAIZ; ZEIGER, 2013). Neste processo, o nitrogênio (N) é utilizado juntamente com um grupamento carboxila (COOH) e uma amina (NH₂), para serem adicionados aos carboidratos, na presença de enzimas e outros compostos. Ademais, o nitrogênio é um componente da clorofila, do ATP, e cofator da Rubisco (TAIZ; ZEIGER, 2013). Portanto, a quantidade de nitrogênio presente no interior das folhas para este metabolismo, é outro ponto de regulação da fotossíntese em curto prazo (KIM *et al.*, 2011).

Cerca de 80% do nitrogênio foliar é levado para os cloroplastos na forma de proteínas, no qual a Rubisco representa aproximadamente 20% do total de proteínas solúveis em folhas de plantas C₄ (KANT *et al.*, 2011). Durante a fase de senescência, essas proteínas são quebradas e o nitrogênio é realocado para formação dos novos tecidos para assegurar o crescimento e reprodução das plantas. Portanto, se a deficiência de nitrogênio não for suprida, ela poderá induzir a senescência das folhas mais velhas para que os tecidos mais novos consigam os compostos fotossintéticos necessários para seu desenvolvimento (MENG *et al.*, 2016).

A planta que possui maior taxa fotossintética e, conseqüentemente, maior produção de carboidratos, tem sua demanda de N aumentada, podendo levar a uma deficiência de N nas

folhas. Esta deficiência leva ao acúmulo de carboidratos que são responsáveis por outro ponto de regulação do metabolismo da planta (TRICKER *et al.*, 2004).

A absorção de água é outro ponto de regulação do metabolismo. A taxa de absorção de nitrogênio ocorre em função da taxa de absorção de água, assim, quanto menor a quantidade de água absorvida, menor quantidade nitrogênio é carregado pelo processo de absorção (MALAVOLTA, 1980), podendo agravar o estado de deficiência de N. Considerando essa menor absorção de nutrientes, pode-se supor que as exigências de adubação (principalmente nitrogenada) sejam maiores em ambientes que influenciem a absorção de água. Além disso, a maior taxa fotossintética faz com que a demanda por nutrientes também aumente.

2.3. Espectroscopia de reflectância na vegetação

O estudo da espectroscopia de reflectância, mais conhecido como sensoriamento remoto, é utilizado na agricultura a partir da interação da radiação solar com o alvo, podendo ser o solo ou a vegetação (MULLA, 2013). Essa interação é realizada de três formas: absorção, transmissão e reflexão (Figura 2.2).

Figura 2.2. Curva de fator de reflectância típica de uma folha verde (Adaptado de Novo, 2010).

A energia da radiação absorvida pela folha participa dos processos de fotossíntese, respiração e transpiração, acelera a reação de foto-oxidação das xantofilas, altera e/ou destrói estruturas moleculares. A energia é então transmitida pelos constituintes da folha, como a cutícula, o parênquima paliádico e o lacunoso. A porção da radiação que é refletida é a mais

utilizada por ser facilmente estudada através dos sensores orbitais e sub orbitais. Portanto, de acordo com Moreira (2011), a intensidade de cada uma das formas de radiação está intimamente relacionada com a estrutura física/química da folha (Figura 2).

Alguns fatores alteram as regiões do espectro eletromagnético. A região do visível situa-se entre 400 e 720 nm do espectro eletromagnético, corresponde à radiação absorvida para o acúmulo de biomassa, sendo influenciada pelos pigmentos da folha, como carotenos, xantofilas e clorofilas “a” e “b”, que absorvem a maior parte da radiação que incide a superfície foliar convertendo-a em calor ou fluorescência (MOREIRA, 2011; PONZONI *et al.*, 2012). Os carotenos e as clorofilas absorvem a radiação nas regiões de 480 e 620 nm, respectivamente, deixando a reflectância menor que 20% (NOVO, 2010). A percepção da cor verde da planta se dá por volta do comprimento de 560 nm do espectro eletromagnético, no qual se observa pequeno aumento na reflectância. Além disso, existe um aumento na resposta espectral na região do vermelho (620 nm) que está relacionada com a diminuição dos pigmentos e da água nas folhas senescentes (TODD *et al.*, 1998).

O pico característico na região do verde por volta de 550 nm se deve as altas concentrações de clorofila e nitrogênio, como constatado em trabalhos feitos em folhas de abacateiro (ABDULRIDHA *et al.*, 2018), sorgo (SINGH *et al.*, 2017) e diversas árvores tropicais (ASNER; MARTIN, 2008).

Um estudo realizado por Asner e Martin (2008) mostrou que a região entre 510 e 730 nm teve maior peso para determinação da clorofila. Enquanto que para a determinação de carotenoides, a região mais expressiva foi entre 550 e 707 nm. Estes resultados foram similares às conclusões encontradas no trabalho de Gitelson *et al.* (2002) em folhas de castanheira, onde a região do verde (530 a 550 nm) teve forte relação com os níveis de clorofila com R^2 maior que 0,92.

Singh *et al.* (2017) realizaram um estudo com objetivo de identificar características espectrais mais sensíveis à deficiência de nitrogênio no sorgo, e detectaram grande sensibilidade aos níveis de nitrogênio na região do verde, por volta dos 595 nm, além de mudanças na posição do *red edge* (701 nm foi o ponto de inflexão adotado pelo autor).

A região do infravermelho próximo situa-se entre 720 e 1100 nm do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2011), apresenta a reflectância próximo a 40%, que pode ser explicada pelo aumento de espaços vagos entre os mesófilos esponjosos (LIU, 2015), pelo número de camadas celulares e, indiretamente, pela quantidade de água presente na folha (PONZONI *et al.*, 2012).

A região do infravermelho médio situa-se entre 1100 e 3200 nm do espectro eletromagnético (MOREIRA, 2011) e possui a reflectância alterada pela quantidade de água presente na folha. A água absorve a radiação que incide na região entre 1300 e 2000 nm (PONZONI *et al.*, 2012) diminuindo assim a energia refletida. Portanto, a região do infravermelho acaba sendo a mais influenciada pela espécie vegetal, pois é sensível às diferenças da estrutura celular (GRANT *et al.*, 2012).

As alterações observadas nas respostas espectrais das plantas nas regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, determinam o estresse nutricional das culturas agrícolas (CURRAN, 1989). Além das propriedades das folhas, a estrutura do dossel, as condições atmosféricas e o solo alteram a resposta espectral do dossel e mostra o estado fisiológico da planta (DORIGO *et al.*, 2007). Portanto, faz-se necessário a criação de modelos espectrais que minimizem os efeitos da condição atmosférica e do solo, com a utilização de índices de vegetação que expliquem melhor a concentração do nitrogênio na planta, a fim do uso no monitoramento do crescimento das culturas.

Já é conhecido que os índices de vegetação aumentam a sensibilidade da reflectância ao nitrogênio foliar e diminuem de forma efetiva o efeito das variações externas (ZHAO *et al.*, 2007). Os pesquisadores da década de 60 que iniciaram os estudos das características biofísicas de plantas com a utilização de índices de vegetação (medidas radiométricas adimensionais), que são relacionados com o índice de área foliar e teor de clorofila, a porcentagem de cobertura verde, biomassa verde e radiação fotossinteticamente ativa absorvida, evidenciando a atividade e a abundância relativa da vegetação verde (JENSEN, 2009). A partir daí foram criados vários índices: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), Índice de Vegetação Ajustado por Solo (SAVI - Soil Adjusted Vegetation Index), Índice de Vegetação da região espectral Verde (GVI - Green Vegetation Index), Índice de Vegetação Reverso (RVI - Reverse Vegetation Index), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada da região espectral Verde (GNDVI - Green Normalized Difference Vegetation Index), entre outros (RAMIREZ; ZULLO JUNIOR, 2010).

Esses índices de vegetação têm sido utilizados genericamente com várias finalidades até hoje, porém, com o avanço da tecnologia vieram sensores hiperespectrais que permitem escolhas de bandas espectrais para fins específicos. A resposta espectral varia ao longo do ciclo das culturas agrícolas, sendo que o modelo criado para um parâmetro específico pode ter melhor resultado durante uma determinada fase da cultura, o que nem sempre condiz com a fase de interesse técnico da mesma (LI *et al.*, 2010).

2.4. Utilização de sensores remotos no monitoramento do nitrogênio em culturas

O uso de sensores ópticos já está fundamentado na literatura como uma forma não destrutiva de avaliar diferentes amostras, com economia de tempo e reagentes, sendo bastante eficiente para determinar o estado nutricional da planta, sobretudo do nitrogênio foliar (SHAVER *et al.*, 2011; RANJAN *et al.*, 2012). O nitrogênio presente na folha pode auxiliar no diagnóstico das deficiências, que acabam comprometendo a produtividade das culturas. Assim, a estimativa do teor de nitrogênio foliar dá suporte ao uso correto de fertilizantes na plantação (WANG; LI, 2012).

Foram realizados alguns estudos no Brasil com sensores hiperespectrais para avaliar algumas culturas como a cevada, cana de açúcar, o milho e trigo (MOLIN *et al.*, 2010; AMARAL; MOLIN, 2014; ROSA *et al.*, 2015). Porém, os sensores que têm no mercado utilizam apenas alguns comprimentos de onda, não permitindo alterações. Assim, o uso desses sensores nas diferentes culturas parte do pressuposto que estas faixas do espectro irão representar o estado nutricional das plantas estudadas.

Estudos realizados com arroz e trigo com o intuito de avaliar um novo índice de vegetação relacionado ao teor de nitrogênio foliar, conseguiram obter resultados melhores do que os já citados em algumas literaturas (RYU *et al.*, 2009; LI *et al.*, 2010). O trigo cultivado na região do mediterrâneo apresentou bons resultados na correlação entre o teor de nitrogênio e os índices de vegetações avaliados, que utilizavam comprimentos de onda da região do *red edge*, encontrado no limite da região do vermelho e infravermelho próximo (CAMMARANO *et al.*, 2014).

Uma pesquisa realizada por Gitelson e Merzlyak (1994) resultou na criação de dois índices ao analisar o padrão espectral das folhas de Acer (*Acer platanoides* L.). Eles obtiveram como resposta a região mais sensível ao conteúdo de clorofila (705 nm), e a região minimamente sensível (750 nm) que foi usado como referência na criação de seu índice da Relação Simples (SR₇₀₅ - Simple Ratio 705). Além disso, baseado no NDVI, usou os mesmos comprimentos de onda para criação do NDVI modificado (mNDVI - modified Normal Difference Vegetation Index), obtendo bons resultados de predição para os dois índices.

Dash e Curran (2004) criaram o índice MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index), limitado pelas bandas específicas que o satélite MERIS disponibilizava, projetado para detectar mudanças na posição do *red edge* (681 nm, 709 nm e 754 nm) na resposta espectral do dossel

de Acer (*Acer macrophyllum*), pois a deslocação da mesma mostrou correlação com a degradação da clorofila na literatura (Figura 2.3).

Figura 2.3. Deslocamento do *red edge* em folhas de Acer com diferentes quantidades de clorofila. Isso ocorre através da mudança gradual da amostra 1 (mais clorofila) à amostra 6 (menos clorofila) (GITELSON *et al.*, 1994).

Pesquisadores que realizaram um estudo para avaliar o uso do sensoriamento remoto em batatas para monitorar o estresse por nitrogênio observaram que, o MTCI obteve os melhores resultados, pois apresentaram valores elevados do coeficiente de determinação (R^2) e menores pra o erro quadrático médio (RMSE), que mostram a confiabilidade do índice (NIGON *et al.*, 2015).

Gupta, Vijayan e Prasad (2003) tiveram uma abordagem diferente para detectar a mudança de posição do *red edge* a fim de mensurar o conteúdo de clorofila. Observando a resposta espectral do dossel do trigo por 64 dias, indentificaram o ponto de inflexão do *red edge* por volta dos 729 nm. A partir disso, foram ajustados 4 índices de razão simples (RI-1dB, RI-2dB, RI-3dB e Ri-half) para testar a eficácia na predição.

O Índice da Diferença Normal Modificada (mND₇₀₅ - Modified Normal Difference Index) foi criado por Sims e Gamon (2002) que utilizaram três tipos de índices primários (SR, NDVI e ND_{index}) em sua formação. Esse índice foi desenvolvido para predição do teor de pigmentos de folhas, não sendo sensível às espécies e à variação da estrutura foliar e, portanto, pode ser aplicado em estudos de sensoriamento remoto em larga escala sem calibração

extensiva. Diferente dos demais índices, este utiliza para sua predição, além dos comprimentos de onda do *red edge* (705 e 750 nm), um comprimento de onda da região do azul (445 nm).

Em um estudo para detectar deficiência de nitrogênio com a resposta espectral do dossel de trigo, o índice da Diferença Normalizada *Red edge* (NDRE - Normalized Difference *Red edge*) usado por Rodriguez *et al.* (2006) tem o mesmo princípio do MTCI de detectar mudanças na posição do *red edge*, porém este índice usa uma banda do *red edge* (720 nm) e outra banda do infravermelho próximo (790 nm).

Amaral e Molin (2014) avaliaram alguns índices de vegetação na resposta nitrogênio em canaviais. Assim, eles determinaram os comprimentos de onda da região do visível (590 nm) e do infravermelho próximo (880 nm) que seriam utilizados no índice nomeado de Inverso da Razão Simples (ISR - Inverse of the Simple Ratio). Tal índice apresentou melhores resultados sobre produtividade em resposta a fertilização com nitrogênio.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada do Verde (GNDVI - Green Normalized Difference Vegetation) foi criado por Gitelson, Kaufman e Merzlyak (1996), que utilizaram o NDVI como índice primário. Os autores definiram as bandas espectrais com sensibilidade para a clorofila “a” e centraram uma banda do verde (550 nm) para ser utilizada. Assim, eles concluíram que o GNDVI foi muito mais sensível à concentração de clorofila ($r > 0,96$), em uma ampla gama de variações, do que o NDVI original, e permitiu uma estimativa precisa da concentração desse pigmento.

Alguns estudos foram realizados com intuito de monitorar o nitrogênio presente na planta a partir de dados hiperespectrais como, por exemplo, arroz (YI *et al.*, 2012), milho (ERDLE; MISTELE; SCHMIDHALTER, 2011), beterraba (MAHLEIN, 2013), feijão (REDDY; MATCHA, 2010), trigo (OERKE; STEINER, 2010; WEST *et al.*, 2010), soja (NUTTER *et al.*, 2010), pastagem (BIEWER; FRICKE; WACHENDORF, 2009; SKIDMORE *et al.*, 2010; KNOX *et al.*, 2011), entre outros. Contudo, ainda não foram encontrados trabalhos na literatura para *Brachiaria brizantha* cv. Marandú. Assim, faz-se necessário o estudo com sensores hiperespectrais a fim de obter as informações necessárias para um manejo correto.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Características da área experimental

O experimento foi conduzido na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), campus da Universidade de São Paulo (USP), localizada na cidade de Piracicaba-SP, em uma área situada nas seguintes coordenadas geográficas (Datum WGS-84): latitude - 22°42'16"S; longitude -47°37'23"W; altitude aproximada de 532 m (Figura 3.1).

Figura 3.1. Localização da área experimental

A forrageira utilizada foi a *Brachiaria brizantha* cv. Marandú, plantada à lanço em 5 de abril de 2016 em um solo classificado como Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico segundo classificação brasileira de solos da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA, 2006). O clima da região é do tipo CWa (zona subtropical úmida com inverno seco e verão quente) segundo a classificação de Köppen (KOTTEK *et al.*, 2006), com pluviosidade média anual de 1280 mm e temperatura média anual de 22° C, sendo a temperatura média de 25° C no mês mais quente e 18° C no mês mais frio (dados obtidos de estação meteorológica próximo a área de estudo, menos de 100 metros).

3.2. Instalação do experimento: Parcelas e Tratamentos

Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso (DBC), composto por quatro blocos e quatro tratamentos, totalizando 16 parcelas com dimensões de 4 por 5 metros (Figura 3.2).

Figura 3.2. Croqui do delineamento experimental e posição dos aspersores presentes na área.

Os tratamentos utilizados foram diferentes doses de adubação nitrogenada com ureia (46% de N em sua composição) (Tabela 1). A irrigação foi feita por aspersores já instalados na área, que supria a cultura no período de déficit hídrico, e realizada de forma a garantir a umidade de solo dentro da Capacidade de Campo e Ponto de Murcha.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos e suas respectivas doses (por corte) e dose total do ciclo (por ano) resultante de oito adubações

Tratamento	Dose de N (por corte)	Dose de N do ciclo (por ano)
B0	0 kg/ha	0 kg/ha
B1	25 kg/ha	200 kg/ha
B2	50 kg/ha	400 kg/ha
B3	75 kg/ha	600 kg/ha

3.3. Manejo da pastagem

Foram realizadas 7 coletas de folhas da *Brachiaria brizantha* cv. Marandú ao longo do experimento para obtenção da leitura espectral e do teor de nitrogênio, que eram feitas um dia antes dos cortes programados (Figura 3.3).

Figura 3.3. Linha do tempo das atividades em campo para aquisição dos dados: coleta de folhas para leitura, cortes periódicos do pasto e adubações com ureia.

A Figura 3.4 mostra o manejo de pastagem adotado neste experimento, seguindo as recomendações de Mesquita *et al.* (2010). O pasto era cortado a 10 cm de altura em relação ao solo (Figura 3.4.A) com uma roçadeira costal, e o intervalo entre cortes foi de aproximadamente 30 dias quando as parcelas com maior dose de N alcançam o ápice de seu potencial produtivo, antes de alcançar a fase de senescência (Figura 3.4.B). Após cada corte, era realizada a adubação nitrogenada em diferentes doses nas parcelas.

Figura 3.4. Manejo da pastagem: A - Pastagem cortada a 10 cm de altura; B - Pastagem após 30 dias do corte.

3.4. Coleta de folhas e aquisição de dados

Para fins de padronização na coleta (realizada 7 vezes ao longo do experimento), foram obtidas as folhas “+1” (Figura 3.5.A) e colocadas em sacos plástico com suas respectivas identificações (Figura 3.5.B), as quais são plenamente desenvolvidas na parte superior da planta e apresentam desprendimento total da bainha com lígula membranosa (Figura 3.5.C). As folhas

foram levadas para o laboratório, em uma caixa térmica com gelo para manter a turgidez da folha (Figura 3.5.D), para realizar a leitura espectral (BATISTA; MONTEIRO, 2007).

Figura 3.5. Sequência da coleta de folhas: A - Representação da folha “+1”; B - Folhas coletadas mantidas em sacos com identificação de tratamento e bloco; C - Ilustração de uma lígula membranosa; D - Folhas mantidas em um container refrigerado para transporte.

Foram determinados 8 pontos de coleta dentro de cada parcela para extração de uma folha por ponto, totalizando 128 folhas, que tiveram duas leituras espectrais por folha (Figura 3.6.A). Então, foram feitas amostras contendo 4 folhas (Figura 3.6.B), a fim de se atingir o peso necessário para posterior a análise de nitrogênio.

Figura 3.6. Croqui representativo dos pontos de coleta: A - Pontos dentro de cada parcela para coleta das folhas; B - Esquema de agrupamento das folhas para quantificação de N foliar em laboratório.

O aparelho utilizado para as leituras espectrais foi o espectrorradiômetro *FieldSpec 3* (ASD Inc., Boulder, Colorado, EUA), que apresenta uma amplitude espectral de 350 a 2500 nm com resolução espectral de 10 nm (Figura 3.7.A). Foi utilizado como acessório auxiliar o *LeafClip* (ASD Inc., Boulder, Colorado, EUA) que tem como função facilitar a leitura espectral na face adaxial das folhas e diminuir a influência dos fatores externos (Figura 3.7.B). Esse acessório, conectado ao espectrorradiômetro por um cabo de fibra óptica, cria uma câmara no ponto de leitura da folha, isolando-a de fontes de energia externa para que o sensor trabalhe apenas com a sua própria fonte de luz, garantindo a qualidade dos dados, além de manter a distância sensor-folha constante.

Antes das leituras, foi necessário ligar o espectrorradiômetro 30 minutos para aquecimento e estabilização da lâmpada halógena, seguido de calibração com o auxílio de um bloco cerâmico branco, presente no dispositivo *LeafClip*. A calibração com o bloco cerâmico foi feita a cada 10 minutos de leitura espectral das folhas para garantir constância e padronização dos dados.

Figura 3.7. Sequência para obtenção dos dados hiperespectrais: A - Estação de trabalho para obtenção dos dados espectrais composto pelo espectrorradiômetro *FieldSpec 3*, acessório *LeafClip* e computador para interação com os aparelhos; B - Visão aproximada do acessório *LeafClip*; C - Exemplo de leitura espectral da folha.

Foram realizadas duas leituras espectrais na face adaxial de cada folha (Figura 3.7.C), totalizando 256 leituras espectrais para cada coleta. Cada leitura representa uma média de 30 leituras seguidas (média predeterminada no software do aparelho).

Após a leitura, estas folhas foram mandadas ao Laboratório de Tecidos Vegetais, setor do Departamento de Ciência do Solo (ESALQ/USP) para determinação dos teores de nitrogênio. As folhas foram secadas, moídas e passadas por um processo de digestão sulfúrica (MALAVOLTA *et al.*, 1997) e o resultado obtido foi expresso em gramas de nitrogênio por quilo de matéria seca (g de N/kg de MS).

3.5. Preparação dos dados: Remoção de ruídos e outliers

O software do fabricante, *ViewSpec Pro* (ASD Inc., Boulder, Colorado, EUA), gerou um arquivo contendo as 256 assinaturas espectrais, que permitiu as análises posteriores dos dados obtidos em campo.

Primeiramente foi selecionado o intervalo de comprimento de ondas que seria utilizado (400 e 2350 nm) para as análises estatísticas, excluindo o restante dos comprimentos de ondas (350 a 399; e 2351 a 2500) devido à presença de ruídos nessas regiões espectrais.

Para verificar se, dentre as curvas espectrais dos tratamentos, teria algum *outlier*, foi utilizado a função de PCA (Análise de Componentes Principais) descrita por Groot *et al.* (2001), com o auxílio do software The Unscrambler 9.7 (CAMO software AS, Oslo, Noruega). A Análise de Componentes Principais tem como objetivo agrupar os dados que são altamente correlacionados, positivamente ou negativamente, e possuem variância tão baixa a ponto de ser desprezível (MANLY, 2008). O *outlier* é detectado quando os dados originais possuem baixa correlação e/ou quando a variância é alta.

3.6. Análise descritiva

O software Excel 2016 (Microsoft Corp., Redmond, Washington, EUA) foi utilizado para avaliar o padrão espectral das folhas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú em resposta à adubação nitrogenada.

Para complementar a análise do padrão espectral, foi incorporada os resultados do teste de comparação entre médias de cada comprimento de onda e do teor de nitrogênio presente nas folhas. Após um teste de Análise de Variância (ANOVA) significativo, a análise univariada dos dados espectrais foi realizada de acordo com Carvalho *et al.* (2013), utilizando o teste de Tukey HSD (Diferença Significativamente Honesta) para testar cada comprimento de onda de maneira pareada. Este teste é conservador para conjuntos de dados que possuem quantidades desiguais de amostras por tratamento e é utilizado para que a taxa do Erro tipo I continue no nível escolhido, que neste caso $\alpha = 0,01$ (QUINN; KEOUGH, 2002). Essa comparação de médias múltipla permite encontrar os comprimentos de onda que são significativamente diferentes entre os tratamentos (0; 25; 50 e 75 kg de N/ha/corte) com erros reduzidos. Além disso, foi realizada uma análise univariada dos teores de nitrogênio por tratamento pelo teste de Tukey para testar o efeito da adubação nitrogenada. A ANOVA e o teste de Tukey HSD foram

realizados para folhas da *B. brizantha* cv. Marandú nas diferentes coletas usando o software R (versão 3.3.2).

3.7. Análise discriminante linear (LDA)

A análise multivariada dos dados espectrais foi realizada pela Análise Discriminante Linear, a qual propõe o agrupamento a partir da identificação de variáveis que os distinguem (PESTANA; GAGEIRO, 2005). A Análise Discriminante (LDA - Linear Discriminant Analysis) é utilizada para avaliar o quanto é possível separar dois ou mais grupos de observações, sendo dadas medidas para essas observações em várias variáveis. Por exemplo, para o presente estudo é interessante considerar se é possível usar a resposta espectral de folhas da *B. brizantha* cv. Marandú para separar os tratamentos que utilizaram a adubação com doses crescentes de ureia. Os dados para uma Análise Discriminante não precisam ser padronizados para ter médias zero e variâncias unitárias, como é feito em outros tipos de análises multivariadas. Isso porque o resultado de uma Análise Discriminante não é afetado pelo escalonamento de variáveis individuais (MANLY, 2008). Gomez-Casero *et al.* (2007) mostraram a potencialidade dessa análise no estudo de dados hiperspectrais. A Análise de Discriminante foi realizada para folhas da *B. brizantha* cv. Marandú nas diferentes coletas usando o software R (versão 3.3.2).

3.8. Análise de regressão por quadrados mínimos parciais (PLSR)

Com o intuito de buscar os comprimentos de onda que estejam mais correlacionados com o teor de nitrogênio foliar (TNF), foram feitas análises de Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR - Partial Least Square Regression) entre os valores TNF (proveniente das análises químicas) com os valores de reflectância. O procedimento de validação cruzada selecionado foi a amostragem "*leave-one-out*", que gera modelos de regressão iterativamente com uma amostra reservada para validação do modelo. Ou seja, o procedimento "*leave-one-out*" utiliza um conjunto de dados formado por $x-1$ amostras para gerar o modelo e valida com a amostra restante. Isso é repetido de forma que todas as amostras sejam utilizadas na validação dos modelos e, por fim, é feito uma média de todos os erros

médios quadráticos (RMSE - Root Mean Square Error) e coeficientes de determinação (R^2). A precisão do modelo para predição do teor de nitrogênio foliar foi avaliada com o RMSE e o maior valor de R^2 . Todo o procedimento foi feito no software The Unscrambler 9.7 (CAMO software AS, Oslo, Noruega), de acordo com Carvalho *et al.* (2013).

O coeficiente de determinação (R^2) mostra a porcentagem da variância na variável Y que é contabilizada pela variável X. Um valor para R^2 entre 0,49 e 0,65 indica uma previsão razoável, onde mais de 50% da variância em Y é explicada pela variação em X, de modo que a discriminação entre coeficientes altos e baixos pode ser feita. Um valor para R^2 entre 0,66 e 0,90 indica uma boa previsão. Modelos com um valor de R^2 acima de 0,91 são considerados excelentes (SAEYS *et al.*, 2005).

3.9. Índices de vegetação

Foi realizado um levantamento bibliográfico de índices espectrais da vegetação, já apontados como sensíveis à variação de nitrogênio ou pigmentos fotossinteticamente ativos (Tabela 2).

Tabela 2. Índices espectrais encontrados na literatura para estimar o teor de nitrogênio foliar e os pigmentos fotossinteticamente ativos

Índices	Descrição	Fórmula	Referência
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	$(R_{780}-R_{550})/(R_{780}+R_{550})$	Gitelson; Kaufman; Merzlyak (1996)
ISR	Inverse of the Simple Ratio	R_{590}/R_{880}	Amaral; Molin (2014)
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index	$[(R_{700}-R_{670}) - 0,2(R_{700}+R_{550})] \times (R_{700}/R_{670})$	Daughtry <i>et al.</i> (2000)
MCARI1	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 1	$1,2 \times [2,5(R_{800}-R_{670}) - 1,3(R_{800}-R_{550})]$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
mND₇₀₅	Modified Normal Difference Index	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2R_{445})$	Sims; Gamon (2002)
mNDVI	Modified Normal Difference Vegetation Index	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	Gitelson; Merzlyak (1994)
MTCI	MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	$(R_{754}-R_{709})/(R_{709}-R_{681})$	Dash; Curran (2004)
MTVI1	Modified Triangular Vegetation Index	$1,2 \times [1,2(R_{800}-R_{550}) - 2,5(R_{670}-R_{550})]$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
NDI	Normalized Differential Index	$(R_{750}-R_{700})/(R_{750}+R_{700})$	Miohokasap <i>et al.</i> (2012)
NDRE	Normalized Difference Red Edge	$(R_{790}-R_{720})/(R_{790}+R_{720})$	Rodriguez <i>et al.</i> (2006)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$(R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670})$	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
PI1	Pigment Index-1	R_{750}/R_{700}	Lichtenthaler; Gitelson; Lang (1996)
PI2	Pigment Index-2	R_{750}/R_{550}	Lichtenthaler; Gitelson; Lang (1996)
RI-1dB	Ratio Index - 1dB	R_{735}/R_{720}	Gupta; Vijayan; Prasad (2003)
RI-2dB	Ratio Index - 2dB	R_{738}/R_{720}	Gupta; Vijayan; Prasad (2003)
RI-3dB	Ratio Index - 3dB	R_{741}/R_{717}	Gupta; Vijayan; Prasad (2003)
Ri-half	Ratio Index - half	R_{747}/R_{708}	Gupta; Vijayan; Prasad (2003)
RSI	Ratio Spectral Index	R_{724}/R_{700}	Miohokasap <i>et al.</i> (2012)
SR₇₀₅	Simple Ratio 705	R_{750}/R_{705}	Gitelson; Merzlyak (1994)
TVI	Triangular Vegetation Index	$0,5 \times [120(R_{750}-R_{550}) - 200(R_{670}-R_{550})]$	Broge; Leblanc (2000)

Cada um desses índices foi calculado e submetido a análise de regressão linear simples como variáveis dependentes, sendo os teores de nitrogênio foliar as variáveis independentes. Os cortes que obtiveram os melhores resultados na análise foram utilizados para fazer uma regressão geral.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resposta espectral de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú e teste de comparação de médias

O estudo do padrão espectral das folhas já vem sendo realizado como uma forma não destrutiva de avaliar diferentes amostras, com economia de tempo e reagentes, além de ser bastante eficiente para determinar o estado nutricional da planta (LI *et al.*, 2016). No presente estudo, foi obtido a resposta espectral das folhas da *B. brizantha* cv. Marandú de diferentes tratamentos com doses crescentes de ureia. Para cada coleta foram obtidas 256 curvas espectrais. De acordo com o padrão espectral das folhas de Marandú (Figuras 4.1 a 4.7), observa-se que a reflectância da região do visível (400 a 720 nm) é relativamente baixa, decorrente da alta absorção da radiação nas regiões do azul (480 nm) e do vermelho (620), que estão relacionadas a fotossíntese (SIMS; GAMON, 2002). Além disso, destaca-se um pico de reflectância na região do verde (550 nm), o que explica a coloração verde das plantas (SIMS; GAMON, 2002). Na região do infravermelho próximo (720 a 1100 nm), a reflectância aumenta para valores próximos a 40% e está relacionada à estrutura interna celular, sendo importante para que a folha mantenha o equilíbrio no balanço de energia, não superaqueça e evite a destruição da clorofila (LI *et al.*, 2016). Essas características estão relacionadas ao ganho de biomassa da forrageira em resposta à adubação nitrogenada. E, por fim, o decréscimo gradual da reflectância da região do infravermelho médio (1100 a 3200 nm) é devido à presença da água (JONG; ADDINK; FANG *et al.*, 2017; RODRIGUAZ-PEREZ *et al.*, 2018), com picos de absorção próximos a 1400 e 1900 nm. Todas essas considerações referem-se a leitura de uma única folha verde sadia.

Para complementar a análise do padrão espectral, foi incorporada aos gráficos de assinatura espectral, na parte inferior das Figuras 4.1 a 4.7, os resultados do teste de comparação entre médias (Tukey a 1% de probabilidade) de cada comprimento de onda e do teor de nitrogênio presente nas folhas (Figura 4.8). Essa comparação de médias permite encontrar os comprimentos de onda e os teores de nitrogênio foliar que são significativamente diferentes entre os tratamentos (0; 25; 50 e 75 kg de N/ha/corte).

Na primeira coleta (Figura 4.1), observa-se diferença significativa ($P < 0,01$) entre tratamentos em alguns comprimentos de onda no visível (400 a 720 nm). Na região de 480 nm, foi observado diferença significativa ($P < 0,01$) dos tratamentos; na qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância menor do que os tratamentos com adubação

(25; 50 e 75 kg de N/ha/corte). Na região de 620 nm, não foi observado diferença significativa ($P>0,01$) entre os tratamentos.

Figura 4.1. Respostas espectrais de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 1. B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Cada ponto colorido indica bandas que foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($\alpha=0,01$).

Na região do infravermelho próximo (720 a 1100 nm), houve diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral (Figura 4.1), no qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância menor do que os tratamentos com adubação (25; 50 e 75 kg de N/ha/corte). Isso possivelmente ocorreu porque o nitrogênio está relacionado a diversos processos fisiológicos da planta, entre eles, a formação de compostos da estrutura celular. Assim, a falta desse elemento promove uma diminuição da resposta espectral da região do infravermelho próximo, como já foi observado por Li *et al.* (2016).

Na região do infravermelho médio (1100 a 3200 nm), observa-se diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a reflectância das folhas (Figura 4.1). Na região entre 1300 a 2000 nm, onde se encontra a reflectância da água, foi encontrado diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral (Figura 4.1), no qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância menor, na maior parte destes comprimentos de onda, do que os tratamentos com adubação (25; 50 e 75 kg de N/ha/corte).

Possivelmente, a ausência de diferenças expressivas na primeira coleta (Figura 4.1) se deve a dose de nitrogênio aplicada. Exemplo de adubação nitrogenada, como no experimento de Mazza *et al.* (2009), que foi adotada um tratamento de 510 kg/ha de N em uma única aplicação, resulta praticamente na dose de nitrogênio acumulada em todo o experimento (600 kg/ha de N distribuídos em 8 aplicações). As diferenças passam a se manifestar nas coletas seguintes de forma gradual.

Na segunda coleta (Figura 4.2), observa-se diferença significativa ($P < 0,01$) entre os tratamentos em alguns comprimentos de ondas da região do visível (400 a 720 nm). Na região de 480 nm, foi observado diferença significativa ($P < 0,01$) dos tratamentos; na qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância menor do que o tratamento com 50 kg de N/ha/corte. Na região de 620 nm, observa-se diferença significativa ($P < 0,01$) entre os tratamentos; na qual o tratamento com 25 kg de N/ha/corte apresentou uma reflectância menor do que os demais tratamentos (0; 50 e 75 kg de N/ha/corte).

Figura 4.2. Respostas espectrais de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 2. B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte. Cada ponto colorido indica bandas que foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($\alpha=0,01$).

Na região do infravermelho próximo (720 a 1100 nm), houve diferença estatística ($P < 0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral (Figura 4.2); apresentando o mesmo comportamento visto na região de 620 nm. Na região do infravermelho médio (1100 a 3200

nm), observa-se diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a reflectância das folhas. Na região entre 1300 a 2000 nm, onde se encontra a reflectância da água, foi encontrado diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral, na qual o tratamento com 25 kg de N/ha/corte apresentou uma reflectância menor, na maior parte destes comprimentos de onda, do que os demais tratamentos (0; 50 e 75 kg de N/ha/corte).

Na segunda coleta (Figura 4.2) era de se esperar uma menor diferenciação dos tratamentos em relação à dose de adubação aplicada, pois o suprimento de nitrogênio pode não ter causado a saturação do solo necessária para levar à capacidade máxima de absorção desse composto pela planta e, conseqüentemente, diminuiu a produção de pigmentos nas plantas.

Na terceira coleta (Figura 4.3), observa-se diferença significativa ($P<0,01$) da dose de nitrogênio em alguns comprimentos de ondas da região do visível (400 a 720 nm).

Figura 4.3. Respostas espectrais de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 3. B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Cada ponto colorido indica bandas que foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($\alpha=0,01$).

Na região de 480 nm, foi observado diferença significativa ($P<0,01$) dos tratamentos (Figura 4.3); na qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância maior do que os tratamentos com adubação (25; 50 e 75 kg de N/ha/corte). Na região de 620 nm, foi observado diferença significativa ($P<0,01$) entre os tratamentos, na qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância maior, seguido do tratamento com

25 kg de N/ha/corte e depois dos demais tratamentos. As diferenças espectrais encontradas na região do visível podem ser explicadas pelas diferenças da quantidade de pigmentos (clorofila) nas folhas dos tratamentos.

Há uma grande relação entre conteúdo de nitrogênio e clorofila. Apesar do conteúdo de nitrogênio na folha ser um parâmetro relacionado ao crescimento da planta, e o conteúdo de clorofila um indicativo da saúde de crescimento da planta; o conteúdo de nitrogênio foliar é um fator que influencia a atividade fotossintética, pois a presença de pigmentos depende das condições bioquímicas (MOHARANA; DUTTA, 2016; SONOBE; SANO; HORIE, 2018).

Na região do infravermelho próximo (720 a 1100 nm), não houve diferença estatística ($P > 0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral (Figura 4.3). Na região do infravermelho médio (1100 a 3200 nm), observa-se diferença estatística ($P < 0,01$) dos tratamentos sobre a reflectância das folhas. Na região entre 1300 a 2000 nm, onde se encontra a reflectância da água, foi encontrado diferença estatística ($P < 0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral.

Na quarta coleta (Figura 4.4), observa-se diferença significativa ($P < 0,01$) da dose de nitrogênio sobre a região do visível (400 a 720 nm). Na região de 480 nm, foi observado diferença significativa ($P < 0,01$) dos tratamentos; na qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância menor do que o tratamento com 50 kg de N/ha/corte. Na região de 620 nm, foi observado diferença significativa ($P < 0,01$) entre os tratamentos que receberam adubação nitrogenada, na qual o tratamento com 50 kg de N/ha/corte apresentou reflectância maior do que os tratamentos com 25 e 75 kg de N/ha/corte.

Figura 4.4. Respostas espectrais de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 4. B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Cada ponto colorido indica bandas que foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

Na região do infravermelho próximo (720 a 1100 nm), houve diferença estatística ($P < 0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral (Figura 4.4), na qual os tratamentos com 0 e 25 kg de N/ha/corte apresentaram uma reflectância menor do que os demais tratamentos (50 e 75 kg de N/ha/corte). Esses resultados confirmam o que foi exposto por Li *et al.* (2016) que avaliaram o efeito da adubação com ureia sobre o teor de nitrogênio foliar de colza (*Brassica napus* L.), e observaram que no platô do infravermelho próximo (750-1300 nm), a reflectância tendeu a diminuir com a diminuição das taxas de fertilização.

Na região do infravermelho médio (1100 a 3200 nm), observa-se diferença estatística ($P < 0,01$) dos tratamentos sobre a reflectância das folhas (Figura 4.4). Na região entre 1300 a 2000 nm, onde se encontra a reflectância da água, foi encontrado diferença estatística ($P < 0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral.

Na quinta coleta (Figura 4.5), observa-se diferença significativa ($P < 0,01$) da dose de nitrogênio em alguns comprimentos de ondas da região do visível (400 a 720 nm). Na região de 480 nm, foi observado diferença significativa ($P < 0,01$) dos tratamentos; na qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância maior do que o tratamento com 75 kg de N/ha/corte. Na região de 620 nm, foi observado diferença significativa ($P < 0,01$) entre os tratamentos, apresentando o mesmo comportamento visto na região de 480 nm.

Figura 4.5. Respostas espectrais de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 5. B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Cada ponto colorido indica bandas que foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($\alpha=0,01$).

Na região do infravermelho próximo (720 a 1100 nm), não houve diferença estatística ($P>0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral (Figura 4.5). Na região do infravermelho médio (1100 a 3200 nm), observa-se diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a reflectância das folhas. Na região entre 1300 a 2000 nm, onde se encontra a reflectância da água, foi encontrado diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral.

Uma vez que a folha é removida da planta, esta começa a perder água. A dissecação da folha resulta na diminuição de turgidez que pode afetar a superfície e formato da folha. Essas perdas podem alcançar de 30 a 40% em função do tempo e forma de armazenagem (JUNEAU; TARASOFF, 2012). Portanto, a presença de diferenças pouco expressivas na região espectral relativa ao conteúdo de água na folha pode ter ocorrido em função dos diferentes tempos de armazenagem (da coleta da folha até o momento da leitura espectral).

Na sexta coleta (Figura 4.6), observa-se diferença significativa ($P<0,01$) da dose de nitrogênio em alguns comprimentos de ondas da região do visível (400 a 720 nm). Nas regiões de 480 e 620 nm, foram observadas diferenças significativas ($P<0,01$) dos tratamentos; nas quais o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância maior do que os tratamentos com 50 e 75 kg de N/ha/corte.

Figura 4.6. Respostas espectrais de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 6. B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Cada ponto colorido indica bandas que foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($\alpha=0,01$).

Na região do infravermelho próximo (720 a 1100 nm), houve diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral (Figura 4.6), no qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância menor do que os tratamentos com 50 e 75 kg de N/ha/corte.

Esses resultados comprovam o estudo que diz que o padrão de mudança da reflectância espectral pode separar efetivamente os tratamentos em níveis através das características da região do visível e do infravermelho próximo, servindo como ferramenta para a construção de relações quantitativas entre as respostas espectrais e o conteúdo de nitrogênio foliar (LI *et al.*, 2016).

Na região do infravermelho médio (1100 a 3200 nm), observa-se diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a reflectância das folhas (Figura 4.6). Na região entre 1300 a 2000 nm, onde se encontra a reflectância da água, foi encontrado diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos em apenas alguns comprimentos de onda.

Na sétima coleta (Figura 4.7), observa-se diferença significativa ($P<0,01$) da dose de nitrogênio em alguns comprimentos de ondas da região do visível (400 a 720 nm). Na região de 480 nm, foi observado diferença significativa ($P<0,01$) dos tratamentos; na qual o tratamento

controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância maior, seguido do tratamento com 25 kg de N/ha/corte e depois dos tratamentos com 50 e 75 kg de N/ha/corte. Na região de 620 nm, foi observado diferença significativa ($P<0,01$) entre os tratamentos, na qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância maior do que os tratamentos com adubação (25; 50 e 75 kg de N/ha/corte).

Figura 4.7. Respostas espectrais de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú e teste de comparação de médias da Coleta 7. B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte. Cada ponto colorido indica bandas que foram significativamente diferentes pelo teste de Tukey ($\alpha=0,01$).

Na região do infravermelho próximo (720 a 1100 nm), não houve diferença estatística ($P>0,01$) dos tratamentos sobre a maior parte dos comprimentos de onda (Figura 4.7). Na região do infravermelho médio (1100 a 3200 nm), observa-se diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a reflectância das folhas. Na região entre 1300 a 2000 nm, onde se encontra a reflectância da água, foi encontrado diferença estatística ($P<0,01$) dos tratamentos sobre a resposta espectral, no qual o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou uma reflectância maior do que os tratamentos com adubação (25; 50 e 75 kg de N/ha/corte). Estes resultados evidenciam que as plantas estavam em estresse hídrico.

A variabilidade do teor de água nas folhas tem um significado considerável para as interações planta-ambiente, funcionamento e crescimento das culturas. Isso ocorre porque o estresse hídrico induz o fechamento dos estômatos que por sua vez, também reduz a fotossíntese

e a assimilação de carbono (RODRIGUEZ-PEREZ, 2018). Assim, o resultado encontrado para a região de infravermelho próximo, pode ter intensificado as diferenças entradas na região do visível (Figura 4.7).

A região do visível do espectro eletromagnético (400 e 720 nm) é influenciada pelos pigmentos da folha, como carotenos, xantofilas e clorofilas “a” e “b”, e corresponde à radiação absorvida para o acúmulo de biomassa. Os carotenos e as clorofilas absorvem a radiação nas regiões de 480 e 620 nm, respectivamente, deixando a reflectância menor que 20%. A percepção da cor verde da planta se dá no comprimento de 560 nm do espectro eletromagnético, no qual se observa pequeno aumento na reflectância. Além disso, existe um aumento na resposta espectral na região do vermelho (620 nm) que está relacionada com a diminuição dos pigmentos e da água nas folhas senescentes (SIMS; GAMON, 2002).

A importância do nitrogênio para a *B. brizantha* cv. Marandú diz respeito ao seu metabolismo fotossintético, caracterizado por altas taxas de fotossíntese líquida, eficiência na utilização do nitrogênio, da energia solar, e na produção de fotoassimilados. Como o nitrogênio é parte constituinte de várias moléculas, dentre elas a clorofila, participa direta ou indiretamente de vários processos bioquímicos, refletindo diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura (KANT; BI; ROTHSTEIN, 2011).

Foi possível diferenciar significativamente ($P < 0,01$) o teor de nitrogênio foliar (TNF) da *Brachiaria brizantha* cv. Marandú em resposta a adubação nitrogenada nas diferentes coletas na região do visível (Figura 4.8). De maneira geral, observa-se que o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou o teor de nitrogênio foliar inferior ao tratamento com 75 kg de N/ha/corte. Apenas na segunda coleta não foi observada diferença significativa ($P > 0,01$) do teor de nitrogênio foliar.

Figura 4.8. Respostas espectrais da região do visível e teor de nitrogênio de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú. B0 = 0 kg de N/ha/corte; B1 = 25 kg de N/ha/corte; B2 = 50 kg de N/ha/corte; B3 = 75 kg de N/ha/corte; MS = matéria seca.

Médias seguidas de letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,01$).

Embora a resposta espectral da região de 620 nm (vermelho), que está relacionada a fotossíntese (SIMS; GAMON, 2002), não tenha apresentado diferenças (Figura 4.1), o teor de nitrogênio foliar apresentou diferenças significativas a partir da primeira coleta (Figura 4.8). A região que apresenta forte relação com os níveis de clorofila e nitrogênio segundo Gitelson *et al.* (2002) é a de 550 nm (verde), que apresentou diferenças crescentes ao longo das coletas.

O aumento da amplitude de diferenças na região de 550 nm (verde) é constante até a coleta 7. Porém, com relação aos tratamentos nitrogenados, o aumento dessa amplitude ocorre até a coleta 4. A partir da coleta 6, nota-se uma diminuição na amplitude dos tratamentos nitrogenados na região do verde, e um ligeiro isolamento do tratamento controle. Na coleta 7, os níveis de reflectância estão notavelmente agrupados isolando a reflectância do tratamento controle. Tal fenômeno pode ser explicado por uma possível saturação na quantidade de nitrogênio no solo, causando pouca distinção entre os tratamentos nitrogenados.

Estes resultados também foram encontrados por Amaral e Molin (2014), que observaram diferença na resposta espectral a partir de 120 dias de adubação nitrogenada, quando a forrageira apresentava 40 cm de altura média. Com maior área foliar para interceptação luminosa, há aumento na taxa fotossintética com consequente incremento da produção de forragem (PILBEAM, 2011).

Conforme esperado, a medida que se aumentou a dose da adubação nitrogenada, houve um aumento na resposta do teor de nitrogênio foliar, como na região de 620 nm do espectro, que corresponde ao teor de clorofila (SIMS; GAMON, 2002). Na região de 620 nm da sexta coleta, o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentou maior reflectância, seguido do tratamento com 25 kg de nitrogênio/ha/corte com uma reflectância intermediária, e, por último dos demais tratamentos (Figura 4.6). Como já foi mencionado, o formato do espectro na região do visível está associado com os níveis de clorofila, carotenóides e antocianinas. Assim, quanto maior o teor de nitrogênio foliar, maior será a presença de pigmentos e, consequentemente, haverá maior absorção da radiação e menor reflectância (SIMS; GAMON, 2002).

Asner e Martin (2008), através da análise de quadrados mínimos parciais (PLS), detectaram que a região entre 510 e 730 nm teve maior peso para determinação da clorofila. Enquanto que para a determinação de carotenóides, a região mais expressiva foi entre 550 e 707 nm. Estes resultados foram similares às conclusões encontradas no trabalho de Gitelson *et al.* (2002) em folhas de castanheira, onde a região do verde (530 a 550 nm) teve forte relação com os níveis de clorofila com R^2 maior que 0,92.

Singh *et al.* (2017) realizaram um estudo com objetivo de identificar características espectrais mais sensíveis à deficiência de nitrogênio no sorgo, e detectaram grande

sensibilidade aos níveis de nitrogênio na região do verde, por volta dos 595 nm, além de mudanças na posição do *red edge* (701 nm foi o ponto de inflexão adotado pelo autor).

O pico característico na região do verde por volta de 550 nm se deve as altas concentrações de clorofila e nitrogênio, como constatado em trabalhos feitos em folhas de abacateiro (ABDULRIDHA *et al.*, 2018), sorgo (SINGH *et al.*, 2017) e diversas árvores tropicais (ASNER; MARTIN, 2008).

4.2. Análise Discriminante do espectro de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú

A Análise Discriminante propõe o agrupamento a partir da identificação de variáveis espectrais que os distinguem (PESTANA; GAGEIRO, 2005). Em outras palavras, as principais variáveis envolvidas (*loadings*) são utilizadas para entender as diferenças entre as amostras (*scores*) através das melhores projeções lineares usadas em conjunto, gerando um agrupamento multidimensional. Neste trabalho foram usadas as duas melhores projeções lineares (LDA1 e LDA2) para cada coleta.

Na primeira coleta (Figura 4.9), a função discriminante LD1 explica 54,47% e a LD2 responde por 23,20% da variância dos dados, totalizando 77,67%.

Figura 4.9. Análise Discriminante da Coleta 1 e teste de comparação de médias dos centroides. LD1: Função da Primeira Discriminante; LD2: Função da Segunda Discriminante; B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte. Médias seguidas de letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Quando observamos a primeira discriminante (LD1), é possível notar a separação dos grupos formados, os quais o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) tende a diferenciar-se dos tratamentos com adubação nitrogenada, apresentando *scores* mais próximos de -8 (Figura 4.9). Já na segunda discriminante (LD2), a separação dos grupos mostra que os tratamentos contendo 50 e 75 kg de N/ha/corte aparecem nos dois extremos do eixo, com *scores* próximos à -4 e 4, respectivamente. As regiões do visível e uma parte do infravermelho médio (a partir de 1850 nm) do espectro foliar de *B. brizantha* cv. Marandú, apresentaram uma maior influência nessa separação.

De acordo com o teste de Tukey, o tratamento com 75 kg de N/ha/corte, que apresentou *scores* altos para a LD1, foi estatisticamente superior ($P<0,05$) aos demais tratamentos (Figura 4.9). E, como podemos observar em resultados anteriores, o tratamento com o maior nível de

adubação apresentou maior teor de nitrogênio foliar (Figura 4.8), porém não houve resultados consistentes na diferenciação do espectro na região do visível (Figura 4.1). Todos esses resultados evidenciam que o maior teor de nitrogênio detectado, possivelmente, é decorrente de compostos nitrogenados que não estejam associados aos pigmentos fotossintéticos foliares, mas à produção de biomassa (AMARAL; MOLIN, 2014). Os compostos nitrogenados da planta estão divididos em três complexos. Dois deles possuem proteínas que são detectadas na faixa do visível, próximo à região de 680 nm, e são necessárias para a fotossíntese. O terceiro é formado pelas principais proteínas de membrana e não é essencial para a competência fotossintética, porém funciona como um conjunto adicional para o segundo (ANDERSON, 1982). O tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) foi estatisticamente inferior ($P < 0,05$) aos demais tratamentos (Figura 4.9), em relação à LD1, o que pode justificar o menor teor de nitrogênio foliar (Figura 4.8).

Quando observamos os centroides da segunda discriminante (LD2), o tratamento com 75 kg de N/ha/corte apresentou melhores resultados ($P < 0,05$) em relação aos demais tratamentos. O contrário pode ser identificado com o tratamento com 50 kg de N/ha/corte (Figura 4.9).

Na segunda coleta (Figura 4.10), a função discriminante LD1 explica 61,50% e a LD2 responde por 27,14% da variância dos dados, totalizando 88,64%. Quando observamos a primeira discriminante (LD1), é possível notar a separação dos grupos formados, os quais os tratamentos com 0 e 25 kg de N/ha/corte se discriminam dos demais tratamentos, apresentando *scores* mais próximos de -9 e 0. Já na segunda discriminante (LD2), a separação mostra o tratamento contendo 25 kg de N/ha/corte com *scores* próximos à -6 (Figura 20). As regiões do visível e uma parte do infravermelho médio (a partir de 1880 nm) do espectro foliar de *B. brizantha* cv. Marandú, apresentaram praticamente toda influência nessa separação.

Coleta 2

Centroide	LD1	LD2
B0	-8.4 d	2.38 b
B1	-0.58 c	-5.66 d
B2	3.95 b	-0.26 c
B3	5.03 a	3.53 a

Figura 4.10. Análise Discriminante da Coleta 2 e teste de comparação de médias dos centroides. LD1: Função da Primeira Discriminante; LD2: Função da Segunda Discriminante; B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte. Médias seguidas de letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

De acordo com o teste de Tukey, os tratamentos controle (0 kg de N/ha/corte) e com maior nível de adubação (75 kg de N/ha/corte) apresentaram a mesma resposta observada no primeiro corte (Figura 4.10). Porém, os níveis intermediários de adubação nitrogenada inverteram a importância na análise, no qual o tratamento com 50 kg de N/ha/corte apresentou o valor do centroide superior ($P<0,05$) ao tratamento com 25 kg de N/ha/corte (Figura 4.10). Os resultados já mostrados (Figuras 4.2, 4.8 e 4.10) evidenciam o surgimento da tendência esperada na resposta, sendo melhor visualizada pela análise da função discriminante (LD1), de que a adubação nitrogenada aumenta a disponibilidade desse nutriente para a planta com o tempo. Um estudo realizado por Mazza *et al.* (2009) para avaliar a produtividade e composição química do capim Mombaça sob doses crescentes de adubação com ureia, mostrou que teor de nitrogênio na folha dobrou no tratamento com 510 kg/ha de N, em relação ao tratamento controle; e aumentou cerca de 7% com 76 dias de intervalo.

Quando observamos os centroides da segunda discriminante (LD2), o tratamento com 75 kg de N/ha/corte apresentou melhores resultados ($P<0,05$) em relação aos demais tratamentos. O contrário pode ser identificado com o tratamento com 25 kg de N/ha/corte (Figura 4.10).

Na terceira coleta (Figura 4.11), a função discriminante LD1 explica 60,13% e a LD2 responde por 25,35% da variância dos dados, totalizando 85,48%.

Figura 4.11. Análise Discriminante da Coleta 3 e teste de comparação de médias dos centroides. LD1: Função da Primeira Discriminante; LD2: Função da Segunda Discriminante; B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Médias seguidas de letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Quando observamos a primeira discriminante (LD1), é possível notar a separação dos grupos formados (Figura 4.11), os quais os tratamentos com 0 e 75 kg de N/ha/corte se discriminam dos demais tratamentos, apresentando *scores* mais próximos de -6 e 4. Já na segunda discriminante (LD2), mostra a separação dos tratamentos com 25 e 50 kg de N/ha/corte evidenciando a formação de um grupo. A mesma resposta pode ser vista para o teor de nitrogênio foliar (Figura 4.8), no qual, a terceira coleta apresentou valores intermediários para os tratamentos com 25 e 50 kg de N/ha/corte. O visível e uma parte do infravermelho médio (a partir de 1900 nm) do espectro foliar de *B. brizantha* cv. Marandú, apresentaram maior influência nessa separação.

De acordo com o teste de Tukey, todos os tratamentos apresentaram a mesma resposta observada no segundo corte (Figura 4.11). Os resultados já mostrados evidenciam que a

adubação nitrogenada aumenta a disponibilidade desse nutriente para a planta com o tempo (Figura 4.8), e tal resposta já começa a ser percebida pela curva espectral (Figura 4.3). Quando observamos os centroides da segunda discriminante (LD2), percebemos que o tratamento com 75 kg de N/ha/corte apresentou melhores resultados ($P < 0,05$) em relação aos demais tratamentos.

Na quarta coleta (Figura 4.12), a função discriminante LD1 explica 74,75% e a LD2 responde por 15,64% da variância dos dados, totalizando 90,39%. Quando observamos a primeira discriminante (LD1), é possível notar a separação dos grupos (Figura 22), os quais os tratamentos com 0 e 25 kg de N/ha/corte apresentando *scores* mais próximos de -4, e os que contem 50 e 75 kg de N/ha/corte apresentaram *scores* próximos à 4.

Já na segunda discriminante (LD2), o tratamento com 75 kg de N/ha/corte apresentou *scores* próximos de 2, seguido pelos tratamentos com 0 e 25 kg de N/ha/corte e do tratamento com 50 N/ha/corte (Figura 4.12). A região do infravermelho médio (a partir de 1800 nm) do espectro foliar de *B. brizantha* cv. Marandú, começa a ter uma maior interferência nessa separação aumentando a dispersão dos pontos. Isso possivelmente ocorreu porque o nitrogênio está relacionado a formação da estrutura celular, assim, as diferenças observadas no teor de nitrogênio (Figura 4.8) promove uma diferenciação na resposta espectral da região do infravermelho médio.

Coleta 4

Centroide	LD1	LD2
B0	-4.41 d	0.55 b
B1	-3.54 c	-0.25 c
B2	3.45 b	-2.7 d
B3	4.51 a	2.4 a

Figura 4.12. Análise Discriminante da Coleta 4 e teste de comparação de médias dos centroides. LD1: Função da Primeira Discriminante; LD2: Função da Segunda Discriminante; B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Médias seguidas de letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

De acordo com o teste de Tukey, todos os tratamentos apresentaram a mesma resposta observada ($P<0,05$) no terceiro corte, tanto para a LD1 quanto para a LD2 (Figura 4.12).

Na quinta coleta (Figura 4.13), a função discriminante LD1 explica 45,78% e a LD2 responde por 27,97% da variância dos dados, totalizando 73,75%. Quando observamos a primeira discriminante (LD1), é possível notar a separação dos grupos, os quais os tratamentos com 25 e 75 kg de N/ha/corte apresentaram *scores* mais próximos de 0.

Já na segunda discriminante (LD2), os tratamentos com 0 e 50 kg de N/ha/corte apresentaram *scores* próximos de 2 (Figura 4.13). A região do infravermelho médio (a partir de 1880 nm) do espectro foliar de *B. brizantha* cv. Marandú, apresenta *loadings* altos evidenciando sua importância na diluição da representatividade da variância total dos dados. De acordo com o teste de Tukey, os dois grupos formados ($P<0,05$) pelos tratamentos 25 e 75 kg de N/ha/corte na LD1, 0 e 50 kg de N/ha/corte na LD2, apresentaram os maiores centroides (Figura 4.13).

Figura 4.13. Análise Discriminante da Coleta 5 e teste de comparação de médias dos centroides. LD1: Função da Primeira Discriminante; LD2: Função da Segunda Discriminante; B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte. Médias seguidas de letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Na sexta coleta (Figura 4.14), a função discriminante LD1 explica 62,85% e a LD2 responde por 21,18% da variância dos dados, totalizando 84,03%. De acordo com os resultados expostos, observa-se que os pontos (*scores*) ficaram mais dispersos, tanto para LD1 quanto para a LD2. Isso pode ter ocorrido porque os *loadings* aumentaram sua importância por todo o espectro. Mesmo assim, podemos ver a formação de grupos, com o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentando *scores* próximos de -4, e os tratamentos contendo 50 e 75 kg de N/ha/corte com *scores* próximos 2, para a LD1; e os tratamentos contendo 50 e 75 kg de N/ha/corte nos dois extremos do eixo da LD2, com *scores* próximos 2 e -2.

Figura 4.14. Análise Discriminante da Coleta 6 e teste de comparação de médias dos centroides. LD1: Função da Primeira Discriminante; LD2: Função da Segunda Discriminante; B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Médias seguidas de letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

De acordo com o teste de Tukey, os tratamentos foram divididos em três grupos ($P<0,05$) na LD1, com os tratamentos 50 e 75 kg de N/ha/corte, seguidos do tratamento 25 kg de N/ha/corte, e por último o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte); o tratamento com 50 kg de N/ha/corte apresentou maior valor do centroide ($P<0,05$) na LD2, e com o tratamento com 75 kg de N/ha/corte ocorreu o contrário (Figura 4.14).

Estes resultados observados podem ser justificados com o que já foi exposto (Figura 4.6 e 4.8), que mostram o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) com maior reflectância em regiões importantes do visível e menor teor de nitrogênio foliar do que os tratamentos com 50 e 75 kg de N/ha/corte. A maior a reflectância da região do visível, que explica a presença de

clorofila (620 nm), por exemplo, evidencia que há uma menor concentração de compostos que absorvem neste comprimento de onda e, portanto, haverá menor teor de nitrogênio foliar.

Na sétima coleta (Figura 4.15), a função discriminante LD1 explica 51,03% e a LD2 responde por 30,64% da variância dos dados, totalizando 81,67%.

Figura 4.15. Análise Discriminante da Coleta 7 e teste de comparação de médias dos centróides. LD1: Função da Primeira Discriminante; LD2: Função da Segunda Discriminante; B0: 0 kg de N/ha/corte; B1: 25 kg de N/ha/corte; B2: 50 kg de N/ha/corte; B3: 75 kg de N/ha/corte.

Médias seguidas de letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

De acordo com os resultados expostos, observa-se que os *scores* ficaram mais dispersos, tanto para LD1 quanto para a LD2. Isso pode ter ocorrido porque os *loadings* aumentaram sua importância por todo o espectro. Mesmo assim, podemos ver a formação de grupos, com o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) apresentando *scores* próximos de -10, e os tratamentos contendo 50 e 75 kg de N/ha/corte com *scores* próximos 4, para a LD1; e os

tratamentos contendo 50 e 75 kg de N/ha/corte nos dois extremos do eixo da LD2, com *scores* próximos 8 e -6. De acordo com o teste de Tukey (Figura 4.15), os tratamentos foram divididos em três grupos ($P < 0,05$) na LD1, com os tratamentos 50 e 75 kg de N/ha/corte, seguidos do tratamento 25 kg de N/ha/corte, e por último o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte); o tratamento com 50 kg de N/ha/corte apresentou maior valor do centroide ($P < 0,05$) na LD2, e com o tratamento com 75 kg de N/ha/corte ocorreu o contrário.

Estes resultados observados podem ser justificados com o que já foi exposto (Figura 4.7 e 4.8), que mostram o tratamento controle (0 kg de N/ha/corte) com maior reflectância em regiões importantes do visível e menor teor de nitrogênio foliar do que os tratamentos com 50 e 75 kg de N/ha/corte. A maior reflectância da região do visível, que explica a presença de clorofila (620 nm), por exemplo, evidencia que há uma menor concentração de compostos que absorvem neste comprimento de onda e, portanto, haverá menor teor de nitrogênio foliar.

De acordo com os resultados apresentados (Figuras 4.9 a 4.15), podemos identificar a formação de agrupamentos de um mesmo tratamento nas diferentes coletas. É possível notar que, em geral, quando ocorre maior influência da região do infravermelho médio (a partir de 1850 nm) do espectro foliar de *B. brizantha* cv. Marandú, há uma perda no poder de discriminação da análise (Figuras 4.9 a 4.15) em ambos os eixos (LD1 e LD2).

4.3. Regressão para predição do teor de nitrogênio de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú

A regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS - *Partial Least Squares*) é uma análise de dados multivariados que relaciona uma ou mais variáveis resposta (Y) com diversas variáveis independentes (X), baseada no uso de fatores, combinações formadas pela variável X (CARVALHO *et al.*, 2013). Usando como exemplo o presente trabalho, a matriz X é formada pela resposta espectral de folhas do capim Marandú e a matriz Y formada pelo teor de nitrogênio foliar. O PLS é útil quando as variáveis são altamente colineares, como por exemplo o espectro, ou quando existem mais variáveis do que observações. Além disso, ele é um método robusto pois gera modelos de forma eficiente mesmo com a presença de ruídos ou com a falta de dados, e apresenta velocidade computacional (VISCARRA ROSSEL, 2008). Diversos modelos relacionando propriedades químicas das plantas com espectros já foram desenvolvidos utilizando a regressão PLS como ferramenta (ASNER; MARTIN, 2008; CARVALHO *et al.*, 2013; TAVARES, 2017).

A precisão do modelo para predição do teor de nitrogênio foliar foi avaliada com o RMSE e o maior valor de R^2 . A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE - *Root Mean Square Error*) mostra a acurácia do modelo, apresentado quão longe os pontos dos dados estão da linha de regressão de melhor ajuste (SHI *et al.*, 2014). O coeficiente de determinação (R^2) mostra a porcentagem da variância na variável Y que é contabilizada pela variável X (SAEYS *et al.*, 2005).

De acordo com a regressão observa-se a variação dos coeficientes de determinação (R^2) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE) em todas as coletas (Figuras 4.16 a 4.20).

Na primeira coleta (Figura 4.16), os comprimentos de onda do infravermelho médio, entre 1590 e 1700 nm, apresentaram maiores valores de coeficientes, evidenciando sua influência no modelo de regressão. Esta região tem grande sensibilidade à presença da água, com picos de absorção próximos a 1400 e 1900 nm (JONG; ADDINK; DOELMAN, 2014; FANG *et al.*, 2017; RODRIGUAZ-PEREZ *et al.*, 2018). Como resultado, a calibração obteve um R^2 de 0,29 e um RMSE de 1,22, e para a validação um R^2 de 0,18 com um RMSE de 1,34.

Figura 4.16. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais das Coletas 1, 2, 3 e 5 para estimativa do teor de nitrogênio foliar da *B. brizantha* cv. Marandú. R^2 : coeficiente de determinação; RMSE: erro quadrático médio; MS: matéria seca. (Em azul: calibração; Laranja: validação)

Já na segunda coleta (Figura 4.16), os comprimentos de onda entre 1030 e 1100 nm, região indiretamente influenciada pela quantidade de água presente na folha (LIU, 2015), passam a apresentar maior importância no modelo de regressão. Além disso, observa-se que o R^2 gerado para a calibração foi de 0,006 e o RMSE de 0,28. Já para a validação, houve um aumento do R^2 para 0,23, com o RMSE apresentado o valor de 0,24.

Na terceira coleta (4.16), os comprimentos de onda do verde e *red edge* apresentaram maiores valores dos coeficientes. Ademais, observa-se uma melhora na predição do nitrogênio na calibração desta coleta, fazendo com que o R^2 atinja o valor de 0,40 e o RMSE de 1,49. Já para a validação, o R^2 apresentado foi de 0,22 com um RMSE de 1,75. É possível que o poder de predição não tenha sido maior devido a uma considerável influência da região do infravermelho próximo (1100 a 3200 nm), região relacionada à presença da água (JONG; ADDINK; DOELMAN, 2014; FANG et al., 2017; RODRIGUAZ-PEREZ et al., 2018).

A falta de resultados conclusivos na região do visível, em relação à dose de adubação aplicada para as primeiras coletas, já era esperada, pois o suprimento de nitrogênio possivelmente não levou a saturação do solo necessária para a máxima de absorção desse nutriente pela planta e, consequentemente, diminuiu a produção de pigmentos nas plantas. Estes resultados também foram encontrados por Amaral e Molin (2014), que observaram que a adubação nitrogenada só apresentou diferença na reposta espectral a partir de 120 dias.

Na segunda coleta (Figura 4.2) era de se esperar uma menor diferenciação dos tratamentos em relação à dose de adubação aplicada,

Na quinta coleta (4.16), os comprimentos de onda do infravermelho próximo apresentaram maior influência como na coleta 2. Portanto, houve um baixo poder de predição do nitrogênio para a coleta 5, gerando um R^2 de 0,25 na calibração, com RMSE de 0,87. Na validação, houve a redução de 54% no valor de R^2 , que chegou a 0,13, e com RMSE de 0,93.

Como considerado acima, as coletas 1, 2, 3 e 5 apresentaram características desfavoráveis para a construção de um modelo que permita a predição do conteúdo de nitrogênio em folhas do capim Marandú. Por outro lado, as coletas consideradas a seguir (4, 6 e 7) podem contribuir para a criação de um modelo mais eficaz na predição de nitrogênio foliar, pois demonstram características similares com relação às regiões espectrais de maior influência, e que em sua maioria apresentam valores de R^2 acima de 0,5. Com base nessas três coletas, foi gerado o modelo de regressão geral (Figura 4.20).

Na quarta coleta (Figura 4.17), os comprimentos de onda do verde e *red edge* apresentaram maiores valores dos coeficientes. Nota-se que houve melhora ainda maior na predição do nitrogênio para coleta 4 fazendo com que o R^2 gerado para a calibração atinja 0,78. O RMSE para calibração foi de 1,63. Já para a validação, o R^2 apresentou o valor de 0,72, bem próximo aos encontrados pelos melhores índices da Tabela 3 (mND₇₀₅, NDRE, RI-half e SR₇₀₅), com o RMSE de 1,82. Este modelo conseguiu coeficientes de determinação que indicam que existe uma boa predição (SAEYS; MOUAZEN; RAMON, 2005).

Figura 4.17. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais da Coleta 4 para estimativa do teor de nitrogênio foliar da *B. brizantha* cv. Marandú. R^2 : coeficiente de determinação; RMSE: erro quadrático médio; MS: matéria seca.

Na sexta coleta (Figura 4.18), os comprimentos de onda do verde e *red edge* também apresentaram maiores valores dos coeficientes. Nota-se que houve melhora na predição do teor de nitrogênio da folha para coleta 6, apresentando o valor R^2 de 0,53 e o RMSE de 2,01. Para validação, o R^2 apresentou valores de 0,40, com o RMSE de 2,25, atingindo valores próximos aos encontrados pelos índices (Tabela 3).

Figura 4.18. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais da Coleta 6 para estimativa do teor de nitrogênio foliar da *B. brizantha* cv. Marandú. R^2 : coeficiente de determinação; RMSE: erro quadrático médio; MS: matéria seca.

Na sétima coleta (Figura 4.19), os comprimentos de onda do *red edge* continuaram apresentando maiores valores dos coeficientes.

Figura 4.19. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais da Coleta 7 para estimativa do teor de nitrogênio foliar da *B. brizantha* cv. Marandú. R^2 : coeficiente de determinação; RMSE: erro quadrático médio; MS: matéria seca.

É possível observar que houve melhora ainda maior na predição do nitrogênio para coleta 7, que gerou o R^2 no valor de 0,83 e o RMSE de 1,30 para calibração. Já para a validação, o R^2 apresentou valores de 0,72, fazendo com que atinja valores próximos aos encontrados pelos melhores índices (Tabela 3). O RMSE para validação foi de 1,65. Este modelo conseguiu coeficientes de determinação que indicam que existe uma boa predição (SAEYS; MOUAZEN; RAMON, 2005).

Trabalhos onde foram detectadas diferenças significativas no teor de nitrogênio foliar na região do verde e *red edge* foram mencionados por vários autores. Singh *et al.* (2017), em seu experimento com duas variedades de sorgo, concluíram que os comprimentos de onda por volta de 595 nm (verde) e 701 nm (*red edge*) grande sensibilidade aos níveis de nitrogênio. Asner e Martin (2008) detectaram através da análise de quadrados mínimos parciais (PLS) a região entre 510 e 730 nm que apresentaram maior peso para determinação da clorofila.

Enquanto que para a determinação de carotenoides, a região mais expressiva foi entre 550 e 707 nm. Estes resultados foram similares às conclusões encontradas no trabalho de Gitelson *et al.* (2002) em folhas de castanheira, onde a região do verde (530 a 550 nm) teve forte relação com os níveis de clorofila com R^2 maior que 0,92.

No modelo gerado a partir dos dados das coletas 4, 6 e 7 (Figura 4.20), percebe-se a importância que os comprimentos de onda da região do *red edge* apresentaram no modelo. Tal fato também pode ser observado com as respostas obtidas pelos índices de vegetação da Tabela 3, que evidenciou que os índices de melhor performance (mND₇₀₅, mNDVI, MTCI, NDRE, RI-1dB, RI-2dB, RI-3dB, RI-half e SR₇₀₅) têm em comum o fato de que são estimados a partir de comprimentos de onda situados na região do *red edge*.

Figura 4.20. Regressão por Mínimos Quadrados Parciais Geral para estimativa do teor de nitrogênio foliar da *B. brizantha* cv. Marandú. GERAL: Coletas 4, 6 e 7; R^2 : coeficiente de determinação; RMSE: erro quadrático médio; MS: matéria seca.

4.4. Performance dos Índices de Vegetação de folhas de *B. brizantha* cv. Marandú

Os Índices de Vegetação são modelos concisos gerados a partir de duas ou mais variáveis (comprimentos de onda) para parametrização de um atributo e constituem uma ferramenta importante para o monitoramento de culturas. Os mais comuns utilizam o princípio da razão simples ou normalização. Eles têm sido utilizados na estimativa de vários parâmetros bioquímicos com os quais apresentam altas correlações, incluindo o teor de nitrogênio foliar. Os índices são utilizados com sucesso para o monitoramento de mudanças na vegetação e, em campos agrícolas, demonstram que a refletância de bandas da região do vermelho e infravermelho próximo, ou a combinação de ambas, estão altamente correlacionadas com a área foliar, biomassa, conteúdo de água da folha, teor de clorofila e propriedades do solo (AYOUBI *et al.*, 2011; TAJGARDAN *et al.*, 2010).

A Tabela 3 mostra a performance de todos os índices de vegetação para a predição do teor de nitrogênio foliar. Estes índices são estimados a partir de comprimentos de onda da região do visível, *red edge* e infravermelho próximo.

Tabela 3. Coeficiente de determinação (R^2) dos índices de vegetação selecionados para a predição do teor de nitrogênio foliar.

Índices	R^2 *							
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	GERAL
GNDVI	0.05	0.00	0.35	0.62	0.11	0.53	0.61	0.38
ISR	0.07	0.01	0.35	0.51	0.11	0.54	0.68	0.29
MCARI	0.05	0.01	0.17	0.68	0.03	0.34	0.31	0.42
MCARI1	0.16	0.00	0.05	0.01	0.14	0.04	0.48	0.07
mND ₇₀₅	0.02	0.03	0.33	0.73	0.14	0.48	0.63	0.52
mNDVI	0.00	0.04	0.34	0.69	0.17	0.50	0.68	0.50
MTCI	0.00	0.06	0.35	0.69	0.18	0.45	0.60	0.51
MTVI1	0.16	0.00	0.05	0.01	0.14	0.04	0.48	0.07
NDI	0.00	0.04	0.32	0.65	0.16	0.52	0.71	0.45
NDRE	0.01	0.03	0.31	0.72	0.18	0.46	0.62	0.51
NDVI	0.01	0.01	0.21	0.01	0.21	0.40	0.68	0.03
PI1	0.00	0.04	0.30	0.65	0.20	0.50	0.70	0.42
PI2	0.06	0.00	0.35	0.59	0.14	0.52	0.59	0.33
RI-1dB	0.00	0.05	0.37	0.68	0.18	0.47	0.65	0.49
RI-2dB	0.00	0.05	0.36	0.68	0.18	0.47	0.64	0.49
RI-3dB	0.00	0.05	0.36	0.68	0.19	0.47	0.65	0.49
Ri-half	0.00	0.05	0.34	0.70	0.20	0.48	0.66	0.49
RSI	0.00	0.03	0.27	0.49	0.19	0.52	0.73	0.30
SR ₇₀₅	0.00	0.05	0.33	0.70	0.20	0.49	0.67	0.49
TVI	0.14	0.00	0.00	0.05	0.18	0.00	0.34	0.03

* Em branco: predição não acurada; Verde claro: predição razoável; Verde escuro: boa predição (SAEYS *et al.*, 2005)

De acordo com os resultados da Tabela 3, observa-se que nas primeiras duas coletas todos os índices de vegetação apresentaram R^2 muito baixo. Isso pode ter ocorrido porque as diferenças ocasionadas nas células da folha que são decorrentes da adubação nitrogenada, demora um tempo para ser detectada em análises hiperespectrais (AMARAL; MOLIN, 2014). Além disso, percebe-se que o R^2 dos índices foi aumentando ao longo do tempo (Coletas 1 a 4). Na quinta coleta, houve uma queda nesses resultados, decorrente do manejo incorreto da adubação nitrogenada, que voltaram a aumentar nas coletas seguintes (Tabela 3).

Ao observar o resultado geral com as coletas de melhor regressão (4, 6 e 7) para predição do nitrogênio foliar, nota-se um coeficiente de determinação de valor aproximado ao da regressão múltipla (Figura 33). Como já discutido anteriormente, a ausência de diferenças expressivas nas primeiras três coletas deve-se a dose de nitrogênio adotada, pois o suprimento desse nutriente pode não ter causado a saturação do solo necessária para levar à capacidade máxima de absorção pela planta (MAZZA *et al.* 2009).

Dentre os 20 índices de vegetação testados os melhores resultados foram: mND₇₀₅, mNDVI, MTCI, NDRE, RI-1dB, RI-2dB, RI-3dB, RI-half e SR₇₀₅. Todos estes índices têm em comum o fato de que são estimados a partir de comprimentos de onda situados na região do *red edge* (GITELSON; MERZLYAK, 1994; SIMS; GAMON, 2002; GRUPTA; VIJAYAN; PRASAD, 2003; DASH; CURRAN, 2004; RODRIGUEZ *et al.*, 2006).

O Índice da Diferença Normal Modificada (mND₇₀₅ - Modified Normal Difference Index) utiliza três tipos de índices primários (SR, NDVI e ND_{index}) em sua formação. Esse índice foi desenvolvido para predição do teor de pigmentos de folhas, não sendo sensível às espécies e à variação da estrutura foliar e, portanto, pode ser aplicado em estudos de sensoriamento remoto em larga escala sem calibração extensiva (SIMS; GAMON, 2002). Diferente dos demais índices, este utiliza para sua predição, além dos comprimentos de onda do *red edge* (705 e 750 nm), um comprimento de onda da região do azul (445 nm). O índice mND₇₀₅ apresentou o melhor resultado de R^2 (Tabela 3) para quarta coleta (0,73), indicando uma boa predição (SAEYS; MOUAZEN; RAMON, 2005).

Gitelson e Merzlyak (1994) ao analisar o padrão espectral das folhas de *Acer* (*Acer platanoides* L.), obtiveram como resposta a região mais sensível ao conteúdo de clorofila (705 nm), e a região minimamente sensível (750 nm) que foi usado como referência na criação de seu índice da Relação Simples (SR₇₀₅ - Simple Ratio 705). Além disso, baseado no NDVI, usou os mesmos comprimentos de onda para criação do NDVI modificado (mNDVI - modified Normal Difference Vegetation Index), obtendo bons resultados de predição para os dois índices. Os índices SR₇₀₅ e mNDVI apresentaram os melhores resultados de R^2 (Tabela 3) para quarta

e sétima coleta, sendo eles de 0,70 e 0,67; 0,69 e 0,68, respectivamente. Estes resultados indicam uma boa predição (SAEYS; MOUAZEN; RAMON, 2005).

Dash e Curran (2004) criaram o índice MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index), limitado pelas bandas específicas que o satélite MERIS (ESA - European Space Agency) disponibilizava, para detectar mudanças na posição do *red edge* (709 nm e 754 nm), que mostrou correlação com a degradação da clorofila, na resposta espectral do dossel de Acer (*Acer macrophyllum*). Diferente dos demais índices, este utiliza para sua predição, além dos comprimentos de onda do *red edge*, um comprimento de onda da região do vermelho (681 nm). O índice MTCI apresentou uma boa predição de R^2 , com valores de 0,69 (Tabela 3) para quarta coleta (SAEYS; MOUAZEN; RAMON, 2005).

Em um estudo para detectar deficiência de nitrogênio com a resposta espectral do dossel de trigo, o índice da Diferença Normalizada *Red edge* (NDRE - Normalized Difference *Red edge*) usado por Rodriguez *et al.* (2006) tem o mesmo princípio do MTCI de detectar mudanças na posição do *red edge*, porém este índice usa uma banda do *red edge* (720 nm) e outra banda do infravermelho próximo (790 nm). O índice NDRE apresentou o melhor resultado de R^2 (Tabela 3) para quarta coleta (0,72), indicando uma boa predição (SAEYS; MOUAZEN; RAMON, 2005).

Gupta, Vijayan e Prasad (2003) tiveram uma abordagem diferente para detectar a mudança de posição do *red edge* a fim de mensurar o conteúdo de clorofila. Observando a resposta espectral do dossel do trigo por 64 dias, indentificaram o ponto de inflexão do *red edge* por volta dos 729 nm. A partir disso, foram ajustados 4 índices de razão simples (RI-1dB, RI-2dB, RI-3dB e Ri-half) para testar a eficácia na predição. Os índices RI-1dB, RI-2dB, RI-3dB e RI-half apresentaram melhores resultados de R^2 (Tabela 3) para quarta e sétima coleta, indicando uma boa predição (SAEYS; MOUAZEN; RAMON, 2005).

De acordo com os resultados apresentados (Tabela 3), pode-se perceber que, quando o índice de vegetação possui uma banda da região do *red edge* mais outra banda complemento (mND₇₀₅ - região do azul, MTCI - região do vermelho, NDRE - região do infravermelho próximo), sua performance apresenta uma melhora. O mesmo foi observado por Singh *et al.* (2017) que constataram que os índices compostos por bandas do visível e do infravermelho próximo, superaram aqueles que usavam bandas de uma única região.

Um estudo realizado por Martins (2016), com o objetivo de avaliar o teor de nitrogênio foliar e a resposta espectral da cana-de-açúcar plantada em diferentes solos e variedades, encontrou valores de R^2 variando de 0,68 a 0,82 para mND705, de 0,67 a 0,84 para MTCI, de 0,71 a 0,89 para NDRE, e de 0,67 a 0,84 para SR705 nas diferentes condições estudadas.

Tavares (2017) avaliou temporalmente a relação existente entre a resposta espectral da cana-de-açúcar e o teor de nitrogênio foliar e encontrou o melhor resultado de R^2 (0,67) para NDRE com 144 dias após o corte.

Tendo em conta que os índices (mND₇₀₅, mNDVI, MTCI, NDRE, RI-1dB, RI-2dB, RI-3dB, RI-half e SR₇₀₅) foram projetados especificamente para a cultura que os autores estavam trabalhando, os resultados demonstraram boa performance na predição dos teores de nitrogênio foliar em forrageiras nos estudos de Martins (2016), Tavares (2017) e no presente trabalho.

5. CONCLUSÕES

As doses crescentes de ureia aplicadas a *Brachiaria brizantha* cv. Marandú, promoveram um aumento dos teores foliares de nitrogênio (TFN). A resposta espectral foi sensível a essa variação que promoveu uma maior absorção da energia no VIS (400 a 700 nm), principalmente em 550 nm (verde).

Foi possível diferenciar, utilizando-se da análise discriminante (LDA) das curvas espectrais (400-2300 nm), amostras sob doses de nitrogênio aplicadas à cultura.

As equações de regressão multivariada obtidas pelo método de quadrados mínimos parciais (PLSR), geraram valores razoáveis a bons de R^2 (0,53 a 0,83) na predição dos TFN. Os comprimentos de onda com maior peso nessas regressões estão na região do *red edge* (715 a 720 nm).

Os Índices de Vegetação, utilizados para a predição do TFN, obtiveram bons coeficientes de determinação (R^2) que variaram de 0,65 a 0,73, onde os comprimentos de onda mais utilizados em sua maioria foram as do *red edge*.

REFERÊNCIAS

- ABDULRIDHA, J. AMPATZIDIS, Y.; EHSANI, R.; CASTRO, A. I. Evaluating the performance of spectral features and multivariate analysis tools to detect laurel wilt disease and nutritional deficiency in avocado. **Computers and Eletrons in Agriculture**, v. 155, p. 203-211, 2018.
- ALEXANDRINO, E.; NASCIMENTO JUNIOR, D.; MOSQUIM, P. R.; REGAZZI, A. J.; ROCHA, F. C. Características morfogênicas e estruturais na rebrotação da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu submetida a três doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, n. 6, p. 1372-1379, 2004.
- AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. **Agronomy Journal**, v. 106, p. 273-280, 2014.
- ANDERSON, J. M. The role of chlorophyll-protein complexes in the function and structure of chloroplast thylakoids. **Molecular and Cellular Biochemistry**, v. 46, p. 161-172, 1982.
- ASNER, G. P.; MARTIN, R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3958-3970, 2008.
- AYOUBI, S.; SAHRAWAT, K. L. Comparing multivariate regression and artificial neural network to predict barley production from soil characteristics in northern Iran. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 57, n. 5, p. 549-565, 2011.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Nitrogen and sulphur in Marandu grass: relationship between supply and concentration in leaf tissues. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 1, p. 44-51, 2007.
- BIEWER, S.; FRICKE, T.; WACHENDORF, M. Development of canopy reflectance models to predict forage quality of legume-grass mixtures. **Crop Science**, Madison, v. 49, n. 5, p. 1917-1926, 2009.
- BUCHANAN, B. B.; GRUISSSEN, W.; JONES, R. L. **Biochemistry e molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. 1367 p.
- BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 76, p. 156-172, 2000.
- CAMMARANO, D.; FITZGERALD, G.; CASA, R.; BASSO, B. Assessing the robustness of vegetation index to estimate wheat N in Mediterranean environments. **Remote Sensing**, Basel, v. 6, p. 2827-2844, 2014.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.
- CASTRO, P. R. C.; KLUGE, R. A.; PERES, L. E. P. **Manual de fisiologia vegetal: teoria e prática**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2005. 650 p.

- CARDOSO, J. M. S.; ANDRADE, A. C.; MAGALHÃES, J. A.; RODRIGUES, B. H. N.; VIEIRA, J. S.; FOGAÇA, F. H. S.; MEHL, H. U.; COSTA, N. L. Fontes e doses de nitrogênio na produtividade do capim-Marandu. **Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia**, Maringá, v. 9, n. 8, p. 348-358, 2015.
- CARVALHO, S.; SCHLERF, M.; VAN DER PUTTEN, W. H.; SKIDMORE, A. K. Hyperspectral reflectance of leaves and flowers of an outbreak species discriminates season and successional stage of vegetation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 24, p. 32-41, 2013.
- CHEN, G. Y.; YONG, Z. H.; LIAO, Y.; ZHANG, D. Y.; CHEN, Y.; ZHANG, H. B.; CHEN, J.; ZHU, J. G.; XU, D. Q. Photosynthetic acclimation in rice leaves to free-air CO₂ enrichment related to both ribulose-1,5-bisphosphate carboxylation limitation and ribulose-1,5-bisphosphate regeneration limitation. **Plant Cell Physiology**, v. 46, n. 7, p. 1036-1045, 2005.
- CURRAN, P. J. Remote sensing of foliar chemistry. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 30, p. 271-278, 1989.
- DASH, J.; CURRAN, P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 23, p. 5403-5413, 2004.
- DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; COLSTOUN, E. B.; MCMURTREY, J. E. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, p. 229-239, 2000.
- DORIGO, W. A.; ZURITA-MILLA, R.; DE WIT, A. J. W.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M. E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 165-193, 2007.
- DUPAS, E.; BUZETTI, S.; RABELO, F. H. S.; SARTO, A. L. Carbon and carbono dioxide accumulation by marandu grass under nitrogen fertilization and irrigation. **Revista Ceres**, v. 63, n. 3, p. 387-393, 2016.
- EDWARDS, G. E.; FRANCESCHI, V. R.; VOZNESENSKAYA, E. V. Single-cell C₄ photosynthesis versus the dual-cell (Kranz) paradigm. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 173-196, 2004.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Brachiaria brizantha* cv. **Marandu**. Campo Grande, EMBRAPA-CNPQC, 1984. 31 p. Disponível em: <<http://docsagencia.cnptia.embrapa.br/bovinodecorte/doc/doc21/doc21.pdf>>. Acesso em: 10 janeiro 2018.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Brasília: EMBRAPA, 2006. 306p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Guia de identificação de deficiências nutricionais em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu**. São Carlos, EMBRAPA, 2007. 38 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/40514/1/Comunicado76.pdf>>. Acesso em: 10 janeiro 2018.

- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Relatório de avaliação dos impactos das tecnologias geradas pela EMBRAPA Gado de Corte**. Campo Grande, EMBRAPA, 2016. 16 p. Disponível em: <http://bs.sede.embrapa.br/2015/relatorios/gadodecorte_2015_capimmarandu.pdf>. Acesso em: 03 novembro 2018.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Custos das cultivares forrageiras lançadas pela EMBRAPA Gado de Corte: metodologia e resultado**. Campo Grande, EMBRAPA, 2018. 66 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/185338/1/Custo-das-cultivares-forrageiras.pdf>>. Acesso em: 10 janeiro 2018.
- ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, n. 1, p. 74-84, 2011.
- FANG, M.; JU, W.; ZHAN, W.; CHENG, T.; QIU, F.; WANG, J. A new spectral similarity water index for the estimation of leaf water content from hyperspectral data of leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 196, p. 13-27, 2017.
- GARCEZ, T. B. **Aspectos metabólicos, nutricionais e produtivos de cultivares de *Brachiaria* e *Panicum* visando eficiência no uso do nitrogênio**. 2013. 104 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 289-298, 1996.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves - Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. **Journal Plant Physiology**, v. 143, p. 286-292, 1994.
- GITELSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v. 75, n. 3, p. 272-281, 2002.
- GOMEZ-CASERO, M. T.; LOPEZ-GRANADOS, F.; PENA-BARRAGAN, J. M.; JURADO-EXPOSITO, M.; GARCIA-TORRES, L. Assessing nitrogen and potassium deficiencies in olive orchards through discriminant analysis of hyperspectral data. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 132, n. 5, p. 611-618, 2007.
- GRANT, K.M.; JOHNSON, D.L.; HILDEBRAND, D.V.; PEDDLE, D.R. Quantifying biomass production on rangeland in southern Alberta using SPOT imagery. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 38, n. 6, p. 695-708, 2012.
- GROOT, P. J.; POSTMA, G. J.; MELSSSEN, W. J.; BUYDENS, L. M. C.; DECKERT, V.; ZENOBI, R. Application of principal component analysis to detect outliers and spectral deviations in near-field surface-enhanced Raman spectra. **Analytica Chimica Acta**, v. 446, p. 71-83, 2001.

- GUPTA R. K.; VIJAYAN, D.; PRASAD, T. S. Comparative analysis of *red edge* hyperspectral indices. **Advances in Space Research**, v. 32, n. 11 p. 2217-2222, 2003.
- HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; STRACHANE, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 337-352, 2004.
- HERMANS, S. S.; HAMMOND, J. P.; WHITE, P. J. VERBRUGGEN, N. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? **TRENDS in Plant Science**, v. 11, n. 12, p. 610-617, 2006.
- JARVIS, S. C.; SCHOLEFIELD, D.; PAIN, B. Nitrogen cycling in grazing systems. In: BACON, P. E. (Ed.). **Nitrogen fertilization in the environment**. New York: M. Dekker, p. 381-420, 1995.
- JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestre**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 672 p.
- JEWISS, O. R. Tillering in grasses – It's significance and control. **Grass and Forage Science**, v. 27, n. 2, p. 65-82, 1972.
- JONG, S. M.; ADDINK, E. A.; DOELMAN, J. C. Detecting leaf-water content in Mediterranean trees using high-resolution spectrometry. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 27, p. 128-136, 2014.
- JUNEAU, K. J.; TARASOFF, C. S. Leaf area and water content changes after permanent and temporary storage. **PLOS One**, v. 7, n. 8, p. 1-6, 2012.
- KANT, S.; BI, Y.; ROTHSTEIN, S. J. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 4, p. 1499-1509, 2011.
- KIM, H. Y.; LIM, S. S.; KWAK, J. H.; LEE, D. S.; LEE, S. M.; RO, H. M.; CHOI, W. J. Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO₂. **Plant Soil**, v. 342, p. 59-71, 2011.
- KONX, N. M.; SKIDMORE, A. K.; PRINS, H. H. T.; ASNER, G. P.; VAN DER WERFF, H. M.; DE BOER, W. F.; VAN DER WAAL, C.; DE KNEGT, H. J.; KOMI, E. M.; SLOTOW, R.; GRANT, R. C. Dry season mapping of savanna forage quality, using the hyperspectral Carnegie Airbone Observatory sensor. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 6, p. 1478-1488, 2011.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Koppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006.
- LAFARGE, M. Reproductive tillers in cut tall fescue swards: differences according sward ages and fertilizer nitrogen application, and relationships to with the local dynamics of the sward. **Grass and Forage Science**, v. 61, p. 182-191, 2006.

- LI, F.; MIAO, Y.; HENNIG, S.D.; GNYP, M.L.; CHEN, X.; JIA, L.; BARETH, G. Evaluating hyperspectral vegetation indices for estimating nitrogen concentration of winter wheat at different growth stages. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 11, n. 4, p. 335–357, 2010.
- LI, L.; LU, J.; WANG, S.; MA, Y.; WEI, Q.; LI, X.; CONG, R. Methods for estimating leaf nitrogen concentration of winter oilseedrape (*Brassica napus* L.) using in situ leaf spectroscopy. **Industrial Crops and Products**, v. 96, p. 194-204, 2016.
- LICHTENTHALER, H. K.; GITELSON, A.; LANG, M. Non-Destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. **Journal Plant Physiology**, v. 148, p. 483-493, 1996.
- LIU, W.T.H. **Aplicações do sensoriamento remoto**. 2 ed. Campo Grande: Oficina de Textos, 2015. 908p.
- LONG, S. P. Environmental responses. In: SAGE, R. F.; MONSON, R. K. (Ed.). **C₄ plant biology**. San Diego: Academic Press, 1999. p. 215-249.
- LUYSSAERT, S.; SCHULZE, E. D.; BORNER, A.; KNOHL, A.; HESSENMOLLER, D.; LAW, B. E.; CIAIS, P.; GRACE, J. Old-growth forests as global carbon sinks. **Nature**, v. 455, p. 213-215, 2008.
- MAHLEIN, A. K.; RUMPF, T.; WELKE, P.; DEHNE, H. W.; PLÜMER, L.; STEINER, U.; OERKE, E. C. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. **Remote Sensing of Environment**, v. 128, p. 21–30, 2013.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319 p.
- MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados: Uma introdução**. Porto Alegre: Brookman, 2008. 229 p.
- MARTINS, R. L.; ROSSI JÚNIOR, P.; FERNANDES, A. C.; GRISE, M. M.; MURARO, G. B. Produção de forragem em pastagens de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú e *Panicum maximum* cv. Mombaça, em resposta a diferentes doses de nutrientes, em Umuarama-PR. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, Curitiba, v. 4, n. 3, p. 54-69, 2006.
- MARTINS, Juliano Araújo. **Resposta espectral do nitossolo submetido a diferentes doses de vinhaça**. 2011. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- MAZZA, L. M.; POGGERE, G. C.; FERRARO, F. C.; RIBEIRO, C. B.; CHEROBIM, V. F.; MOTTA, A. C. V.; MORAES, A. Adubação nitrogenada na produtividade e composição química do capim Mombaça no primeiro planalto paranaense. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 4, p. 257-265, 2009.

- MENG, S.; PENG, J. S.; HE, Y. N.; ZHABG, G. B.; YI, H. Y.; FU, Y. L.; GONG, J. M. Arabidopsis NRT1.5 mediates the suppression of nitrate starvation-induced leaf senescence by modulating foliar potassium level. **Molecular Plant**, v. 9, n. 3, p. 461-470, 2016.
- MERIGOUT, P.; GAUDON, V.; QUILLERÉ, I.; BRIAND, X.; DANIEL-VEDELE, F. Urea use efficiency of hydroponically grown maize and wheat. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, n. 3, p. 427-443, 2008.
- MESQUITA, P.; SILVA, S. C.; PAIVA, A. J.; CAMINHA, F. O.; PEREIRA, L. E. T.; GUARDA, V. A.; NASCIMENTO JUNIOR, D. Structural characteristics of marandu palisadegrass swards subjected to continuous stocking and contrasting rhythms of growth. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 1, p. 23-30, 2010.
- MIPHOKASAP, P.; HONDA, K.; VAIPHASA, C.; SOURIS, M.; NAGAI, M. Estimating Canopy Nitrogen Concentration in Sugarcane Using Field Imaging Spectroscopy. **Remote Sensing**, v. 4, p. 1651-1670, 2012.
- MOHARANA, S.; DUTTA, S. Spatial variability of chlorophyll and nitrogen content of rice from hyperspectral imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 122, p. 17–29, 2016.
- MOLIN, J. P.; FRASSON, F. R.; AMARAL, L. R.; POVH, F. P.; SALVI, J. V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.12, p.1345-1349, 2010.
- MONTEIRO, F. A.; COLOZZA, M. T.; WERNER, J. C. Enxofre e micronutrientes em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004 **Anais...** Piracicaba: FEALQ, p. 279-301, 2004.
- MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto**. 4 ed. Viçosa: Editora UFV, 422 p. 2011.
- MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, Amsterdam v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013.
- NIGON, T. J.; MULLAA, D. J.; ROSENA, C. J.; COHENB, Y.; ALCHANATISB, V.; KNIGHTC, J.; RUDB, R. Hyperspectral aerial imagery for detecting nitrogen stress in two potato cultivars. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 112, p. 36-46, 2015.
- NOVO, E.M.L. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2010. 387 p.
- NUTTER JR., F. W.; RIJ, N. V.; EGGENBERGER, S. K.; HOLAH, N. Spatial and Temporal Dynamics of Plant Pathogens. In: OERKE, E.-C.; GERHARDS, R.; MENZ, G.; SIKORA, R. A. **Precision Crop Protection: the Challenge and Use of Heterogeneity**. New York: Springer, p. 27-50, 2010.
- OERKE, E.-C.; STEINER, U. Potential of Digital Thermography for Disease Control. In: OERKE, E.-C.; GERHARDS, R.; MENZ, G.; SIKORA, R. A. **Precision Crop Protection: the Challenge and Use of Heterogeneity**. New York: Springer, p. 167-182, 2010.

- OKUMURA, R. S.; MARIANO, D. C. Aspectos agronômicos da ureia tratada com inibidor de uréase. **Ambiência**, Guarapuava, v. 8, n. 2, p. 403-414, 2012.
- OLIVEIRA, A. B.; PIRES, A. J. V.; NETO, U. M.; CARVALHO, G. G. P.; VELOSO, C. M.; SILVA, F. F. Morfogênese do capim-tanzânia submetido a adubações e intensidades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, p. 1006-1013, 2007.
- PESTANA, M. H.; GAGEIRO, J. N. **Análise de dados para ciências sociais: a complementariedade do SPSS**. 4ed. Lisboa: Silabo, 2005. 6900p.
- PILBEAM, D. J. The utilization of nitrogen by plants: a whole plant perspective. **Annual Plant Reviews**, v. 42, p. 305-351, 2011.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176p.
- QUINN, G.P.; KEOUGH, M.J. **Experimental Desing and Data Analysis for Biologists**. 2002. Cambridge University Press, Cambridge.
- RAMIREZ, G.M.; ZULLO JUNIOR, J. Estimativa de parâmetros biofísicos de plantios de café a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 468-479, 2010.
- RAJAN, R.; CHOPRA, U. K.; SAHOO, R. N.; SINGH, A. K.; PRADHAN, S. Assessment os plant nitrogen stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through hyperspectral indices. **International Journal of Remote Sensing**, Oxford, v. 33, n. 20, p. 6342-6360, 2012.
- REDDY, K. R.; MATCHA, S. K. Remote sensing algorithms for castor bean nitrogen and pigment assessment for fertility management. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 32, n. 3, p. 411-419, 2010.
- REYNOLDS, C. M.; WOLF, D. C.; ARMBRUSTER, J. A. Factors related to urea hydrolysis in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 104-108, 1985.
- RODRIGUEZ, D.; FITZGERALD, G. J.; BERFORD, R.; CHRISTENSEN, L K. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 57, p. 781-789, 2006.
- RODRIGUEZ-PEREZ, J. R.; ORDONEZ, C.; GONZALEZ-FERNANDEZ, A. B.; SANZ-ABLANEDO, E.; VALENCIANO, J. B.; MARCELO, V. Leaf water content estimation by functional linear regression of field spectroscopy data. **Biosystems Engineering**, v. 165, p. 36-46, 2018.
- ROSA, H. J. A.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 9, p. 840-848, 2015.
- RYLE, G. J. A. A comparison of leaf and tiller growth in seven perennial grasses as influenced by nitrogen and temperature. **Grass and Forage Science**, v. 19, n. 3, p. 281-290, 1964.

- RYU, C.; SUGURI, M.; UMEDA, M. Model for predicting the nitrogen content of rice at panicle initiation stage using data from airborne hyperspectral remote sensing. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 104, n. 4, p. 465-475, 2009.
- SANKARAN, S.; MISHRA, A.; EHSANI, R.; DAVIS, C. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 72, p. 1-13, 2010.
- SARMENTO, P.; RODRIGUES, L. R. A.; LUGAO, S. M. B.; CRUZ, M. C. P.; CAMPOS, F. P.; FERREIRA, M. E. Respostas agrônômicas e morfológicas de *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio, sob pastejo, à adubação nitrogenada. **Boletim de Indústria Animal**, v. 62, n. 4, p. 333-346, 2005.
- SAEYS, W.; MOUAZEN, A. M.; RAMON, H. Potential for on site and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v. 91, p. 393-402, 2005.
- SHAVER, T. M.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D. G.; Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v. 12, p. 892-904, 2011.
- SHI, Z.; WANG, Q.; PENG, J.; JI, W.; LIU, H.; LI, X.; ROSSEL, R. A. V. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations. **Science China Earth Sciences**, v. 57, n. 7, p. 1671-1680, 2014.
- SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 337-354, 2002.
- SINGH, S. K.; HOUX III, J. M.; MAW, M. J. W.; FRITSCHI, F. B. Assessment of growth, leaf N concentration and chlorophyll content of sweet sorghum using canopy reflectance. **Field Crops Research**, v. 209, p. 47-57, 2017.
- SKIDMORE, A. K.; FERWERDA, J. G.; MUTANGA, O.; VAN WIEREN, S. E.; PEEL, M.; GRANT, R. C.; PRINS, H. H. T.; BALCIK, F. B.; VENUS, V. Forage quality of savannas: simultaneously mapping foliar protein and polyphenols for trees and grass using hyperspectral imagery. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 114, n. 1, p. 64-72, 2010.
- SONOBE, R.; SANO, T.; HORIE, H. Using spectral reflectance to estimate leaf chlorophyll content of tea with shading treatments. **Biosystems Engineering**, v. 175, p. 168-182, 2018.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre:Artemed, 2013. 954p.
- TAJGARDAN, T.; AYOUBI, S.; SHATAEE, S.; SAHRAWAT, K.L. Soil surface salinity prediction using ASTER data: comparing statistical and geostatistical models. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 4, n. 3, p. 457- 467, 2010.
- TAVARES, Tiago Rodrigues. **Espectroscopia de reflectância in situ na avaliação da resposta da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

- TODD, S.W.; HOFFER, R.M.; MILCHUNAS, D.G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v, 19, n. 3, p. 427-438, 1998.
- TRICKER, P. J.; CALFAPIETRA, C.; KUZMINSKY, E.; PULEGGI, R.; FERRIS, R.; NATHOO, M.; PLEASANTS, L. J.; ALSTON, V.; ANGELIS, P.; TAYLOR, G. Long-term acclimation of leaf production, development, longevity and quality following 3 yr exposure to free-air CO₂ enrichment during canopy closure in *Populus*. **New Phytologist**, v. 162, n. 2, p. 413-426, 2004.
- VISCARRA ROSSEL, R. A. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 90, p. 72-83, 2008.
- WANG, Q.; LI, P. Identification of robust hyperspectral indices on forest leaf water content using PROSPECT simulated dataset and field reflectance measurements. **Hydrological Processes**, Hoboken, v. 26, n. 8, p. 1230-1241, 2012.
- WERNER, J.C. **Adubação de pastagens**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1986. 49p. (Boletim Técnico, 18).
- WEST, J. S. *et al.* Detection of Fungal Diseases Optically and Pathogen Inoculum by Air Sampling. In: OERKE, E.-C.; GERHARDS, R.; MENZ, G.; SIKORA, R. A. **Precision Crop Protection: the Challenge and Use of Heterogeneity**. New York: Springer, p. 135-149, 2010.
- YELLE, S.; BEESON, R. C.; TRUDEL, M. J.; GOSSELIN, A. Acclimation of to two tomato species to high atmospheric CO₂: I. sugar and starch concentrations. **Plant Physiology**, v. 90, p. 1465-1472, 1989.
- YI, Q.; HUANG, J.; WANG, F.; XAI, W. Evaluating the performance of PC-ANN for the estimations of rice nitrogen concentration form canopy hyperspectral reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, Oxford, v. 32, p. 931-940, 2012.
- ZHAO, D.L.; REDDY, K.R.; KAKANI, V.G.; READ, J.J.; KOTI, S. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 26,p. 335–344, 2007.