

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA

ÍNDICES ESPECTRAIS EM PASTAGEM NATURAL SOB DIFERENTES OFERTAS
DE FORRAGEM NO BIOMA PAMPA

Daniele Gutterres Pinto Ogliari
Engenheira Agrônoma/UFRGS
Mestre em Fitotecnia/UFRGS

Tese apresentada como um dos requisitos
à obtenção do Grau de Doutor em Fitotecnia
Área de concentração Sistemas de Produção Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Janeiro de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Gutterres Pinto Ogliari, Daniele
Índices espectrais em pastagem natural sob
diferentes ofertas de forragem no bioma Pampa /
Daniele Gutterres Pinto Ogliari. -- 2020.
74 f.
Orientadora: Denise Cybis Fontana.

Coorientadora: Carolina Bremm.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Índice de vegetação. 2. Pastagem natural. I.
Cybis Fontana, Denise, orient. II. Bremm, Carolina,
coorient. III. Título.

DANIELE GUTTERRES PINTO OGLIARI
Engenheira Agrônoma - UFRGS
Mestre em Fitotecnia - UFRGS

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOCTORA EM FITOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 21.01.2020
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 06.05.2020
Por

DENISE CYBIS FONTANA
Orientadora - PPG Fitotecnia
UFRGS

CHRISTIAN BREDEMEIER
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia

CHRISTIAN BREDEMEIER
PPG Fitotecnia/UFRGS

ANA PAULA ASSUMPTÃO CORDEIRO
PPGSR/UFRGS

TATIANA MORA KUPLICH
INPE

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família em especial ao meu pai, Renato que sempre incentivou os meus estudos e proporcionou oportunidades que me trouxeram até aqui. Ao meu irmão Renato, sou grata pelo companheirismo ao longo das nossas vidas. Agradeço ao meu esposo Lucas, por sempre me dar apoio e incentivo durante o doutorado, mesmo nos momentos mais difíceis. Ele e a Lila me dão mais força para superar os percalços do caminho. Aos demais familiares agradeço por todo apoio e ajuda.

Agradeço a minha orientadora Denise Cybis Fontana que desde a iniciação científica me orienta, me ensina e para mim é um exemplo profissional e pessoal.

A minha co-orientadora Carolina Bremm por toda a ajuda na construção e execução deste trabalho. E pela oportunidade de trabalhar com um objeto tão bonito como os campos naturais.

Aos professores, colegas, e mais que isso, amigos do departamento de Agrometeorologia, pelos ensinamentos técnicos e pela agradabilíssima convivência diária.

Aos meus amigos, agradeço pelos momentos de descontração, que muitas vezes deram o fôlego necessário para continuar e que tornam a caminhada neste plano mais alegre e leve.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul onde estudo desde a graduação, em especial ao PPG Fitotecnia onde desenvolvi meus estudos de Pós Graduação. E a CAPES, pela possibilidade de dar continuidade aos estudos.

ÍNDICES ESPECTRAIS EM PASTAGEM NATURAL SOB DIFERENTES OFERTAS DE FORRAGEM NO BIOMA PAMPA

Autor: Daniele Gutterres Pinto Ogliari

Orientadora: Denise Cybis Fontana

Co-orientadora: Carolina Bremm

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento espectral de uma pastagem natural submetida a diferentes ofertas de forragem, assim como identificar indicadores espectrais que possam auxiliar nas estratégias de manejo das pastagens naturais, com vistas à sustentabilidade e conservação dos campos do bioma Pampa, assim como também para a otimização da produção animal. A área de estudos é um experimento de longa duração, composto de 64 ha de pastagem natural, na Estação Experimental da UFRGS, situada no município de Eldorado do Sul, área inserida dentro do bioma Pampa. O delineamento experimental foi de blocos casualizados com duas repetições de área por tratamento. Os tratamentos foram diferentes ofertas de forragem, fixas ao longo do ano: 4, 8, 12 e 16 kg de MS/100 kg de peso vivo. Foram analisados dados indicadores de estrutura da pastagem: massa de forragem, altura e percentual de touceiras. Como indicadores espectrais, foram utilizados dados obtidos pelos sensores orbitais, Terra/MODIS e Landsat/TM e OLI, assim como por uma câmera digital a bordo de um drone. Com os dados orbitais foram calculados índices de vegetação NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), EVI (Índice de Vegetação Realçado) e GN (*Greenness*), de forma a caracterizar a quantidade de biomassa e sua dinâmica ao longo do ano. Com as imagens obtidas com o drone foram testados classificadores para o mapeamento do percentual de estrato superior, o que caracteriza a qualidade da pastagem. Os resultados mostraram que os sensores testados carregam informações úteis para sistemas de monitoramento de campos do bioma Pampa. Os índices são capazes de caracterizar a variação sazonal, interanual e de nível de oferta de forragem. Os maiores índices de vegetação ocorrem no outono e primavera e menores valores no inverno. As unidades experimentais com menor oferta de forragem apresentam os maiores valores dos índices espectrais, o que evidencia que as diferentes ofertas de forragem causam alterações na estrutura da vegetação que são detectáveis pelos índices espectrais. De maneira geral, os coeficientes de correlação entre as variáveis de estrutura do pasto e os índices espectrais são negativos e significativos estatisticamente. O índice espectral com maior importância relativa para estimativas das variáveis de estrutura do pasto é o GN. Com os dados coletados por uma câmera digital, a bordo de um drone, nas bandas do infravermelho, verde e azul, e, utilizando os classificadores SVM e RF, é possível diferenciar os grupos vegetais que compõem os estratos inferior e superior.

¹Tese de doutorado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, (74f), Janeiro, 2020.

SPECTRAL INDICES OF A NATURAL GRASSLAND UNDER DIFFERENT LEVELS OF HERBAGE ALLOWANCE IN PAMPA BIOME.

Author: Daniele Gutterres Pinto Ogliari

Adviser: Denise Cybis Fontana

Co-adviser: Carolina Bremm

ABSTRACT

The objective of this work was to study the spectral behavior of a natural grassland subjected to different forage allowances, to identify spectral indicators that may help in natural grassland management strategies, with a view to sustainability and conservation of Pampa biome, as well as also for the optimization of animal production. The study area is a long-term experiment, of 64 ha of natural grassland, at the Agronomic Experimental Station of UFRGS, located in Eldorado do Sul, within the Pampa biome. The design is randomized blocks with two replicates. The treatments were different levels of forage allowance, fixed throughout the year: 4, 8, 12 and 16 kg dry matter/100 kg live weight. Indicators of pasture structure were analyzed: forage mass, height and tussock percentage. As spectral indicators were used data obtained by orbital sensors, Terra/MODIS and Landsat/TM and OLI, as well as a digital camera aboard a drone. With orbital data, it were calculated NDVI, EVI and GN vegetation indices, to characterize the amount of biomass and its dynamics throughout the year. With the drone images, classifiers were tested for the mapping of the tussock percentage, which characterizes the quality of the pasture. The results showed that the tested sensors carry useful information for Pampa biome field monitoring systems. The indices are able to characterize the seasonal, interannual and forage supply level variation. The highest vegetation indices occur in autumn and spring, and the lower values in winter. The experimental units with the lowest forage supply have the highest values of the spectral indices, which shows that the different forage offerings cause changes in the vegetation structure that are detectable by the spectral indices. In general, the correlations between the grazing structure variables and the spectral indices are negative, presenting low but significant correlation coefficients. The most relevant spectral index for estimates of pasture structure variables is GN. With the data collected by a digital camera, on board a drone, in the infrared, green and blue bands, and using the SVM and RF classifiers, it is possible to differentiate the plant groups that form the lower and upper strata.

¹Douctoral Thesis in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, (74p), January, 2020.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 O bioma Pampa e seus ecossistemas campestres.....	4
2.2 O processo de produção vegetal e as variáveis meteorológicas.....	6
2.3 Sensores e Produtos de sensoriamento remoto da vegetação.....	7
2.4 Índices de vegetação em estudos com campos naturais.....	10
2.5 Área de estudo.....	12
2.6 Referências bibliográficas.....	15
3. CAPÍTULO 1 - Variação temporal de índices de vegetação em pastagem natural submetida a diferentes ofertas de forragem no bioma Pampa.	19
3.1 Introdução.....	19
3.2 Material e métodos.....	21
3.3 Resultados e discussão.....	24
3.4 Conclusões.....	32
3.5 Referências Bibliográficas.....	32
4. CAPÍTULO 2 - Os sensores da série Landsat permitem identificar variação na estrutura do pasto sob diferentes ofertas de forragem?	35
4.1 Introdução.....	35
4.2 Material e métodos.....	37
4.3 Resultados e discussão.....	41
4.4 Conclusões.....	46
4.5 Referências Bibliográficas.....	46
5. CAPÍTULO 3 - Quantificação da área coberta por estrato superior, por método assifiação supervisionada, em pastagem natural no Bioma Pampa.	49
5.1 Introdução.....	49
5.2 Material e métodos.....	52
5.3 Resultados e discussão.....	54
5.4 Conclusões.....	61
5.5 Referências Bibliográficas.....	61
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO 1 - Variação temporal de índices de vegetação em pastagem natural submetida a diferentes ofertas de forragem no bioma Pampa.....	
1. Valores médios e desvio padrão residual (DP) dos índices de vegetação EVI, NDVI e da componente <i>Greenness</i> (GN), nas ofertas de forragem e estações do ano no período de 2004 a 2016. Eldorado do Sul, Brasil.....	29
CAPÍTULO 2 - Os sensores da série Landsat permitem identificar variação na estrutura do pasto sob diferentes ofertas de forragem?	
2. Correlações entre as médias e desvio padrão (DP) dos índices de vegetação NDVI, EVI e GN e as variáveis de estrutura do pasto: Altura do dossel, Massa de forragem (MF) e percentual de touceiras (% touceiras). Eldorado do Sul, Brasil, 2004-2017.....	44
CAPÍTULO 3 - Quantificação da área coberta por estrato superior, por método de classificação supervisionada, em pastagem natural no Bioma Pampa.	
3. Matrizes de confusão geradas em cada Unidade Experimental (3A, 7A, 1B, 5A, 6B, 4A) no processo de classificação. Eldorado do Sul, Brasil, 2019.....	57
4. Percentual de área de cada Unidade Experimental (UE) coberta por estrato superior, obtido através de avaliação a campo (%T - campo) e por classificação supervisionada (%T - imagem) nos distintos tratamentos de nível de oferta de forragem. Eldorado do Sul, Brasil, 2019.....	60

RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.	Abrangência do bioma Pampa. Fonte: Santino, Revista Ecossistemas/Espanha, 2004.....	4
2.	Localização da Estação Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, EEA-UFRGS. Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.....	12
3.	Parte da área pertencente a Estação Experimental da UFRGS. A área demarcada em preto são as parcelas do experimento Campo Nativo com os tratamentos de oferta de forragem fixas ao longo do ano: 4, 8, 12 e 16 kg de MS/100 kg de peso vivo. Eldorado do Sul, RS, Brasil, 2019. Fonte: Google Earth.....	13
4.	Imagem evidenciando as diferenças na estrutura da vegetação causadas pela imposição dos tratamentos de oferta de forragem. Vista geral do experimento (a) fonte: Gentil Felix, unidade experimental com baixa oferta de forragem (b), unidade experimental com alta oferta de forragem (c), mosaico formado por estrato superior e inferior (d), touceiras apresentando material morto (e) fonte: Marcelo Wallau.....	15
CAPÍTULO 1 - Variação temporal de índices de vegetação em pastagem natural submetida a diferentes ofertas de forragem no bioma Pampa.		
5.	Área de estudos, evidenciando a resolução espacial dos sensores utilizados no estudo. A esquerda imagem do sensor MODIS, salientado em vermelho os <i>pixels</i> MODIS utilizados, e a direita imagem do sensor OLI. Eldorado do Sul, RS, Brasil.....	22
6.	Perfis temporais dos índices de vegetação NDVI e EVI, obtidos a partir do sensor MODIS, dos anos 2004 a 2017. Eldorado do Sul, Brasil.....	24
7.	Perfis temporais médios dos índices de vegetação NDVI (a) e EVI (b), obtidos a partir do sensor MODIS. Os pontos representam as médias e as barras os valores mínimos e máximos ocorridos no período de 2004 a 2017, Eldorado do Sul, Brasil.....	25
8.	Variabilidade dos índices de vegetação NDVI, EVI e componente <i>Greenness</i> (GN), em função da oferta de forragem. Dados obtidos a partir dos sensores TM e OLI no período de 2004 a 2017. Eldorado do Sul, Brasil.....	27
9.	Variabilidade dos índices de vegetação NDVI, EVI e da componente <i>Greenness</i> (GN) em função do tratamento de oferta de forragem (4, 8, 12 e 16 KgMS 100kg PV ⁻¹) e da estação do ano. Dados obtidos a partir dos sensores TM e OLI no período de 2004 a 2016. Eldorado do Sul, Brasil.....	28
10.	Comparação dos dados de NDVI provenientes dos sensores MODIS e TM, nos anos de 2005 e 2009. Eldorado do Sul, Brasil.....	30
11.	Variação da temperatura média do ar (A), acumulado de precipitação pluvial (B) e ocorrência de déficit e excesso hídrico em 2005 (C) e déficit e excesso hídrico em 2009 (D). Eldorado do Sul, Brasil, 2019.....	31

CAPÍTULO 2 - Os sensores da série Landsat permitem identificar variação na estrutura do pasto sob diferentes ofertas de forragem?

12. Área experimental, evidenciando a resolução espacial dos sensores TM e OLI da série Landsat, utilizados no estudo e as ofertas de forragem 4%, 8%, 12% e 16%. Eldorado do Sul, Brasil..... 39
 13. Diagramas de caixa das variáveis de estrutura do pasto Altura do dossel (A), Massa de forragem (B), Percentual de touceiras (C) e dos índices de vegetação NDVI (D), EVI (E) e GN (F), em função do nível de oferta de forragem 4% (vermelho), 8% (verde), 12% (amarelo) e 16% (azul) e estações do ano. Eldorado do Sul, Brasil, 2004-2016..... 42
 14. Imagens de áreas pertencentes às unidades experimentais com oferta de forragem 4 kg de MS/100 kg de PV (A) e 16 kg de MS/100 kg de PV (B). Eldorado do Sul, Brasil, 2019..... 45
 15. Ordem de importância da média e desvio padrão dos índices de vegetação NDVI, EVI e GN para estimativas de altura do dossel (A), massa de forragem (B) e percentual de touceiras (C). Eldorado do Sul, Brasil, 2004-2017..... 46
- CAPÍTULO 3 - Quantificação da área coberta por estrato superior, por método de classificação supervisionada, em pastagem natural no Bioma Pampa.**
16. Mapas classificados (à esquerda), imagem de falsa cor: infravermelho, verde e azul (à direita) nas 6 Unidade Experimentais avaliadas (3A, 7A, 1B, 5A, 4A e 6B). Eldorado do Sul, Brasil, 2019..... 54
 17. Detalhes dos mapas classificados nas UE 5A (a) e 6B (b). Casos em que o algoritmo classificou adequadamente as diferentes classes. À esquerda está a imagem classificada e à direita a imagem de falsa cor. Eldorado do Sul, Brasil, 2019..... 60
 18. Detalhes dos mapas classificados nas UE 5A (a) e 6B (b). Casos em que o algoritmo não conseguiu classificar adequadamente as diferentes classes. À esquerda está a imagem classificada e à direita a imagem de falsa cor. Eldorado do Sul, Brasil, 2019..... 61

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é composto por seis diferentes biomas, entre eles está o bioma Pampa. Os campos do bioma Pampa estendem-se desde o Uruguai, províncias argentinas de Corrientes, Entre Rios, Santa Fé, Córdoba, Buenos Aires e La Pampa, e a metade Sul do Rio Grande do Sul, a região é denominada de *Pastizales del Rio de la Plata*. Assim como os demais biomas, o Pampa é de extrema importância ambiental, pois abriga uma grande quantidade de espécies da flora e fauna do sul do Brasil. Além da importância ambiental, o Pampa tem importância econômica, pois sobre ele é realizada grande parte da produção pecuária sul riograndense.

Apesar da importância para o Estado, as pastagens naturais situadas neste bioma vêm sofrendo modificações decorrentes da ação antrópica ao longo dos anos, especialmente associado ao avanço dos cultivos anuais, das florestas cultivadas e, além disto, decorrentes de uma pecuária com manejo, por vezes, inadequado. Estas modificações causam preocupação em relação à preservação do bioma. Este contexto evidencia a necessidade do desenvolvimento e da disponibilização de técnicas de manejo e ferramentas que auxiliem o produtor a realizar uma pecuária sustentável ambientalmente e economicamente.

Embora pareça simples, o Pampa é um bioma complexo composto por vários tipos de formações vegetais com presença de centenas de espécies de plantas, que coexistem e se sucedem ao longo do ano, altamente influenciadas pela sazonalidade climática da região. Outro aspecto importante para as formações vegetais presentes no Pampa é a ocorrência de anomalias climáticas, especialmente o déficit hídrico no período de verão e a ocorrência de geadas no período de inverno. Tão importante quanto as condições edafoclimáticas, é o pastejo, pela potencial ação na modificação da vegetação campestre. A intensidade com que o pastejo é realizado é capaz de modificar o hábito das espécies vegetais presentes, em alta intensidade de pastejo o hábito predominante é rasteiro, em baixa intensidade de pastejo começam a aparecer plantas de hábito cespitoso formadoras de touceiras. Estas touceiras influenciam de diversas formas o desempenho animal, assim como servem de abrigo para as espécies mais frequentemente pastejadas.

Rapidamente, se pode citar algumas relações importantes entre vegetação presente no Pampa e as variações das condições ambientais. A utilização dos recursos do Pampa, de forma sustentável, depende de um entendimento profundo destas relações complexas, possibilitando a equalização da preservação ambiental e a produtividade da atividade pecuária, através da criação de ferramentas que auxiliem na definição de ações de manejo.

Uma importante fonte de geração de dados para estudos da vegetação campestre é o sensoriamento remoto, sendo que especialmente no setor agropecuário há um acúmulo de conhecimento já consagrado neste sentido. Diversos estudos sobre a vegetação campestre do bioma Pampa, com o uso de imagens de satélite, foram realizados, sendo que, em muitos, são utilizados os índices de vegetação, originados a partir de medições em diferentes bandas espectrais. Estes índices podem ser obtidos através de imagens de diversos sensores atualmente disponíveis, sendo que cada sensor possui resoluções específicas, aspecto fundamental para subsidiar a escolha do sensor a ser utilizado. Por exemplo, o sensor MODIS em função da menor resolução espacial, é muito empregado para o monitoramento de grandes áreas, e em função da resolução temporal diária, é possível um acompanhamento sistemático das modificações que ocorrem na superfície de forma contínua desde o início da década de 2000. Já o sensor OLI, pela maior resolução espacial, quando comparado ao MODIS, permite um maior detalhamento em áreas menores. O MODIS, pela resolução temporal (revisita de um a dois dias) e disponibilização de produtos na forma de composição de máximos valores, diminui a interferência da nebulosidade nas imagens. Em imagens Landsat este problema de nebulosidade é muito evidente, pois a resolução temporal destes sensores é de 16 dias, se neste dia tiver nebulosidade na área a imagem fica inutilizável. As imagens destes sensores são disponíveis a qualquer usuário de forma gratuita. Outro tipo de sensor que está sendo muito utilizado são as câmeras a bordo de aeronaves remotamente pilotadas. As imagens capturadas por estas câmeras podem ser aplicadas em estudos mais específicos, como o monitoramento da quantidade de touceiras na vegetação campestre. Para o usuário, este tipo de produto é mais oneroso, pois é necessário a aquisição de uma aeronave e uma câmera ou contratação de uma empresa que preste este tipo de serviço.

Portanto, a motivação para execução deste estudo teve como base a importância ambiental e econômica do bioma Pampa e a necessidade de preservá-lo. Soma-se a isto a possibilidade de utilização e/ou adaptação de ferramentas já consagradas no setor agropecuário, oriundas de sensores remotos em diferentes níveis de aquisição de dados, utilizados de forma complementar na geração de informações, para fins de manejo dos campos situados no bioma Pampa. A **hipótese** deste trabalho é que a utilização de dados

espectrais em diferentes escalas espaciais e temporais possibilite a geração de informações, úteis e complementares acerca do estado dos campos naturais do bioma Pampa, permitindo através do monitoramento das áreas de pastagens naturais, a definição de melhores práticas de manejo, tendo em vista a sustentabilidade deste bioma.

O estudo tem como **objetivo geral**: estudar a variação do índices espectrais de uma pastagem natural submetida a diferentes ofertas de forragem, assim como identificar indicadores espectrais da quantidade e da qualidade da pastagem disponível aos animais, que possam auxiliar na definição de estratégias de manejo das pastagens naturais, com vistas a sustentabilidade e conservação dos campos do bioma Pampa, como também a otimização da produção animal.

Objetivos específicos do estudo:

- 1) Caracterizar a variabilidade anual e interanual da quantidade de biomassa disponível em áreas de campos naturais, utilizando índices espectrais obtidos com sensores orbitais.
- 2) Definir o índice espectral que melhor explique as variações na biomassa nos campos naturais submetido a diferentes ofertas de forragem.
- 3) Avaliar a acurácia da classificação do percentual de touceiras da pastagem natural, usando uma imagem obtida por câmera digital a bordo de um drone, como alternativa no monitoramento da qualidade da pastagem natural disponível aos animais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O bioma Pampa e seus ecossistemas campestres

Segundo o IBGE (2004), o Brasil é composto por seis diferentes biomas: Amazônia, Cerrado, Caatinga, Pantanal, Mata Atlântica e Pampa. O bioma Pampa, onde está inserida a área objeto de estudo deste trabalho, está restrito a metade meridional do Estado do Rio Grande do Sul (RS), ocupando uma área equivalente a 2,07% do território brasileiro e 63% do território Sul Riograndense. No entanto, o Pampa não está restrito ao Rio Grande do Sul, seus campos estendem-se ao sul e a oeste pela república oriental do Uruguai e províncias argentinas de Corrientes, Entre Rios, Santa Fé, Córdoba, Buenos Aires e La Pampa. Sendo assim, o bioma Pampa brasileiro é a porção mais ao norte desta grande região campestre (Overbeck *et al.*, 2015).



FIGURA 1. Abrangência do bioma Pampa. Fonte: Santino, Revista Ecossistemas/Espanha, 2004.

Embora pareça simples, é um bioma complexo, composto por vários tipos de formações vegetais, dentre as quais o campo dominado por gramíneas é a mais representativa. Entretanto, existem diferentes fisionomias campestres, dentre as quais pode-se citar: os campos de barba de bode (Planalto), os campos sobre solos rasos e solos

profundos (Campanha), os campos de areia, os campos da Depressão Central e os campos litorâneos (Boldrini, 2012). Quanto à variedade de espécies que compõem os campos deste bioma, são em torno de 450 espécies de gramíneas forrageiras e 150 espécies de leguminosas, além de plantas pertencentes às famílias das fanerógamas e compostas chegando a 3000 espécies (Boldrini, 1997). Além das espécies vegetais existentes nestes campos, eles ainda são o principal hábitat de uma boa parcela da fauna do Sul do Brasil (Bencke, 2012).

Os campos naturais são fonte de alimento para os rebanhos do Rio Grande do Sul desde o século XVII, quando foram trazidas 1.500 cabeças de gado para o Estado (Nabinger *et al.*, 2000). Além da pecuária ser uma atividade econômica importante para o Rio Grande do Sul, ela proporciona a conservação deste bioma. No entanto, a progressiva introdução e expansão das áreas com monoculturas e espécies exóticas têm levado à degradação as áreas do Pampa (Nabinger *et al.*, 2006). Em 2008, estimativas alertavam que restavam apenas cerca de 36% da vegetação nativa do Pampa (CSR/IBAMA, 2010), e de 1985 a 2017 houve perda de 17% de vegetação natural não florestal no Pampa em território Sul Riograndense (PROJETO MAPBIOMAS, 2019).

Além da degradação de áreas naturais do bioma Pampa pela introdução de outros tipos de uso do solo, existe também a degradação dos campos naturais pelo manejo insuficiente para a sua conservação. Pode-se destacar algumas práticas, como a falta de adequada subdivisão da propriedade em função das condições de solo e vegetação, o uso indiscriminado do fogo, a falta de uso da prática do diferimento de poteiros e o controle inadequado da intensidade de pastejo (Nabinger *et al.*, 2006).

O pastejo, por fim, é considerado um agente de distúrbio e modificação da vegetação campestre, sendo tão influente quanto o solo e clima (Boldrini, 1993). De acordo com a intensidade de pastejo, são modificadas as plantas que compõem a vegetação e o hábito de crescimento. Com baixas intensidades de pastejo, predominam plantas altas e eretas, enquanto que, com o aumento do pastejo, plantas baixas, prostadas ou rosuladas, e espécies com resposta intermediária, plantas eretas de estatura mediana (Boldrini, 1993). Uma das formas de manejar a intensidade de pastejo é através do ajuste da oferta de forragem (Nabinger *et al.*, 1998). Por sua vez, a oferta de forragem é a relação entre a quantidade de matéria seca por unidade de área e o número de unidades animal em qualquer ponto determinado no tempo (*The Forage and Grazing Terminology Committee*, 1991).

2.2 O processo de produção vegetal e as variáveis meteorológicas

As plantas produzem biomassa através do processo de fotossíntese, um processo fotoquímico que, simplificada, converte CO_2 atmosférico e água em compostos carbonados complexos, utilizando, como fonte energética, a radiação solar. Durante este processo, os vegetais utilizam a radiação solar para a oxidação da água, por consequência é liberado oxigênio, como também para reduzir o dióxido de carbono, tendo como produto final a formação de complexos carbonados, principalmente açúcares (Taiz & Zeiger, 2013).

Visto simplificada o processo de fotossíntese, sabe-se que ela é altamente influenciada pelas condições climáticas, especialmente pela disponibilidade de água e radiação solar. Estes dois elementos, em condições de campo são determinados pelas variáveis meteorológicas precipitação pluvial (PP) e radiação solar global (Rg), exceto quando se tem um cultivo irrigado.

Em condições de déficit hídrico, as plantas modificam o grau de abertura dos estômatos, diminuindo a abertura estomática e o transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera é reduzido. O CO_2 tem a sua entrada na planta por meio dos estômatos, uma abertura parcial destes diminui a entrada de CO_2 nos tecidos vegetais, reduzindo a taxa de fotossíntese, tanto pela diminuição da entrada de CO_2 como também pelo déficit hídrico (Chapin III *et al.*, 1987). A nível celular, a turgidez das células é reduzida, causando redução nas taxas de alongamento celular, o que diminui o crescimento vegetal (Claeys & Inze, 2013). Por sua vez, o acúmulo de biomassa se dá em função da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) interceptada pela área foliar, através dos processos fisiológicos que ocorrem no aparato fotossintético. Com menor crescimento vegetal, menor é a RFA interceptada pela planta. Também com a menor absorção de água do solo diminui a absorção de nitrogênio, diminuindo o conteúdo de clorofila das plantas (Bergamaschi, 2017).

Um segundo fator determinante para a realização da fotossíntese é a disponibilidade de radiação solar. Apenas uma fração, cerca de 50%, da radiação solar global incidente, pode ser absorvida pelas plantas, conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (RFA), compreendendo a faixa de comprimento de onda visível do espectro eletromagnético (400 a 700 nm) (Moreira, 2004). A radiação solar global é um elemento meteorológico ligado à evapotranspiração das plantas (Fontana & Oliveira, 1996).

Quando fala-se de pastagens naturais situadas dentro do bioma Pampa, mais especificamente na porção brasileira do Pampa, sabe-se que a vegetação está submetida a uma grande variabilidade climática que a influencia diretamente. No Rio Grande do Sul, a precipitação pluvial mensal interanual é muito variável. A chance de ocorrer evento de seca

é grande no Estado do Rio Grande do Sul, especialmente no verão (Berlato *et al.*, 1999; Fontana *et al.*, 2018).

Quanto à quantidade de radiação solar global no Rio Grande do Sul, nos solstícios de verão e inverno a declinação do sol é máxima 23° 27' norte e 23° 27' sul, respectivamente. Estas datas marcam o início do inverno e do verão para o hemisfério Sul (Bergamaschi, 2017). Em momentos de maior declinação solar, a quantidade de radiação que chega a superfície é menor em relação a momentos de menor declinação solar (Barry & Chorley, 2013). Sendo assim, para o crescimento vegetal o período mais crítico em termos de quantidade de radiação solar global é o período de inverno, mais especificamente os meses de junho e julho no Rio Grande do Sul.

Um terceiro elemento a ser levado em conta se tratando de pastagens naturais no RS é a temperatura do ar, visto que nestes ecossistemas há a coexistência de espécies C3 (hibernais) e C4 (estivais). Nas pastagens do sul do Brasil, muitas vezes, o número de espécies hibernais é baixo, devido ao manejo inadequado empregado às pastagens (Nabinger *et al.*, 2006). Assim, em baixas temperaturas as pastagens naturais do Rio Grande do Sul apresentam baixo crescimento, pois as espécies mais abundantes nestes campos são espécies C4, que não se desenvolvem em baixas temperaturas do ar.

Desta forma, podemos perceber a existência de dois períodos críticos ao longo do ano para a produção vegetal em pastagens naturais. O inverno, devido à baixa incidência de radiação solar global e baixas temperaturas do ar, e o verão, onde a chance de as plantas sofrerem estresse pela ocorrência de déficit hídrico é alta.

2.3 Sensores e Produtos de sensoriamento remoto da vegetação

Atualmente, estão operando uma grande quantidade de sensores remotos, com resoluções espectrais, espaciais, radiométricas e temporais variáveis. Três sensores orbitais de ampla utilização que podem ser citados são o MODIS (*Moderate Resolution Spectroradiometer Imaging*) a bordo das plataformas Terra e Aqua, e os sensores TM (*Thematic Mapper*) e OLI (*Operational Land Imager*) da série Landsat.

O MODIS possui resolução temporal de um a dois dias, adquirindo dados em 36 bandas espectrais nos comprimentos de onda de 405 nm a 1.438 nm, em três resoluções espaciais: 250 m, 500 m e 1.000 m (NASA, 2019). O sensor TM possui resolução temporal de 16 dias, adquire dados em sete bandas espectrais nos comprimentos de onda de 450 nm a 2.350 nm, com resoluções espaciais de 30 m e 120 m. O sensor OLI possui resolução temporal de 16 dias também, no entanto adquire dados em 11 bandas espectrais nos

comprimentos de onda de 433 nm a 2.300 nm, com resoluções espaciais de 15 m, 30 m e 100 m.

O sensor MODIS foi lançado e começou a adquirir dados em fevereiro de 2000 (NASA, 2019). Já o sensor TM foi lançado em março de 1984 e operou adquirindo imagens até novembro de 2011. Em fevereiro de 2013 foi lançado o sensor OLI (NASA, 2019).

Outro tipo de sensor que vem sendo muito utilizado em pesquisas no setor agropecuário são as câmeras a bordo de aeronaves remotamente pilotadas (ARP). Este tipo de dado pode ser adquirido de acordo com o interesse do usuário. As câmeras que podem ser utilizadas neste tipo de aquisição de imagens são muito variáveis, desde câmeras fotográficas básicas até câmeras de maior qualidade e custo.

A partir de dados registrados das bandas espectrais pelos sensores podem ser calculados os índices de vegetação (IV), que são amplamente empregados como indicadores da presença e condição da vegetação. A maior parte destes índices relaciona a reflectância nas faixas de comprimento de onda do visível e infravermelho próximo na forma de razões para minimizar a variabilidade causada por elementos externos (ângulo solar, atmosfera e solo) (Ponzoni *et al.*, 2012).

A proposição destes índices é fundamentada na resposta antagônica da reflectância da vegetação nas regiões espectrais do visível e infravermelho próximo. Quanto maior for a densidade da cobertura vegetal em uma área, menor será a reflectância no visível, em razão da maior oferta de pigmentos fotossintetizantes para a absorção da radiação solar. Em contraponto, maior será a reflectância no infravermelho próximo, devido ao efeito do espalhamento múltiplo (Ponzoni *et al.*, 2012; Jensen, 2009).

Como o índice de vegetação é resultante da combinação de valores de dois ou mais intervalos de comprimento de onda, há uma diminuição no volume de dados a serem analisados, visto que toda a informação fica resumida a somente um único valor numérico, permitindo a entrada desses dados em modelos agrometeorológicos-espectrais com maior facilidade (Rizzi, 2004). Além disto, os índices de vegetação são métodos não destrutivos de estimativa de biomassa, podendo substituir os métodos destrutivos quando não é possível o emprego destes, nos quais é necessário a coleta de plantas (Aparício, 2000).

Diversos índices de vegetação vêm sendo propostos na literatura, sendo que os mais frequentemente utilizados são os índices: NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (Rouse *et al.*, 1973) e EVI - *Enhanced Vegetation Index* (Huete *et al.*, 1997).

O NDVI é obtido pela razão entre a diferença e soma da reflectância das bandas do infravermelho próximo e vermelho (Equação 1) (Jensen, 2009). Por ser uma normalização,

a variação deste índice é de -1 a 1. Os perfis temporais de NDVI são úteis para a detecção de variações sazonais e fenológicas, duração do período de crescimento, pico de verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência (Ponzoni *et al.*, 2012; Junges *et al.*, 2016).

$$NDVI = \frac{\rho_{ivp} - \rho_v}{\rho_{ivp} + \rho_v} \quad (1)$$

Sendo: ρ_{ivp} a reflectância no infravermelho próximo; ρ_v a reflectância no vermelho.

O EVI (Equação 2), apresenta melhorias em relação ao NDVI, por conter um fator de ajuste para solos (L), e dois coeficientes (C_1 e C_2), que descrevem o uso da banda azul para correção da banda vermelha quanto ao espalhamento atmosférico por aerossóis e um fator de ganho (G) (Jensen *et al.*, 2009). O EVI é mais sensível em regiões com grandes quantidades de biomassa (Huete *et al.*, 1997; Ponzoni *et al.*, 2012), pois o NDVI apresenta saturação em altas quantidades de biomassa. Foi proposto uma outra forma de cálculo para o EVI, o EVI 2 (Equação 3), de forma a evitar o excesso de correção atmosférica, causada pela alta reflexão da banda azul (Solano *et al.*, 2010).

$$EVI = G \frac{(\rho_{ivp} - \rho_v)}{(L + \rho_{ivp} + C_1 * \rho_v - C_2 * \rho_a)} \quad (2)$$

$$EVI\ 2 = 2,5 * \frac{(\rho_{ivp} - \rho_v)}{(\rho_{ivp} + 2,4\rho_v + 1)} \quad (3)$$

Sendo: ρ_{ivp} a reflectância no infravermelho próximo; ρ_v a reflectância no vermelho; ρ_a a reflectância no azul; L é a constante que minimiza o efeito do solo; G é o fator de ganho; C_1 e C_2 são os fatores de ajuste para minimização do efeito dos aerossóis da atmosfera.

Outra forma de analisar dados de sensoriamento remoto é através da *Tasseled Cap Transformation*. Segundo Crist (1985), esta transformação fornece um mecanismo para a redução do volume de dados e melhor interpretabilidade dos dados.

Esta transformação foi desenvolvida com a finalidade de acompanhamento do desenvolvimento de culturas agrícolas. Esta transformação foi proposta por Kauth e Thomas (1976), os autores perceberam que os gráficos de espalhamento das cenas agrícolas apresentavam propriedades constantes quando envolviam as bandas do verde, do vermelho

e do infravermelho próximo. A trajetória assumida pelos pixels lembrava o formato de um chapéu (*Tasseled cap*). A transformação reprojeta os dados em três eixos fixos e ortogonais denominados *brightness*, *greenness* e *yeloowstuff* ou *wetness*. O primeiro eixo (*brighthness*) é capaz de indicar o tipo de solo. O segundo eixo (*greenness*) corresponde ao teor vegetativo do pixel e o terceiro eixo (*wetness*) é capaz de indicar a umidade do solo ou do plantio (Zanotta *et al.*, 2019).

2.4 Índices de vegetação em estudos com campos naturais

O comportamento espectral de um determinado alvo reflete a forma como este alvo interage com a radiação eletromagnética. Quando se trata de vegetação, é importante compreender como se dá o processo de interação entre a radiação eletromagnética e os diversos tipos de dosséis, que podem ser florestas, cultivos agrícolas, campos naturais, entre outros tipos de formações vegetais (Ponzoni *et al.*, 2012). Estes apresentam comportamento espectral distintos, pois possuem diferentes espécies com distintos arranjos e arquitetura de folhas, ciclos variados, sazonalidade diferente, entre outros, sendo, portanto, muitos os fatores que influenciam o padrão de resposta espectral dos dosséis vegetais.

No caso dos campos naturais, os índices de vegetação são uma fonte de dados para monitoramento da dinâmica e de sua variabilidade. Diversos trabalhos têm sido realizados analisando a vegetação dos campos naturais com índices de vegetação em diferentes escalas e com objetivos distintos. Fontana *et al.* (2007) avaliaram os perfis temporais como indicadores da dinâmica temporal da vegetação em regiões de campos no RS, através de imagens de NDVI/AVHRR/NOAA. Os resultados apontaram que os menores valores de NDVI observados foram nos meses de outono e inverno, com valores mínimos de NDVI variando entre 0,4 e 0,45. O mês com menores valores de NDVI é julho, coincidindo com o mês mais frio do ano. Os autores atribuíram estes baixos valores de NDVI às baixas temperaturas que ocorrem no inverno aqui no Rio Grande do Sul e a baixa disponibilidade de radiação solar global. No período de primavera verão, foram encontrados os máximos valores de NDVI, variando de 0,50 a 0,58. Neste período, foram observadas as maiores diferenças entre as regiões em estudo, o que foi atribuído, principalmente, à variação na precipitação pluvial.

Wagner *et al.* (2018), também avaliaram a dinâmica temporal dos campos, mas utilizaram os índices NDVI e EVI em 13 diferentes tipos campestres no bioma Pampa, a partir de imagens MODIS, com resolução espacial mais detalhada em relação às imagens AVHRR. O maior detalhamento tornou possível verificar que o perfil temporal apresenta

dois picos máximos dos índices de vegetação, um no outono e um na primavera. Estes resultados evidenciaram que existem diferenças espectrais na vegetação predominante nos campos do bioma Pampa, as quais estão associadas ao ambiente onde a vegetação está submetida, respondendo ao tipo de solo, às variáveis meteorológicas, às espécies presentes na área, entre outras.

Posteriormente, Moreira *et al.* (2019) também utilizaram imagens de NDVI e EVI do sensor MODIS para caracterizar o padrão sazonal médio da vegetação das pastagens e sua variabilidade, além de identificar semelhanças no padrão sazonal entre as diferentes tipologias campestres no RS. Os resultados indicaram que as tipologias campestres apresentaram perfis consistentes com a dinâmica sazonal da vegetação de pastagem sob influência do clima subtropical, com valores mais altos nas estações quentes (primavera e verão) e menores nos períodos mais frios (outono e inverno). Ambos os índices apresentam maior variabilidade durante a primavera e o verão. Os autores verificaram que existe semelhança neste padrão, sugerindo que existem quatro grupos tipológicos nas pastagens naturais do RS, evidenciando necessidades distintas de manejo destas pastagens naturais

Já Junges *et al.* (2016) utilizaram imagens de NDVI e EVI do sensor MODIS para caracterizar a evolução temporal de campos naturais no bioma Pampa e analisaram o potencial de uso dos índices de vegetação para discriminar padrões de intensidades de pastejo em uma área experimental de cerca de 64 ha na Depressão Central do Estado. Os autores concluíram que os índices de vegetação obtidos com o MODIS podem caracterizar a evolução temporal da biomassa verde das pastagens naturais e elas refletem adequadamente as interações entre clima-planta-animal. O EVI foi eficiente para discriminar a intensidade moderada de pastejo, das baixa e alta intensidades de pastejo durante qualquer estação do ano. Já o NDVI é mais adequado para discriminar as intensidades de pastejo na primavera e inverno.

Na mesma área do estudo anterior, Fontana *et al.* (2018), relacionaram a dinâmica do NDVI com as condições meteorológicas e à dinâmica anual de acúmulo de biomassa em pastagens naturais, também utilizando imagens do sensor MODIS. Neste estudo, foi possível quantificar conceitos já conhecidos, de que o inverno é a estação crítica para a produção animal, devido à menor taxa de acúmulo de forragem e menores valores de NDVI, condicionados pela diminuição da radiação solar e temperatura do ar. Durante o verão, o fator limitante para o crescimento das pastagens é a condição hídrica.

2.5 Área de estudo

A área de estudo é um experimento de longa duração, localizado na Estação Experimental Agrônoma da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), situada no município de Eldorado do Sul (Figura 2). São 64 hectares de pastagens naturais que vem recebendo o mesmo nível de interferência antrópica a aproximadamente 32 anos. O experimento foi criado em função da necessidade de geração de conhecimento a respeito das pastagens naturais do Rio Grande do Sul, idealizado pelos pesquisadores do Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da Faculdade de Agronomia da UFRGS (Maraschin, 2017).

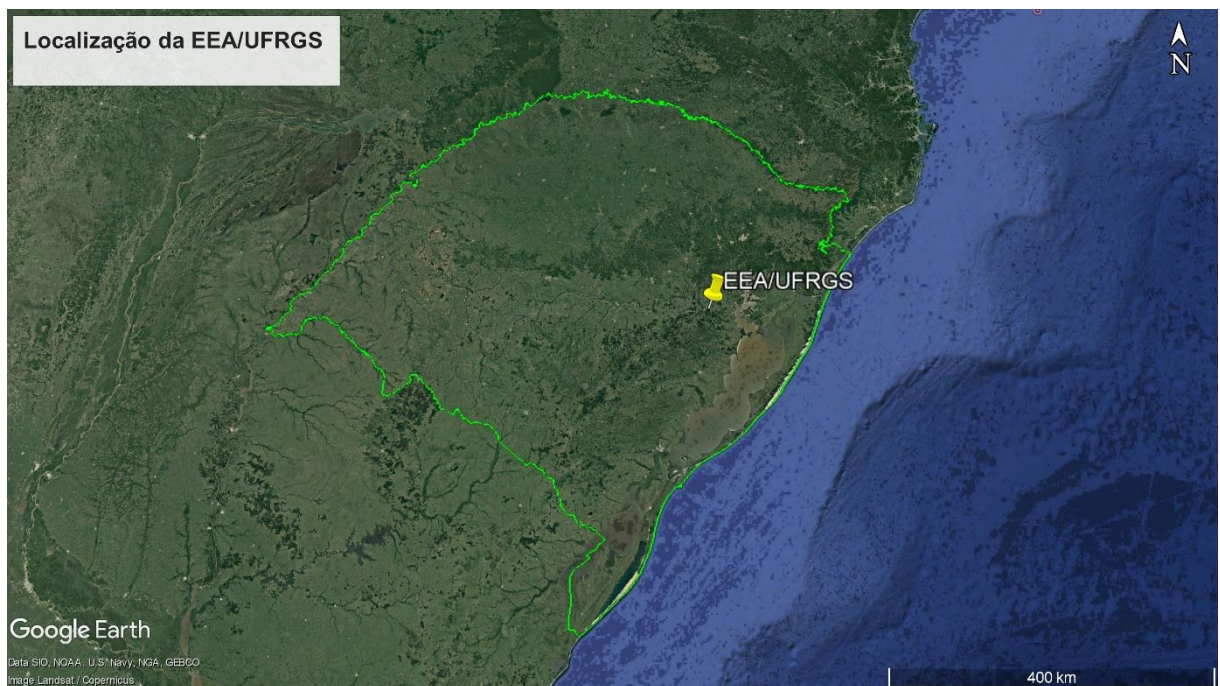


FIGURA 2. Localização da Estação Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, EEA-UFRGS. Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

O relevo na área experimental é suave ondulado, com presença de áreas baixas susceptíveis ao alagamento. Os solos presentes na área são de origem sedimentar, sendo que ocorrem três diferentes tipos de solos: Planossolo Háptico Distrófico êndico, Argissolo Vermelho Distrófico típico e Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (Mello *et al.*, 1966; Machado & Giasson, 2016).

O clima da região é classificado como Cfa, o tipo predominante no Rio Grande do Sul, segundo a classificação climática de Köppen (Alvares *et al.*, 2014). A precipitação pluvial média anual na EEA/UFRGS é de 1.440 mm, com média mensal de 120 mm. A temperatura média do ar varia de 13,5 °C nos meses mais frios (junho e julho) a 24,6 °C nos meses mais

quentes (janeiro e fevereiro). As médias diárias da radiação solar global oscilam de 206 (junho) a 509 cal.cm⁻².dia (dezembro) (Bergamaschi *et al.*, 2012).

Os tratamentos consistem em diferentes ofertas de forragem, fixas ao longo do ano e variáveis na estação primaveril. As ofertas fixas são: 4, 8, 12 e 16 kg de MS/100 kg de peso vivo, enquanto as ofertas variáveis são 8-12% (8% na primavera e 12% no restante do ano), 12-8% (12% na primavera e 8% no restante do ano) e 16-12% (16% na primavera e 12% no restante do ano) (Figura 3).

O delineamento experimental é de blocos casualizados, com duas repetições por tratamento. O método de pastejo utilizado é o de lotação contínua com taxa de lotação variável (Mott & Lucas, 1952), sendo que, para o ajuste da lotação animal, preconiza-se a oferta de forragem. A carga animal é ajustada em intervalos de aproximadamente 28 dias, de acordo com a massa de forragem disponível para pastejo nas unidades experimentais. A massa de forragem (kg.ha⁻¹ de MS) é medida por meio da técnica da dupla amostragem descrita por Wilm *et al.* (1944), enquanto a altura do pasto é determinada com auxílio de um bastão graduado ('Sward Stick'), segundo método proposto por Barthram (1985). Os animais utilizados nas unidades experimentais são novilhas de corte, oriundas de cruzamentos entre as raças Angus, Hereford e Nelore, com idade média inicial de 12 meses. Os animais permanecem no experimento por aproximadamente um ano, quando retornam à área de origem e novas novilhas iniciam um novo ciclo de avaliações.



FIGURA 3. Parte da área pertencente a Estação Experimental da UFRGS. A área demarcada em preto são as parcelas do experimento Campo Nativo com os tratamentos de oferta de forragem fixas ao longo do ano: 4, 8, 12 e 16 kg de MS/100 kg de peso vivo. Eldorado do Sul, RS, Brasil, 2019. Fonte: Google Earth.

Na Figura 4, pode-se observar algumas fotos do experimento. As distintas pressões de pastejo presentes no experimento provocaram diferenças na estrutura da vegetação. Nas áreas com menor oferta de forragem, há um aspecto de gramado uniforme (Figura 4b). Nas áreas de média e alta oferta de forragem, a vegetação há um aspecto de mosaico, que pode ser observado nas Figuras 4a, 4c, 4d (Boldrini, 1993). Além disto, o manejo da oferta de forragem determinou duas estruturas: um estrato inferior, uniforme, com maior presença de folhas verdes, de porte mais baixo e composto principalmente por espécies de hábito de crescimento prostrado ou rizomatoso como: *Paspalum notatum*, *Axonopus affinis*, *Paspalum pumilum*, *Piptochaetium montevidense* e *Paspalum paucifolium*. A outra estrutura é um estrato superior, touceiras formadas por espécies de hábito cespitoso como: *Andropogon lateralis*, *Aristida jubata*, *Aristida leavis*, *Bacharis trimera*, *Erianthus* sp., *Eryngium horridum* e *Schyzachirium microstachyum* (Figura 4d). O estrato superior é encontrado nas áreas com tratamentos de média e alta oferta, e possui maior quantidade de material morto (Figura 4e).

Quanto à composição florística encontrada na área experimental, Boldrini (1993) encontrou 209 espécies vegetais, representadas por 37 famílias, das quais 68,8% das espécies são representadas por cinco famílias: *Gramineae*, com 54 espécies (25,8%), *Compositae*, com 46 espécies (22%), *Leguminosae*, com 18 espécies (8,6%), *Cyperaceae*, com 14 espécies (6,7%) e *Rubiaceae*, com 12 espécies (5,7%). As outras 32 famílias encontradas estão representadas por 31,2% das espécies.

Este protocolo vem sendo realizado com o intuito de analisar a produção da pastagem, o desempenho animal individual e por área, além das relações entre as características do ambiente pastoril e as decisões tomadas por bovinos sob diferentes ofertas de forragem.



FIGURA 4. Imagem evidenciando as diferenças na estrutura da vegetação causadas pela imposição dos tratamentos de oferta de forragem. Vista geral do experimento (a) Fonte: Gentil Felix, unidade experimental com baixa oferta de forragem (b), unidade experimental com alta oferta de forragem (c), mosaico formado por estrato superior e inferior (d), touceiras apresentando material morto (e) Fonte: Marcelo Wallau.

2.6 Referências bibliográficas

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

APARÍCIO, N. et al. Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, Madison, v. 92, n.1, p. 83-91, 2000.

- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2013.
- BARTHURAM, G.T. Experimental techniques: the HFRO sward stick. In: HILL Farming Research Organization. Biennial Report, 1985. p. 29-30.
- BENCKE, G. A. Diversidade e conservação da fauna dos campos do Sul do Brasil. In: PILLAR, V.D.P. et al. (ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, MMA, 2012. p. 63-77.
- BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da estação experimental da UFRGS** (e região de abrangência). Porto Alegre: UFRGS, 2012. 77 p.
- BERGAMASCHI, H. Água. In. BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. (Org.) **As Plantas e o Clima**. Guaíba: AgroLivros, 2017. p. 257-312.
- BERGAMASCHI, H. Radiação Solar. In. BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. (Org.). **As Plantas e o Clima**. Guaíba: AgroLivros, 2017. p. 25-84.
- BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no Estado do Rio Grande do Sul e os impactos da estiagem na produção agrícola. In: BERGAMASCHI, H. (Org.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1999. p.11-23.
- BOLDRINI, I.I. **Dinâmica da vegetação de uma pastagem natural sob diferentes níveis de oferta de forragem e tipos de solo, Depressão Central, RS**. 1993. 262f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Curso de Pós-Graduação em Zootecnia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.
- BOLDRINI, I.I. Campos do Rio Grande do Sul: caracterização fisionômica e problemática ocupacional. **Boletim do Instituto de Biociências**, Porto Alegre, n. 56, 39 p., 1997.
- BOLDRINI, I. I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V.D.P. et al. (Ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, MMA, 2012. p. 63-77.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS RENOVÁVEIS. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite**: monitoramento do bioma Pampa. Brasília, 2010. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatorio_tecnico_monitoramento_de_smate_bioma_pampa_72.pdf. Acesso em: 14 jun. 2019.
- CHAPIN III, F.S. et al. Plant response to multiple environmental factors. **BioScience**, Washington, v.37, n.1, p.49-57, 1987.
- CLAEYS, H.; INZÉ, D. The agony of choice: how plants balance growth and survival under water-limiting conditions. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 162, p. 1768-1779, 2013.
- CRIST, E. P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 17, n.3, p. 301-306, 1985.
- FONTANA, D. C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n.1, p. 87-91, 1996.
- FONTANA, D. C. et al. Caracterização da dinâmica temporal dos campos do Rio Grande do Sul, usando imagens NOAA. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 15, n. 1, p. 69-83, 2007.

FONTANA, et al. NDVI and meteorological data as indicators of the Pampa biome natural grasslands growth. **Bragantia**, Campinas, v. 77, n. 2, p.404-414, 2018.

HUETE, A. et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM imagens for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

IBGE. **Nota Técnica do Mapa de Biomas do Brasil**. 2004. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#MAPAS Acesso em: 15 mar. 2019.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ª ed. São José dos Campos: Ed. Parêntese, 2009. 598 p.

JUNGES, A. H. et al. Temporal profiles of vegetation indices for characterizing grazing intensity of natural grasslands in Pampa biome. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 73, n. 4, p. 332-337, 2016.

KAUTH, R.; THOMAS, G. S. The tasselled cap: a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: SYMPOSIUM ON MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 1976, West Lafayette, Indiana. **Proceedings of the...** West Lafayette, Indiana, 1976, p. 41-51.

MAPBIOMAS. **Coleção 4: Pampa: evolução anual da cobertura e uso da terra (1985-2018)**. [2019]. Disponível em: <https://storage.googleapis.com/mapbiomas/mapbiomas-br/v4/Infograficos%20pt-br/MBI-colecao4-pampa-LA-revb.jpg>. Acesso em: 20 mai. 2019.

MACHADO, I.R.; GIASSON, E. **Mapa de solos da Estação Experimental Agronômica da UFRGS**. 2016.

MARASCHIN, G. E. Preâmbulo 1. Nativão 30 anos: Gênese In: NATIVÃO 30 anos de pesquisa em campo nativo. Porto alegre, 2017. (Boletim Técnico, v.1).

MELLO, O. et al. Levantamento de uma série de solos do Centro Agronômico. **Revista da Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS**, Porto Alegre, v.8, n.1/4, p.7-155, 1966.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2. ed. São José dos Campos: UFV, 2004. 250 p.

MOREIRA, A. et al. Seasonal dynamics of vegetation indices as a criterion for grouping grassland typologies. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.76, n.1, p.24-32, 2019.

MOTT, G.O.; LUCAS, H.L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRES, 6., 1952, Pennsylvania. **Proceedings...** Pennsylvania: State College Press, 1952. p.1380-1395.

NABINGER, C. Princípios de manejo e produtividade das pastagens. In: CICLO DE PALESTRAS EM PRODUÇÃO E MANEJO DE BOVINOS DE CORTE – MANEJO E UTILIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DE PASTAGENS, Canoas, 1998. **Anais**. Canoas, 1998. p. 54-107.

NABINGER, C. et al. Campos in Southern Brazil. In: GRASSLAND ecophysiology and grazing ecology. Wellingford: CABI, 2000. p. 335-376.

NABINGER, C. et al. Biodiversidade e produtividade em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 28., 2006, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2006. p.37-86.

NASA. **MODIS** – Moderate Resolution Imaging Spectrorradiometer. [2019]. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 20 out. 2019.

NASA. **Landsat Science**. [2019]. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 20 out. 2019.

OVERBECK, G. E. et al. Fisionomia dos campos. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.). **Os campos do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p.31-41.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E; KUPLICH, T. M. Sensoriamento Remoto da Vegetação. 2. Ed. Cubatão: Oficina de Textos, 2012.

RIZZI, R. **Geotecnologias em um sistema de estimativa de produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul**. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2004.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring Vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTHRESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE - 1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings**. Washington, 1973. v.1, sec A, p. 309-317.

SOLANO, R. et al. **MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series) Version 2.00**. May, 2010. (Collection 5). Disponível em: https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_01_2012.pdf>. Acesso em: set. 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 719 p.

THE FORAGE AND GRAZING TERMINOLOGY COMMITTEE. **Terminology for Grazing Lands and Grazing Animal**. Virginia: Pocahontas Press, 1991. 38 p.

WAGNER, A. P. L. et al. Vegetation indices variability in the Pampa grasslands in Brazil and Uruguay. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 26, n. 1, p. 83-92, jul. 2018.

WILM, H.G.; COSTELLO, D.F.; KLIPPLE, G.E. Estimating forage yield by the doublesampling methods. **Journal of the American Society of Agronomy**, Geneva, n.36, n.3, p.194-203, 1944.

ZANOTTA, D. C.; FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M. **Processamento de imagens de satélite**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 319 p.

3 CAPÍTULO 1

Variação temporal de índices de vegetação em pastagem natural, submetida a diferentes ofertas de forragem, no bioma Pampa.

RESUMO – As pastagens naturais, vegetação característica do bioma Pampa se estendem desde o Uruguai, Argentina e a metade sul do Rio Grande do Sul. A progressiva expansão das áreas agrícolas e o manejo ineficiente das pastagens naturais têm levado à degradação das áreas do Pampa. Devido à importância do bioma Pampa, a pressão pela modificação do uso do solo e a degradação de suas pastagens naturais, é de grande importância que os mesmos, sejam sistematicamente monitorados para a sua preservação. Técnicas envolvendo sensoriamento remoto são uma fonte de dados para monitoramento dos campos do bioma. O objetivo deste estudo foi utilizar diferentes sensores orbitais visando gerar informações que possam ser úteis na construção de um sistema de monitoramento das pastagens naturais no bioma Pampa. Também, analisar a dinâmica de variação temporal dos índices de vegetação e verificar se os índices de vegetação calculados a partir de dados dos sensores TM e OLI, se diferenciam entre as estações do ano e níveis de oferta de forragem. A área de estudo situa-se num experimento de longa duração, em pastagem natural, manejada sob diferentes ofertas de forragem: 4, 8, 12 e 16 kg de MS/100 kg de peso vivo. Foram utilizadas imagens do sensor Terra/MODIS e dos sensores Landsat/TM e OLI. Também foram utilizados dados de temperatura média do ar, precipitação pluvial, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e evapotranspiração potencial para cálculo do balanço hídrico meteorológico. Os índices de vegetação se diferenciaram entre os tratamentos de oferta de forragem, sendo os maiores valores encontrados no tratamento 4 kg MS/100 kg de PV. Entre as estações do ano, os índices de vegetação apresentaram os menores e maiores valores no inverno e na primavera/verão, respectivamente. Os sensores MODIS, TM e OLI são capazes de gerar dados que podem ser utilizados em sistemas de monitoramento de pastagens naturais do bioma Pampa, pois são capazes de gerar informação a respeito da variação sazonal, interanual e de nível de oferta de forragem.

3.1 Introdução

Os campos do bioma Pampa estendem-se desde o Uruguai, províncias Argentinas de Corrientes, Entre Rios, Santa Fé, Córdoba, Buenos Aires e La Pampa, e a metade Sul do Rio Grande do Sul, a região é denominada de *Pastizales del Rio de la Plata*, ocupando uma área de 760.000 km² (Overbeck *et al.*, 2015). Embora pareça simples, é um bioma complexo, composto por vários tipos de formações vegetais, dentre as quais o campo dominado por gramíneas é a mais representativa (Boldrini, 2012). É um conjunto de ecossistemas antigos,

devido a isso apresenta flora e fauna próprias e grande biodiversidade, com estimativas indicando que existem mais de 3.000 espécies vegetais e em torno de 500 espécies de animais (MMA, 2019).

Suas pastagens naturais são fonte de alimento para a pecuária desde o século XVII (Nabinger *et al.*, 2000). Além da pecuária ser uma atividade econômica importante para o Rio Grande do Sul, ela proporciona a conservação deste bioma. No entanto, a progressiva introdução e expansão das áreas com monoculturas e espécies exóticas, têm levado à degradação as áreas do Pampa (Nabinger *et al.*, 2006). Há estimativas que alertam que em 2008 restavam apenas em torno de 36% da vegetação nativa do Pampa (CSR/IBAMA, 2010). Além disto, de 1985 a 2018 houve uma perda de aproximadamente 1.903.996 ha de área naturais não florestais do Bioma Pampa no Rio Grande do Sul (MAPBIOMAS, 2019)

Além da degradação de áreas naturais do bioma Pampa pela introdução de outros tipos de uso do solo, existe também a degradação de pastagens naturais pelo manejo insuficiente para a conservação de espécies vegetais, onde se pode destacar algumas práticas, como a falta de adequada subdivisão da propriedade em função das condições de solo e vegetação, o uso indiscriminado do fogo, a falta de uso da prática do diferimento de poteiros e o controle inadequado da intensidade de pastejo (Nabinger *et al.*, 2006).

Devido à importância do bioma Pampa, a pressão pela modificação e a degradação das áreas das pastagens naturais do Pampa é de grande importância que os mesmos sejam sistematicamente monitorados para a sua preservação. É necessário conceber um sistema de monitoramento qualificado, que gere dados quanto a resistência e resiliência deste ecossistema. A partir do acúmulo por um período longo de anos de informações oriundas do monitoramento contínuo, é possível obter informações originais e fundamentais à conservação das pastagens naturais do Pampa.

Neste contexto, técnicas envolvendo sensoriamento remoto, como, por exemplo, o uso de séries temporais de índices de vegetação, são uma importante fonte de dados para a viabilização de um monitoramento contínuo e sistemático das pastagens naturais do bioma. Os índices de vegetação (IV) tem sido amplamente empregados como indicadores da presença e condição da vegetação e são relacionados com parâmetros da vegetação como biomassa e índice de área foliar (Jensen, 2009). A maior parte destes índices relaciona a reflectância nas faixas de comprimento de onda do visível e infravermelho próximo na forma de razões para minimizar a variabilidade causada por elementos externos como o ângulo solar, a atmosfera e o solo (Ponzoni *et al.*, 2012).

O objetivo geral deste estudo foi usar diferentes sensores e produtos provenientes destes sensores de forma complementar, visando gerar informações que possam ser úteis na construção de um sistema de monitoramento das pastagens naturais do bioma Pampa. Como objetivos específicos tem-se: 1) analisar a dinâmica de variação temporal (anual e interanual) dos índices de vegetação NDVI, EVI do sensor MODIS, 2) verificar se os índices de vegetação NDVI, EVI e a componente *Greenness (Tasseled Cap Transformation)*, calculados a partir de dados dos sensores TM e OLI, se diferenciam entre as estações do ano e níveis de oferta de forragem, em pastagem natural no Bioma Pampa.

3.2 Material e métodos

A área onde foi realizado o estudo pertence a Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - EEA/UFRGS, localizada sob as coordenadas geográficas 30°05'27''S, 51°40'18''W e 46 m de altitude, no município de Eldorado do Sul, na Depressão Central do Rio Grande do Sul.

O clima da região é classificado como Cfa, o tipo predominante no Rio Grande do Sul, segundo a classificação climática de Köppen (Alvares *et al.*, 2014). A precipitação pluvial média anual na EEA/UFRGS é de 1.440 mm, com média mensal de 120 mm. A temperatura média do ar varia de 13,5 °C nos meses mais frios (junho e julho) a 24,6 °C nos meses mais quentes (janeiro e fevereiro). As médias diárias da radiação solar global oscilam de 206 (junho) a 509 cal.cm⁻².dia (dezembro) (Bergamaschi *et al.*, 2012). Na área experimental ocorrem três tipos de solos Planossolo Háplico Distrófico êndico, Argissolo Vermelho Distrófico típico e Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (Mello *et al.*, 1966; Machado & Giasson, 2016).

A área de estudo (Figura 5) situa-se num experimento de longa duração, composto de 64 ha de pastagem natural, que vem recebendo o mesmo nível de interferência antrópica desde 1986. O delineamento experimental é de blocos casualizados com duas repetições de área por tratamento, os quais consistem em diferentes ofertas de forragem, fixas ao longo do ano e ofertas variáveis na estação primaveril. Para este estudo foram consideradas apenas as ofertas de forragem fixas: 4, 8, 12 e 16 kg de MS/100 kg de peso vivo (% OF). O método de pastejo utilizado é o contínuo com taxa de lotação variável (Mott; Lucas, 1952), para ajuste das ofertas de forragem preconizadas. A carga animal é ajustada em intervalos de aproximadamente 28 dias, de acordo com a massa de forragem disponível para pastejo, nas unidades experimentais (UE). Os animais utilizados nas unidades experimentais são

novilhas de corte, oriundas de cruzamentos entre as raças Angus, Hereford e Nelore, com idade média inicial de 12 meses.

Nas análises deste trabalho foram utilizadas imagens provenientes de diferentes sensores orbitais. Os dados extraídos das imagens Terra/MODIS (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*) foram utilizadas visando o monitoramento contínuo da superfície, em grande escala, enquanto que as imagens Landsat/TM (*Thematic Mapper*) e OLI (*Operational Land Imager*) visaram a obtenção de dados em escala mais detalhada e com maior diferenciação das condições da biomassa na superfície.

Do sensor MODIS, foram utilizadas imagens de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e EVI (Índice de Vegetação Melhorado), de 2004 a 2017, obtidos da plataforma SATVEG, desenvolvida pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), totalizando 322 imagens. Estas imagens são composições de máximo valor dos índices de vegetação a cada 16 dias. Como o pixel do sensor MODIS, para o produto utilizado é de 250 m, foram utilizados três *pixels* que se situaram totalmente dentro da área experimental (Figura 5), sem fazer distinção entre os tratamentos, com o intuito, portanto, de caracterizar a dinâmica sazonal dos índices de vegetação da pastagem natural.

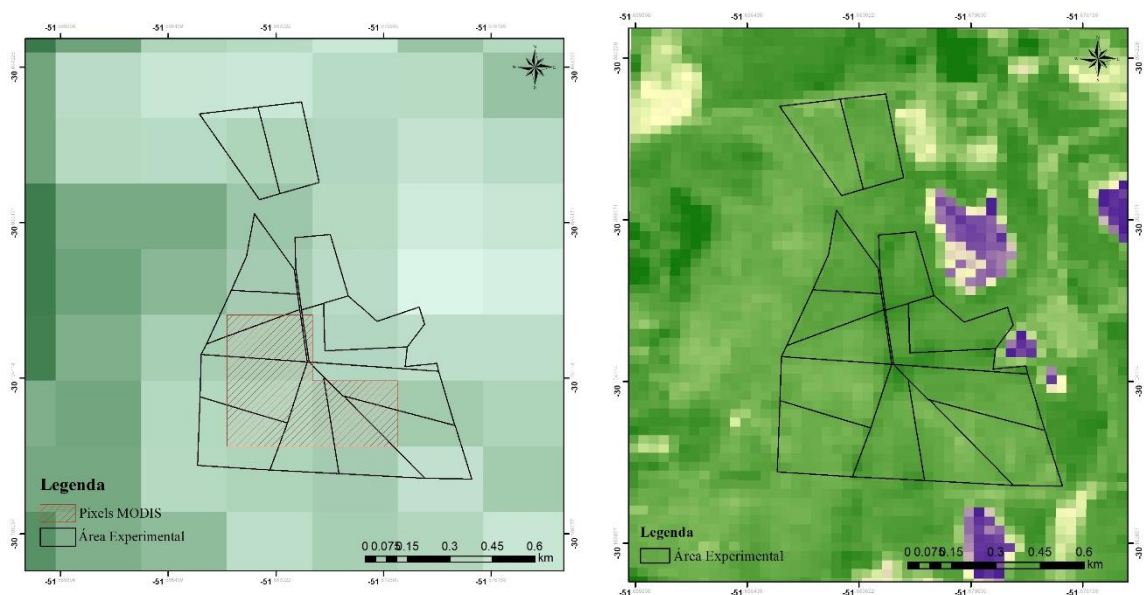


FIGURA 5. Área de estudos, evidenciando a resolução espacial dos sensores utilizados no estudo. A esquerda imagem do sensor MODIS, salientado em vermelho os *pixels* MODIS utilizados, e a direita imagem do sensor OLI. Eldorado do Sul, RS, Brasil.

Com os dados do sensor MODIS foram construídos o perfil temporal dos índices de vegetação do total de anos analisados e o perfil temporal médio do período.

Dos sensores TM e OLI, da série Landsat, foram utilizadas as imagens de reflectância no topo da atmosfera com resolução espacial de 30 m, o que tornou possível as análises entre

as unidades experimentais em função dos tratamentos de oferta de forragem. O número de pixels dentro de cada unidade experimental variou de 32 a 60. A partir destas imagens foram calculados os índices de vegetação NDVI e EVI através da fórmula do EVI 2. Também foram geradas imagens de *Greenness* (GN) da série, através de *Tasseled Cap Transformation* (Crist, 1985) (Baig *et al.*, 2014). Sendo este calculado a partir das equações 4 para dados obtidos a partir do sensor TM e 5 para dados obtidos a partir do sensor OLI. Os dados de ambos os sensores foram obtidos através da plataforma *Google Earth Engine*.

$$GN = -0,1603 * b1 - 0,2819 * b2 - 0,4934 * b3 + 0,794 * b4 - 0,0002 * b5 - 0,1446 * b7 \quad (4)$$

$$GN = -0,2941 * b2 - 0,243 * b3 - 0,5424 * b4 + 0,7276 * b5 + 0,0713 * b6 + 0,1608 * b7 \quad (5)$$

Sendo: para o sensor TM, a banda 1 o azul, a banda 2 o verde, a banda 3 o vermelho, a banda 4 o infravermelho próximo, a banda 5 o infravermelho médio, a banda 6 o infravermelho termal e a banda 7 o infravermelho médio. Para o sensor OLI a banda 1 o costeiro/aerosol, a banda 2 o azul, a banda 3 o verde, a banda 4 o vermelho, a banda 5 o infravermelho próximo, as bandas 6 e 7 são o infravermelho médio.

Além dos dados orbitais, para estes anos foram obtidos dados de temperatura média do ar, precipitação pluvial, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e evapotranspiração potencial, da estação meteorológica da EEA/UFRGS, localizada próxima à área experimental. A partir destes dados, foi calculado o balanço hídrico meteorológico sequencial mensal, pelo método de Thornthwaite & Mather (1955), para verificação dos períodos de déficit hídrico. Foi considerada a CAD de 75 mm e a evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Penman (1956).

Com os dados dos sensores TM e OLI, foi analisada a variabilidade dos índices de vegetação em função da oferta de forragem e em função das estações do ano. Para isto, foi realizada análise da variância (ANOVA) em nível de 5% de significância ($P < 0,05$), com a função “lmer” do pacote “lme4” do programa estatístico R 3.6.0 (R Core Team, 2019). No modelo estatístico, foram inseridos os efeitos fixos de tratamento, estação do ano e interação entre tratamento e estação do ano. Como efeitos aleatórios, foram inseridos unidade experimental e ano. O modelo estatístico foi simplificado pela remoção dos efeitos aleatórios não significativos ($P > 0,05$), de acordo com metodologia de Pinheiro e Bates (2000). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Por fim, para a análise da variação interanual dos índices de vegetação foi utilizado somente o NDVI dos sensores MODIS e TM. Foi feito um estudo de caso para comparação dos dados dos diferentes sensores, dos anos 2005 e 2009 a fim de analisar a variação

interanual dos índices de vegetação. Foram escolhidos estes anos em função de anomalias ocorridas na precipitação pluvial.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Monitoramento contínuo da dinâmica temporal das pastagens naturais

A série temporal dos índices de vegetação NDVI e EVI, obtidos do sensor MODIS, mostrou as variações que ocorreram ao longo do período de análise, tanto ao longo do ano como entre anos (Figura 6). Tais variações refletem as variações na biomassa e fenologia das pastagens naturais. As variações da biomassa decorrem tanto de diferenças nas condições meteorológicas como, por exemplo o regime pluviométrico, como também podem ser função de diferenças nas práticas de manejo, como por exemplo a intensidade de pastejo, empregadas na área. Já a fenologia varia em função dos ciclos das diferentes espécies que compõem a pastagem natural, principalmente espécies C4.

Verifica-se que EVI e NDVI carregam informações muito semelhantes sobre a condição da vegetação, no entanto possuem valores com magnitudes diferentes. Apesar do valor dos índices serem definidos grandemente pela proporção da radiação incidente que é refletida pelas plantas nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, o EVI apresenta melhorias, em relação ao NDVI. O EVI foi desenvolvido para otimizar o sinal da vegetação, conferindo maior sensibilidade em condições de elevada biomassa, o que foi obtido a partir da redução da influência de fundo do dossel e da atmosfera (Justice *et al.*, 1998). Assim, como as variáveis e equações utilizadas para o cálculo dos índices NDVI e EVI são distintas, os valores gerados apresentam magnitudes diferentes, mas ambos representam as condições em que a biomassa na superfície se encontra, daí a semelhança nos perfis temporais.

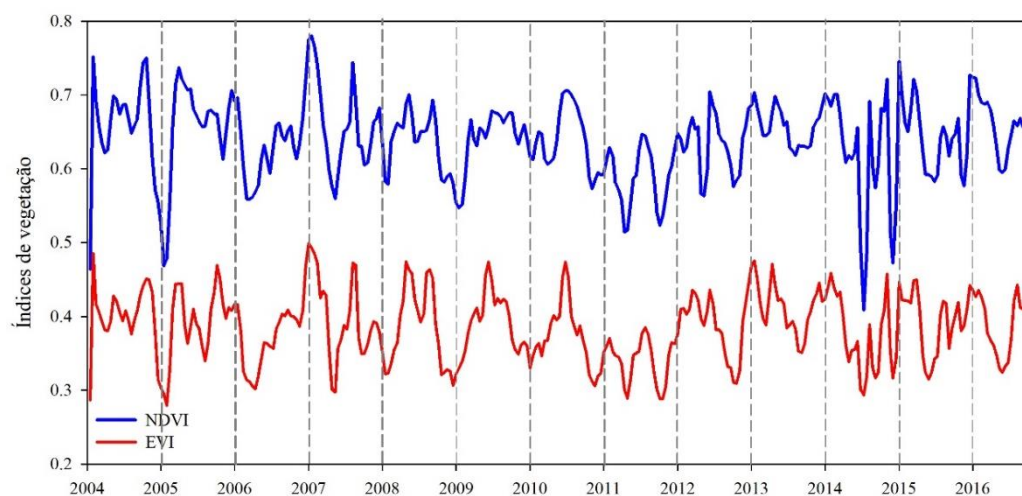


FIGURA 6. Perfis temporais dos índices de vegetação NDVI e EVI, obtidos a partir do sensor MODIS, dos anos 2004 a 2017. Eldorado do Sul, Brasil.

Quando se faz a análise do perfil médio de toda a série estudada busca-se caracterizar um padrão regional para a variação ao longo do ano da biomassa a partir dos índices de vegetação. Observa-se na Figura 7, que os índices de vegetação NDVI e EVI apresentam maiores valores nos períodos de outono e primavera e menores valores no período de inverno. Os maiores valores de NDVI (0,63) e EVI (0,40) ocorreram na primeira quinzena de abril e primeira quinzena de dezembro, respectivamente. Enquanto, os menores valores de NDVI (0,54) e EVI (0,31) ocorreram na segunda quinzena de julho (Figura 7). Padrões similares de variação temporal anual de índices de vegetação foram encontrados por Moreira *et al.* (2019), ao analisar a fenologia de diferentes tipologias campestres no Rio Grande do Sul e também por Wagner *et al.* (2018) ao analisar a variabilidade dos índices NDVI e EVI no bioma Pampa brasileiro e Uruguai.

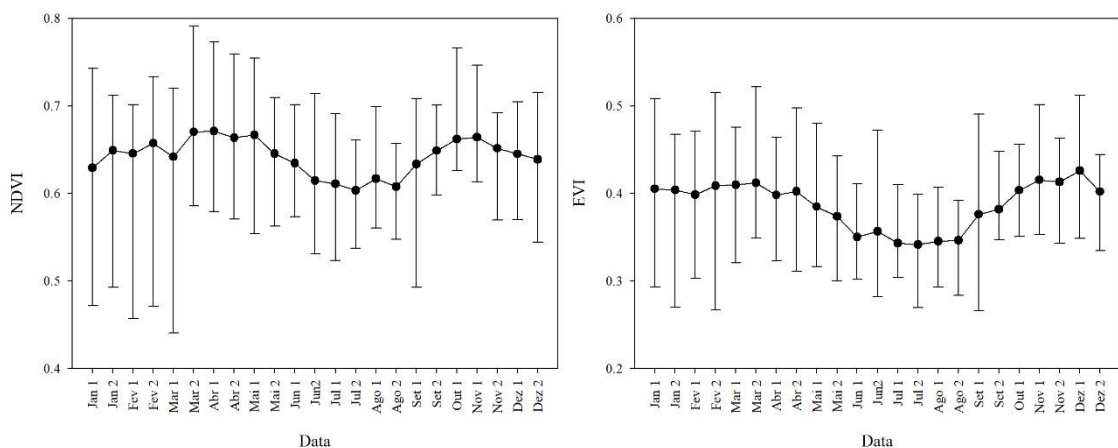


FIGURA 7. Perfis temporais médios dos índices de vegetação NDVI (a) e EVI (b), obtidos a partir do sensor MODIS. Os pontos representam as médias e as barras os valores mínimos e máximos ocorridos no período de 2004 a 2017, Eldorado do Sul, Brasil.

Os maiores valores dos índices de vegetação, observados nos períodos de outono e primavera, ocorrem em função do rebrote das espécies vegetais que compõem o dossel no período de primavera e pelo pleno desenvolvimento delas no período de outono. Quando há aumento da temperatura (primavera e verão) as gramíneas com metabolismo fotossintético C4 iniciam o período de florescimento (Boldrini *et al.*, 2015). No final do verão/início do outono grande parte das espécies vegetais presentes na área experimental entram em senescência, aumentando a quantidade de material vegetal senescente no dossel, o que acarreta diminuição nos valores dos índices de vegetação. Segundo Moojen *et al.* (2002), do início do outono ao final do inverno o material morto, em função da senescência das espécies vegetais, torna a aumentar sua participação na matéria seca disponível da forragem. Além disto, o inverno é um período crítico para a pecuária Riograndense, pois é o período em que

ocorre o menor crescimento vegetal nas pastagens naturais no bioma Pampa. O menor crescimento das plantas está associado à baixa quantidade de radiação solar global, baixas temperaturas e ocorrência de geadas (Fontana *et al.*, 2018).

Como mencionado anteriormente, ao se determinar o padrão médio da vegetação de uma região, pode-se, com um sistema de monitoramento, estabelecer o padrão esperado da vegetação. Anomalias positivas e negativas neste padrão podem estar associadas a condições favoráveis ou desfavoráveis, respectivamente, para o crescimento das plantas. Além disso, o conhecimento da ocorrência de anomalias pode ser utilizado para auxiliar o pecuarista na tomada de decisão em relação as ações de manejo, como, por exemplo, o ajuste da taxa de lotação animal.

3.3.2 Diferenciação dos níveis de oferta ao longo do ano

Ao se utilizar dados obtidos a partir do sensor MODIS, pode-se realizar análises contínuas acerca do desenvolvimento da vegetação da área experimental, dada a disponibilização de imagens na forma de composições de máximo valor dos índices de vegetação a cada 16 dias, o que minimiza a influência de problemas com nebulosidade e de geometria de aquisição das imagens (NASA, 2019). No entanto, a média resolução espacial do sensor (250 m) não permite a distinção dos tratamentos de oferta de forragem, pois a área do pixel MODIS excede a área das unidades experimentais. Já ao se utilizar dados dos sensores TM e OLI, pode-se realizar análises levando em consideração os tratamentos de oferta de forragem, pois o tamanho do pixel (30 m) é inferior a área das unidades experimentais.

Em termos gerais, verifica-se que o tratamento 4% OF apresentou os maiores valores para os três índices de vegetação (NDVI, EVI e GN) e, conforme aumentou a oferta de forragem, diminuíram os valores dos índices de vegetação (Figura 8 e Tabela 2).

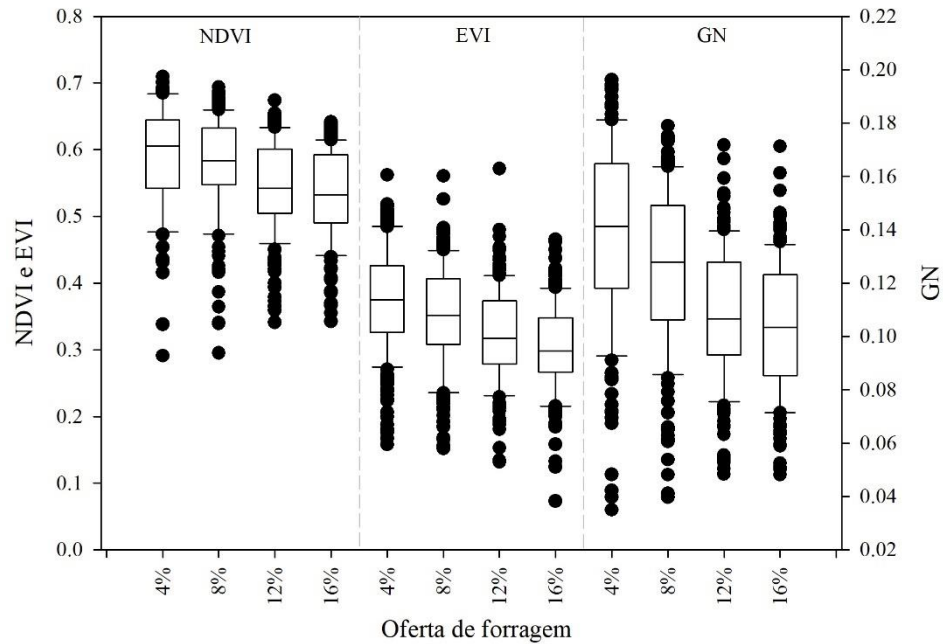


FIGURA 8. Variabilidade dos índices de vegetação NDVI, EVI e componente *Greenness* (GN), em função da oferta de forragem. Dados obtidos a partir dos sensores TM e OLI no período de 2004 a 2017. Eldorado do Sul, Brasil.

As diferenças observadas nos índices espectrais foram devido às diferenças da estrutura da vegetação, causadas pela imposição dos tratamentos de oferta de forragem (Melizara *et al.*, 2012). No tratamento com 4% OF, o dossel apresenta pequena quantidade de vegetação senescente e, conforme aumenta a oferta de forragem, há incremento de material senescente na forragem (Moojen, 2002). Nas unidades experimentais com tratamento de 4% OF, pela baixa oferta de forragem, os animais não têm oportunidade de selecionar sua dieta, não existindo espécies não pastejadas nestas unidades experimentais. Conforme aumenta a oferta de forragem, os animais têm a oportunidade de selecionar a sua dieta, formando uma estrutura com duplo estrato na pastagem (as espécies rejeitadas tornam-se touceiras). Devido a isto, a vegetação sob baixa oferta de forragem (4% OF) apresenta-se, de forma geral, com maior verdor em relação aos demais tratamentos. Como os índices de vegetação são estimadores de biomassa verde (Ponzoni *et al.*, 2012), no tratamento 4% OF os valores dos índices de vegetação são superiores. Em contraponto, o tratamento 16% OF, foi o que apresentou os menores valores dos índices de vegetação, em função da maior quantidade de material vegetal senescente (Pinto *et al.*, 2017). Este resultado discorda dos resultados encontrados por Junges *et al.* (2016), ao analisar índices de vegetação obtidos a partir do sensor MODIS, sob diferentes intensidades de pastejo, na mesma área de estudos, encontrou os maiores índices de vegetação em intensidades de pastejo moderadas. A

discordância destes resultados pode ser devido às diferenças de resolução espacial dos dois sensores, MODIS e TM/OLI, com maior mistura de respostas no pixel MODIS.

A interação entre os fatores oferta de forragem e estação do ano foi significativa para os índices de vegetação avaliados ($P < 0,05$), indicando que a resposta de um fator é dependente do outro fator (Perecin & Filho, 2008).

Quando se comparou as estações do ano (Figura 9 e Tabela 2), nos tratamentos 8, 12 e 16% OF, os índices de vegetação apresentaram os menores valores no inverno. Enquanto que, no tratamento 4% as estações verão, outono e inverno tiveram os menores valores e não se diferenciaram. O padrão observado nas imagens TM e OLI foi, portanto, semelhante ao encontrado ao analisar os dados do sensor MODIS.

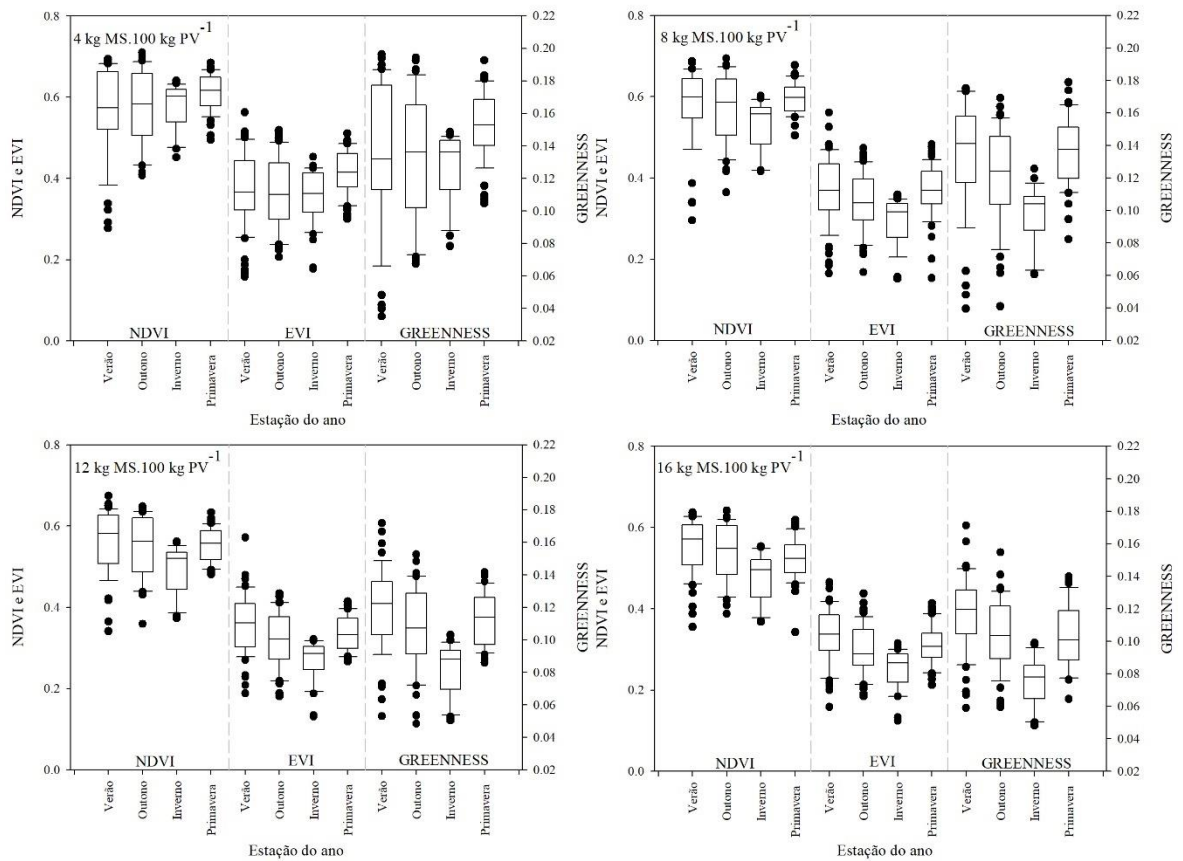


FIGURA 9. Variabilidade dos índices de vegetação NDVI, EVI e da componente *Greenness* (GN) em função do tratamento de oferta de forragem (4, 8, 12 e 16 KgMS 100kg PV⁻¹) e da estação do ano. Dados obtidos a partir dos sensores TM e OLI no período de 2004 a 2016. Eldorado do Sul, Brasil.

TABELA 1. Valores médios e desvio padrão residual (DP) dos índices de vegetação EVI, NDVI e da componente *Greenness* (GN), nas ofertas de forragem e estações do ano no período de 2004 a 2016. Eldorado do Sul, Brasil.

EVI					
Estação do Ano	Oferta de Forragem (% PV)				Média ± DP
	4	8	12	16	
Verão	0,37 Ba	0,38 Aa	0,35 Aab	0,34 Ab	0,36 ± 0,08
Outono	0,37 Ba	0,34 Bab	0,32 Abc	0,31 Bc	0,33 ± 0,08
Inverno	0,35 Ba	0,29 Cb	0,27 Bbc	0,25 Cc	0,29 ± 0,07
Primavera	0,41 Aa	0,38 Aa	0,33 Ab	0,30 Bb	0,36 ± 0,06
Média ± DP	0,38 ± 0,08	0,35 ± 0,07	0,32 ± 0,06	0,31 ± 0,06	
NDVI					
Estação do Ano	Oferta de Forragem (% PV)				Média ± DP
	4	8	12	16	
Verão	0,56 Ba	0,58 Aa	0,56 Aa	0,55 Aa	0,56 ± 0,09
Outono	0,58 ABa	0,57 ABa	0,54 Aa	0,54 Aa	0,56 ± 0,08
Inverno	0,58 ABa	0,53 Bab	0,49 Bb	0,48 Bb	0,52 ± 0,07
Primavera	0,61 Aa	0,60 Aab	0,55 Abc	0,53 Ac	0,57 ± 0,06
Média ± DP	0,58 ± 0,08	0,58 ± 0,08	0,54 ± 0,07	0,53 ± 0,07	
GREENNESS					
Estação do Ano	Oferta de Forragem (% PV)				Média ± DP
	4	8	12	16	
Verão	0,13 Ba	0,13 ABa	0,12 Aa	0,12 Aa	0,13 ± 0,03
Outono	0,13 Ba	0,12 Bab	0,11 Ab	0,10 Ab	0,12 ± 0,03
Inverno	0,13 Ba	0,10 Cb	0,08 Bb	0,08 Bb	0,10 ± 0,03
Primavera	0,15 Aa	0,14 Aa	0,11 Ab	0,10 Ab	0,13 ± 0,03
Média ± DP	0,14 ± 0,03	0,13 ± 0,03	0,11 ± 0,03	0,10 ± 0,02	

Obs: Letras distintas, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, diferem pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Também no verão, apenas o EVI se diferenciou entre os tratamentos de oferta de forragem sendo maior nos tratamentos 4% e 8% de oferta de forragem (Tabela 2), consequência da maior variabilidade dos valores dos índices de vegetação para todos os tratamentos de oferta de forragem (Figura 9). O verão é o período onde a probabilidade de ocorrer déficit hídrico no Rio Grande do Sul é maior, devido à alta demanda evaporativa da atmosfera (Fontana *et al.*, 2018). A nível celular, quando as plantas passam por estresse hídrico, diminui a turgidez das células, causando redução nas taxas de alongamento celular, o que diminui o crescimento vegetal (Claeys & Inze, 2013). Com a diminuição do crescimento vegetal, há diminuição da área foliar. Com menor área foliar, a planta intercepta menor quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Por sua vez, o acúmulo de biomassa se dá em função da RFA interceptada pela área foliar, através dos processos fisiológicos que ocorrem no aparato fotossintético. Além disto, com os estômatos fechados, pela diminuição da turgidez celular, as trocas gasosas diminuem e, também, com a menor

absorção de água do solo diminui a absorção de nitrogênio, diminuindo o conteúdo de clorofila das plantas (Bergamaschi, 2017).

3.3.3 Comparação de dados dos diferentes sensores

Observa-se que, em 2009, o perfil temporal de NDVI foi semelhante ao perfil médio na maior parte do ano, exceto nos meses de janeiro, fevereiro, setembro, segunda quinzena de novembro e dezembro quando os valores de NDVI de 2009 foram superiores aos valores médios (Figura 10). O ano de 2005 apresentou anomalias no perfil temporal de NDVI, podendo ser caracterizado como um ano atípico. Janeiro e fevereiro apresentaram valores de NDVI mais baixos que o perfil médio, enquanto o restante do ano apresentou valores de NDVI mais altos que a média (Figura 10).

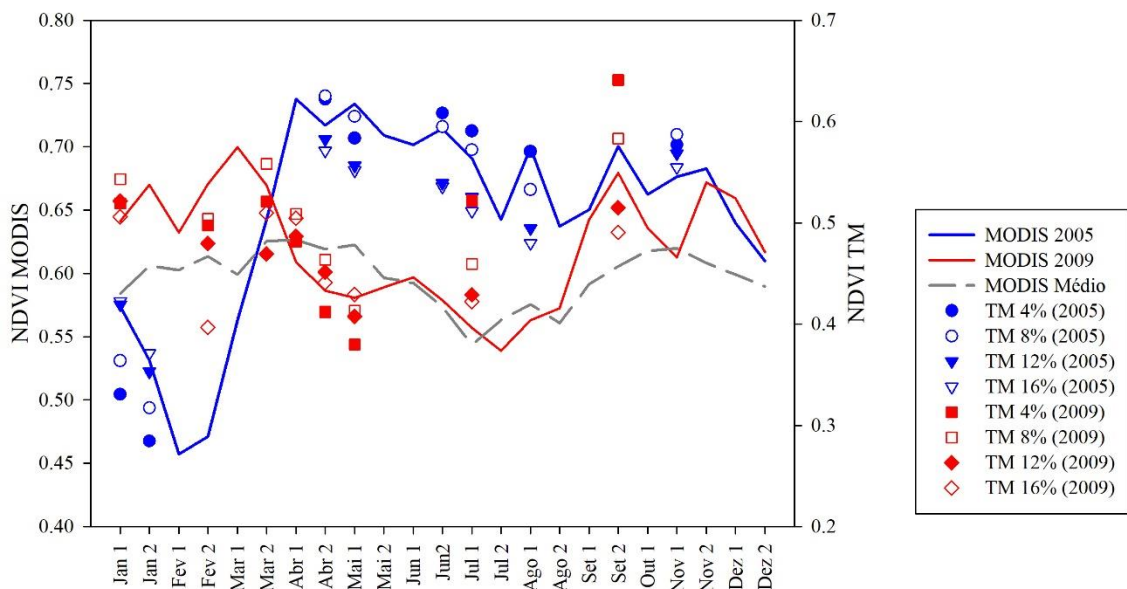


FIGURA 10. Comparação dos dados de NDVI provenientes dos sensores MODIS e TM, nos anos de 2005 e 2009. Eldorado do Sul, Brasil.

Em uma área de pastagem natural, em que os tratamentos de oferta de forragem são mantidos inalterados ao longo do ano, a variação dos valores de NDVI entre anos pode ser explicada pelas variações meteorológicas ocorridas e auxiliar no entendimento do porquê das anomalias observadas na Figura 10. Nos meses de janeiro e fevereiro de 2005, ocorreu déficit hídrico (Figura 11C), as condições hídricas desfavoráveis possivelmente causaram estresse às espécies vegetais, resultando em menores valores de NDVI. Em resposta ao déficit hídrico, há decréscimo na produção de área foliar (Taiz & Zeiger, 2013). Nestes mesmos meses, em 2009, o déficit hídrico foi menor (Figura 11D), resultando em valores

mais altos de NDVI. Nos meses de maio, junho e julho, a temperatura média do ar foi superior em 2005 (Figura 11A). As temperaturas amenas nos meses de outono e inverno podem ter ocasionado desenvolvimento das espécies vegetais que normalmente não se desenvolvem neste período, em função das baixas temperaturas resultando em maiores valores de NDVI. Em consequência, em 2005 o perfil temporal de NDVI não apresentou queda característica a partir de maio, como ocorreu na média da série temporal. Em 2009 a queda antecipada dos valores de NDVI, a partir de março, pode ter ocorrido em função do déficit hídrico ocorrido nos meses de março, abril e maio (Figura 11D).

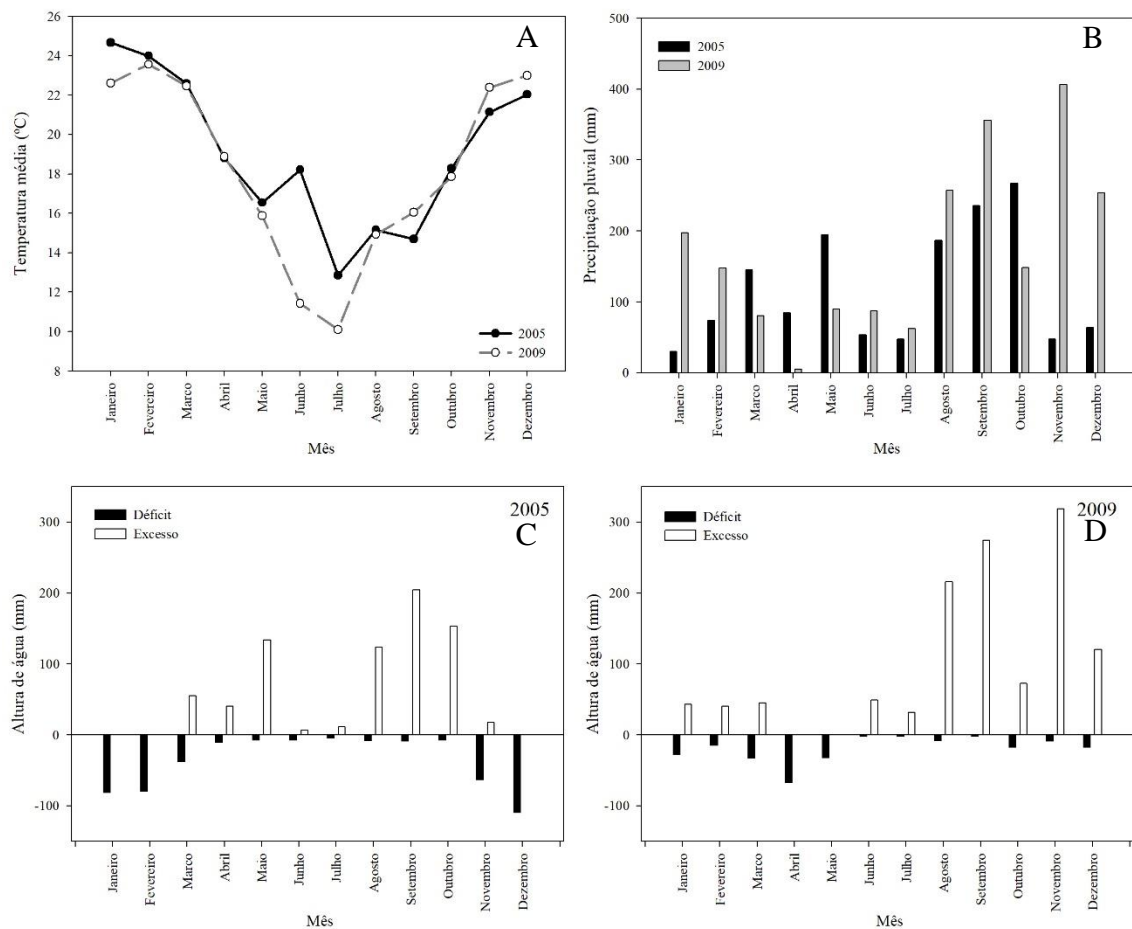


FIGURA 11. Variação da temperatura média do ar (A), acumulado de precipitação pluviál (B) e ocorrência de déficit e excesso hídrico em 2005 (C) e déficit e excesso hídrico em 2009 (D). Eldorado do Sul, Brasil, 2019.

Ressalta-se que a análise apresentada deve ser considerada com cuidado, visto que devido à grande complexidade inerente as pastagens naturais, possivelmente as anomalias observadas não sejam decorrentes de um único fator, de forma isolada.

Estes resultados ajudam a evidenciar que, num sistema de monitoramento, a identificação do estresse pode ser feito usando imagens orbitais. Mas estes dados devem ser usados de forma integrada com dados meteorológicos, de forma a permitir o entendimento de

qual fator de estresse causou o sintoma de anomalia no crescimento e/ou desenvolvimento da planta, inferido a partir dos índices de vegetação.

Pode-se observar ainda que o NDVI proveniente dos sensores MODIS e TM apresentou um padrão de variação temporal semelhante, nos dois anos avaliados. Na maior parte dos casos, quando o NDVI/MODIS esteve acima da média, também o NDVI Landsat esteve. O contrário também foi observado.

Dada a coerência dos dados de NDVI provenientes dos diferentes sensores, no contexto da concepção de um sistema de monitoramento, poderia-se propor o uso das imagens MODIS para identificação de áreas anômalas quanto ao crescimento em grandes regiões de pastagens naturais, dada a abrangência espacial, sistemática e contínua aquisição de dados. Identificada a anomalia, poderia-se utilizar imagens com maior resolução espacial (Landsat) para detalhamento da comunidade vegetal, submetida a diferentes tipos de manejo empregados pelo pecuarista, frente a um dado fator de estresse.

3.4 Conclusões

Os sensores MODIS, TM e OLI são capazes de gerar dados que podem ser utilizados de forma complementar em sistemas de monitoramento de pastagens naturais do bioma Pampa, gerando informação a respeito da variação sazonal, interanual e de nível de oferta de forragem.

Em tempos sazonais, os índices obtidos dos sensores MODIS, TM e OLI mostram coerência, com os maiores e menores índices ocorrendo na primavera/verão e inverno, respectivamente.

A variação sazonal está em parte relacionada à variabilidade das condições meteorológicas. Apesar de ambos sensores mostrarem respostas similares, o sensor MODIS permite um maior detalhamento no tempo, enquanto o sensor TM permite maior detalhamento espacial das pastagens.

Com os sensores TM e OLI é possível diferenciar níveis de oferta de forragem. O menor nível de oferta de forragem (4%), associado aos maiores índices, pode ser diferenciado tanto com os índices de vegetação como com a componente *Greenness*.

3.5 Referências bibliográficas

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

BAIG, M. H. A. et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. **Remote Sensing Letters**, Abingdon, v. 5, n. 5, p. 423–431, 2014.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da estação experimental da UFRGS** (e região de abrangência). Porto Alegre: UFRGS, 2012. 77 p.

BERGAMASCHI, H. Água. In. BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. (Org.) **As Plantas e o Clima**. Guaíba: AgroLivros, 2017. p. 257-312.

BOLDRINI, I.I. **Dinâmica da vegetação de uma pastagem natural sob diferentes níveis de oferta de forragem e tipos de solo, Depressão Central, RS**. 1993. 262f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Curso de Pós-Graduação em Zootecnia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

BOLDRINI, I. I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V.D.P. et al. (ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, MMA, 2012. p. 63-77.

BOLDRINI, I. I.; OVERBECK, G.; TREVISAN, R. Biodiversidade de Plantas In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.). **Os campos do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 51-59.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Pampa**. [2019]. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/biomas/pampa.html>>. Acesso em: 01 ago. 2019.

CLAEYS, H.; INZÉ, D. The agony of choice: how plants balance growth and survival under water-limiting conditions. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 162, p. 1768-1779, 2013.

CRIST, E. P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 17, n.3, p. 301-306, 1985.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS RENOVÁVEIS. **Monitoramento do desmatamento nos biomas brasileiros por satélite: monitoramento do bioma Pampa**. Brasília, 2010. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/sbf_chm_rbbio/_arquivos/relatorio_tecnico_monitoramento_de_smate_bioma_pampa_72.pdf. Acesso em: 14 jun. 2019.

FONTANA, et al. NDVI and meteorological data as indicators of the Pampa biome natural grasslands growth. **Bragantia**, Campinas, v. 77, n. 2, p.404-414, 2018.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2^a ed. São José dos Campos: Ed. Parêntese, 2009. 598 p.

JUNGES, A. H. et al. Temporal profiles of vegetation índices for characterizing grazing intensity of natural grasslands in Pampa biome. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 73, n. 4, p. 332-337, 2016.

JUSTICE, C.O. et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v.36, n.4, p.1228-1249, 1998.

MACHADO, I.R.; GIASSON, E. **Mapa de solos da Estação Experimental Agrônômica da UFRGS**. 2016.

MELLO, O. et al. Levantamento de uma série de solos do Centro Agrônômico. **Revista da Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS**, Porto Alegre, v.8, n.1/4, p.7-155, 1966.

MELIZZARA, J. C. et al. The ingestive behavior of cattle in large-scale and its application to pasture management in heterogeneous pastoral environment. **Journal of Agricultural Science and Technology**, Tehran, v.2, n.7A, 909-916, 2012.

- MOOJEN, E. L.; MARASCHIN, G. E. Potencial produtivo de uma pastagem nativa do Rio Grande do Sul submetida a níveis de oferta de forragem. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 127-132, 2002.
- MOREIRA, A. et al. Seasonal dynamics of vegetation indices as a criterion for grouping grassland typologies. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.76, n.1, p.24-32, 2019.
- MOTT, G.O.; LUCAS, H.L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In.: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRES, 6., 1952, Pennsylvania. **Proceedings...** Pennsylvania: State College Press, 1952. p.1380-1395.
- NABINGER, C. et al. Campos in Southern Brazil. In: GRASSLAND ecophysiology and grazing ecology. Wellingford: CABI, 2000. p. 335-376.
- NABINGER, C. et al. Biodiversidade e produtividade em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 28., 2006, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2006. p.37-86.
- NASA. **MODIS** – Moderate Resolution Imaging Spectrorradiometer. [2019]. Disponível em: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 20 out. 2019.
- OVERBECK, G. E; PODGAISKI, L. R.; MÜLLER, S. C. Biodiversidade dos campos. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.) **Os campos do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 43-50.
- OVERBECK, G. E. et al. Fisionomia dos campos. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.). **Os campos do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p.31-41.
- PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. **Netherland Journal of Agriculture Science**, Wageningen, v. 4, p. 9-29, 1956.
- PERECIN, D. FILHO, A. C. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p.68-72, Jan-Fev, 2008.
- PINHEIRO J. C.; BATES, D. M. **Mixed-Effects Models in S and S-PLUS**. New York: Springer, 2000.
- PINTO, C. E.; WALLAU, M.; BOLDRINI, I. I. Estrutura da vegetação e composição florística In: NATIVÃO 30 anos de pesquisa em campo nativo. Porto alegre, 2017. p. 16-20. (Boletim Técnico, v. 1).
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. Ed. Cubatão: Oficina de Textos, 2012.
- PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 4 da série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/stats>. Acesso em: 01 nov. 2019.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**: publication of Climatology. Centerton: Drexel Institute of Technology 1955.v. 8, p. 104.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 719 p.
- WAGNER, A. P. L. et al. Vegetation indices variability in the Pampa grasslands in Brazil and Uruguay. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 26, n. 1, p. 83-92, jul. 2018.

4 CAPÍTULO 2

Os sensores da série Landsat permitem identificar variação na estrutura do pasto sob diferentes ofertas de forragem?

RESUMO – Os campos naturais do bioma Pampa são fonte de alimento para os rebanhos da região desde o século XVII. Além da pecuária ser uma atividade econômica importante no sul do Brasil, ela contribui para a conservação deste bioma. Verifica-se que são poucos os instrumentos disponíveis para obter informações sobre o manejo empregado em pastagens naturais. Neste contexto, o sensoriamento remoto pode contribuir. Desta forma o objetivo deste estudo é caracterizar a variabilidade dos índices espectrais em função das variáveis de estrutura do pasto, associadas a diferentes ofertas de forragem e estações do ano; correlacionar as variáveis de estrutura do pasto com os índices de vegetação e dimensionar a importância relativa dos índices espectrais na definição das variáveis de estrutura do pasto. A área de estudo situa-se num experimento de pastagem natural, que vem sendo manejada desde 1986 sob diferentes ofertas de forragem: 4, 8, 12 e 16 kg de matéria seca (MS).100 kg de peso vivo⁻¹ (% PV). Nesse estudo, foram utilizados dados de massa de forragem (kg MS.ha⁻¹), altura do dossel (cm) e percentual de touceiras para caracterizar a estrutura do pasto. A partir de imagens provenientes dos sensores TM e OLI, foram calculados os índices de vegetação NDVI e EVI e, também, geradas imagens de *Greenness* (GN). As variáveis altura do pasto, massa de forragem e percentual de touceiras foram inferiores no tratamento de 4 kg de MS/100 kg de PV. A massa de forragem não apresentou variação anual na oferta de forragem 4 e 8 kg de MS/100 kg de PV. Na maior oferta (16% PV), a massa de forragem foi maior no verão e outono. Já o percentual de touceiras não variou ao longo do ano. Os índices espectrais apresentaram valores superiores na menor oferta de forragem (4% PV). As correlações entre as variáveis de estrutura do pasto e os índices espectrais foram negativas, ou seja, observou-se que maiores valores de índices de vegetação estão relacionados à menor massa de forragem. O índice espectral com maior importância relativa para estimativas das variáveis de estrutura do pasto é o GN.

4.1 Introdução

O bioma Pampa é um bioma complexo, composto por vários tipos de formações vegetais, dentre as quais o campo dominado por gramíneas é a mais representativa (Boldrini, 2012). Seus campos naturais são fonte de alimento para a pecuária desde o século XVII, quando foram trazidos ao estado do Rio Grande do Sul, na região Sul do Brasil, 1.500 cabeças de gado (Nabinger *et al.*, 2000). Além da pecuária ser uma atividade econômica

importante para a região, ela contribui para a conservação deste bioma, pela utilização de suas pastagens naturais como recurso forrageiro (MMA, 2019).

O pastejo dos animais sobre as pastagens do bioma Pampa pode ser considerado indispensável para a manutenção dos campos e sua biodiversidade, e seu manejo possui um papel importante em determinar a fisionomia vegetal (Overbeck *et al.*, 2015). A ação do pastejo sobre o campo é considerada um agente de distúrbio tão influente como as condições edafoclimáticas. De acordo com a intensidade de pastejo exercida, é determinado o hábito das espécies ocorrentes na área (Boldrini, 1993). Quando a lotação animal é alta, a vegetação é composta apenas pelo estrato rasteiro e baixo ou estrato inferior, sendo dominada pelas gramíneas rizomatosas ou estoloníferas. Quando a lotação animal é baixa, a vegetação ganha heterogeneidade e há o desenvolvimento de dois estratos, um rasteiro e um mais alto, dominado pelas gramíneas cespitosas, que formam touceiras, e por arbustos (Overbeck *et al.*, 2015).

A conservação da biodiversidade das espécies vegetais é, portanto, influenciada pelo pastejo. Castilhos *et al.* (2012) avaliaram a composição florística em diferentes ofertas de forragem aos animais, no caso 4, 8, 12 e 16 kg de matéria seca de forragem por 100 kg de peso vivo animal por dia. As áreas com maior oferta de forragem (16 kg MS.100 kg PV⁻¹) foram as que tiveram maior redução do número de espécies vegetais. Já na oferta de 12 kg MS.100 kg PV⁻¹, não houve redução do número de espécies vegetais.

Além da conservação da biodiversidade das pastagens naturais, o manejo é importante para a rentabilidade da produção pecuária. O entendimento das relações entre a produção vegetal e animal é fundamental para a definição das ações de manejo a serem empregadas pelo pecuarista, favorecendo a produção animal. Uma peça chave para o sucesso da produção animal a pasto é o ajuste de oferta de forragem, uma ferramenta sem custo com poder de triplicar a produção animal (Rosa *et al.*, 2017).

Apesar da importância deste bioma, verifica-se que são poucos os instrumentos disponíveis para obter informações sobre o manejo empregado em pastagens naturais, principalmente em grandes áreas, e que permitam o detalhamento da variabilidade da vegetação dentro de uma propriedade. Neste contexto, o sensoriamento remoto pode contribuir para obtenção de informações que possam ser utilizadas para auxiliar no manejo das pastagens naturais. Atualmente, existe uma grande variedade de sensores disponíveis para a geração de informação, como o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), OLI (*Operational Land Imager*), TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), a constelação SENTINEL, entre outros.

Uma possibilidade é a utilização de dados destes sensores, na forma de índices espectrais, que, historicamente, têm sido utilizado para diversos tipos de estudos como, por exemplo, o monitoramento de florestas (Bullock *et al.*, 2018), mapeamento do manejo de pastagens (Jakimow *et al.*, 2018) e análise de áreas afetadas pelo fogo (Alves *et al.*, 2018). Fica a dúvida, entretanto, se imagens com a resolução espectral, espacial, radiométrica e temporal disponibilizadas pelos sensores da série Landsat são capazes de caracterizar este bioma tão complexo, o Pampa, com alta variabilidade anual associada à dinâmica da vegetação e ainda afetada pelo pastejo e, mesmo assim, gerar informações úteis para fins de manejo.

Os índices espectrais ou índices de vegetação são muito utilizados em estudos de dinâmica temporal. Estes índices relacionam a reflectância nas faixas de comprimento de onda do visível e infravermelho próximo na forma de razões para minimizar a variabilidade causada por elementos externos como o ângulo solar, interferência atmosférica e do solo (Ponzoni *et al.*, 2012).

Em grande escala, trabalhos como Moreira *et al.* (2019) e Wagner *et al.* (2018), utilizaram índices de vegetação em áreas com vegetação campestre no bioma Pampa, utilizando o sensor MODIS. A utilização deste sensor tem vantagem pelo acompanhamento temporal, mas a sua resolução espacial limita a sua utilização em estudos em pequenas áreas. Uma opção para menores áreas são as imagens da série Landsat, que possui resolução espacial de 30 m. No entanto, a resolução temporal de 15 dias, aliada a possibilidade de ocorrência de nuvens na data de passagem do satélite, resulta em uma série temporal esparsa. Mesmo assim, devido ao grande banco de imagens históricas e a relativa facilidade de acesso às imagens Landsat, é relevante estudar o potencial destas imagens para inferir sobre a dinâmica da estrutura dos pastos naturais no bioma Pampa.

Desta forma, o objetivo deste estudo é caracterizar a variabilidade dos índices espectrais em função das variáveis de estrutura do pasto, associadas a diferentes ofertas de forragem e estações do ano; correlacionar as variáveis de estrutura do pasto com os índices de vegetação e dimensionar a importância relativa dos índices espectrais na definição das variáveis de estrutura do pasto.

4.2 Material e métodos

A área onde foi realizado o estudo pertence a Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - EEA/UFRGS, localizada sob as coordenadas

geográficas 30°05'27''S, 51°40'18''W e 46 m de altitude, no município de Eldorado do Sul, na Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

O clima da região é classificado como Cfa, segundo a classificação climática de Köppen (Alvares *et al.*, 2014). A precipitação pluvial média anual na EEA/UFRGS é de 1.440 mm, com média mensal de 120 mm. A temperatura média do ar varia de 13,5 °C nos meses mais frios (junho e julho) a 24,6 °C nos meses mais quentes (janeiro e fevereiro). As médias diárias da radiação solar global oscilam de 206 (junho) a 509 cal.cm⁻².dia (dezembro) (Bergamaschi *et al.*, 2012). Na área experimental ocorrem três tipos de solos: Planossolo Háplico Distrófico êndico, Argissolo Vermelho Distrófico típico e Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (Mello *et al.*, 1966; Machado & Giasson, 2016).

A área de estudo situa-se num experimento de longa duração, composto de 64 ha de pastagem natural, que vem recebendo o mesmo nível de interferência antrópica desde 1986 (Figura 12). O delineamento experimental é de blocos casualizados com duas repetições de área por tratamento, os quais consistem em diferentes ofertas de forragem, fixas ao longo do ano e ofertas variáveis na estação primaveril. Para este estudo foram consideradas apenas as ofertas de forragem fixas: 4, 8, 12 e 16 kg de matéria seca.100 kg de peso vivo⁻¹. O método de pastejo utilizado é o contínuo com taxa de lotação variável (Mott & Lucas, 1952), para ajuste das ofertas de forragem preconizadas. A taxa de lotação animal é ajustada em intervalos de aproximadamente 28 dias, de acordo com a massa de forragem disponível para pastejo, nas unidades experimentais (UE). Os animais utilizados nas unidades experimentais são novilhas de corte, oriundas de cruzamentos entre as raças Angus, Hereford e Nelore, com idade média inicial de 12 meses e 244,8 ± 39,0 kg PV.

A condução do protocolo experimental por mais de trinta anos, de forma ininterrupta, moldou fisionomias distintas de estrutura da vegetação e composição florística em função dos tratamentos de oferta de forragem. A desfolha, principalmente em níveis moderados de oferta de forragem, aumentou a heterogeneidade da vegetação, formando um mosaico com distintas proporções de estrato superior e inferior. No estrato superior, predominam as espécies formadoras de touceiras, que não são preferidas pelos animais, mas têm importante função ecossistêmica. Já o estrato inferior é composto por gramíneas e leguminosas de maior qualidade nutricional e que compõem a maior parte da dieta dos animais (Pinto *et al.*, 2017)

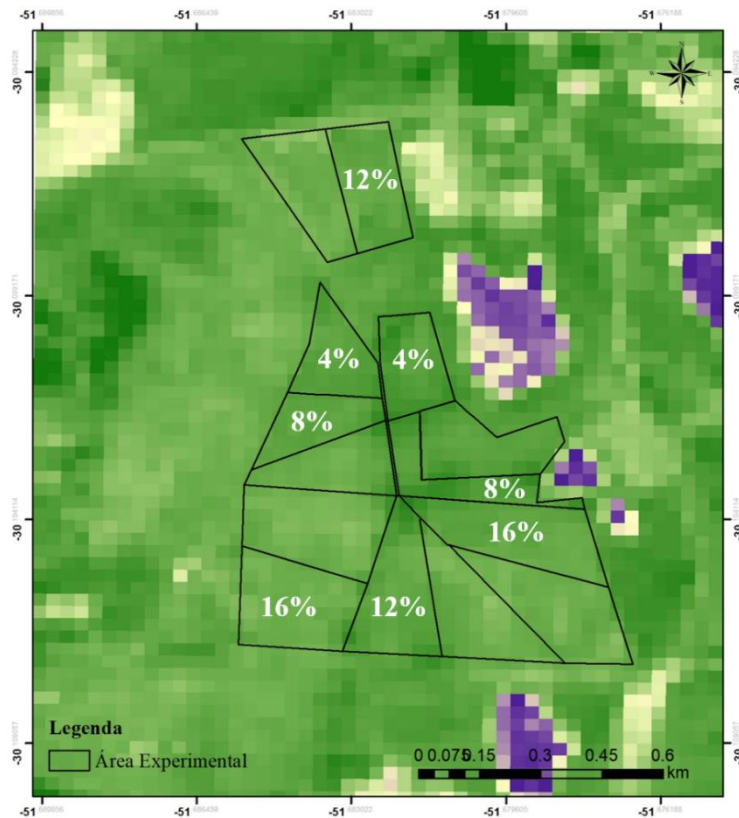


FIGURA 12. Área experimental, evidenciando a resolução espacial dos sensores TM e OLI da série Landsat, utilizados no estudo e as ofertas de forragem 4%, 8%, 12% e 16%. Eldorado do Sul, Brasil.

Para os dados de estrutura do pasto, foram utilizados dados de 2004 a 2017. Considerou-se a massa de forragem, a altura do dossel e o percentual de touceiras, sendo realizadas avaliações a cada 28 dias. A metodologia utilizada para avaliação de massa de forragem ($\text{kg MS}\cdot\text{ha}^{-1}$) foi realizada apenas no estrato inferior da vegetação e é chamada de dupla amostragem (Wilm *et al.*, 1944), pois utiliza uma calibração de estimativas visuais e amostras cortadas. Quatro amostras de forragem, por UE, foram cortadas em nível do solo, dentro de uma área delimitada por um quadrado de metal com área de $0,25 \text{ m}^2$. As amostras foram, então, colocadas em sacos de papel, posteriormente, foram secas em estufa de ar forçado a 65°C por 72 horas e pesadas em balança de precisão, para obtenção do valor em kg de matéria seca (MS). A massa de forragem estimada visualmente (50 pontos por EU) foi corrigida, utilizando regressões lineares entre a massa de forragem estimada visualmente e a massa de forragem cortada nos quadrados. A altura do dossel (cm) foi avaliada em 50 pontos aleatórios em cada UE, utilizando-se um bastão graduado denominado *sward stick* (Barthram, 1985). O percentual de touceiras foi estimado através do caminhamento realizado em cada UE, onde a proporção de touceiras presente nas UEs foi obtida pela proporção de quadros que caíram em touceiras.

Os índices espectrais utilizados neste estudo foram provenientes de imagens Landsat, dos sensores TM (*Thematic Mapper*) e OLI (*Operational Land Imager*), obtidos da plataforma *Google Earth Engine*. Foram utilizadas imagens de reflectância no topo da atmosfera com resolução espacial de 30 m, dos anos de 2004 a 2017, sempre que as imagens não apresentavam nuvens sobre a área de estudos, o que totalizou 48 imagens. O número de pixels dentro de cada unidade experimental variou de 32 a 60, dado o tamanho variável das unidades experimentais (entre 3,0 e 5,2 ha).

A partir destas imagens, foram calculados os índices de vegetação NDVI e EVI. Também foram geradas imagens de *Greenness* (GN) da série, através de *Tasseled Cap Transformation* (Crist, 1985) (Baig *et al.*, 2014). Sendo este calculado a partir das equações 4 para dados obtidos a partir do sensor TM e 5 para dados obtidos a partir do sensor OLI. Os dados de ambos os sensores foram obtidos através da plataforma *Google Earth Engine*. Foram extraídos os valores médios e o desvio padrão dos índices de vegetação, para cada unidade experimental, em todas as imagens. As datas dos dados espectrais foram compatibilizadas com as datas dos dados coletados a campo, pareando a imagem de data mais próxima à avaliação.

$$GN = -0,1603 * b1 - 0,2819 * b2 - 0,4934 * b3 + 0,794 * b4 - 0,0002 * b5 - 0,1446 * b7 \quad (4)$$

$$GN = -0,2941 * b2 - 0,243 * b3 - 0,5424 * b4 + 0,7276 * b5 + 0,0713 * b6 + 0,1608 * b7 \quad (5)$$

Sendo: para o sensor TM, a banda 1 o azul, a banda 2 o verde, a banda 3 o vermelho, a banda 4 o infravermelho próximo, a banda 5 o infravermelho médio, a banda 6 o infravermelho termal e a banda 7 o infravermelho médio. Para o sensor OLI a banda 1 o costeiro/aerosol, a banda 2 o azul, a banda 3 o verde, a banda 4 o vermelho, a banda 5 o infravermelho próximo, as bandas 6 e 7 são o infravermelho médio.

Nas análises estatísticas foram gerados diagramas de caixa - *boxplot* - para caracterizar a variabilidade dos índices de vegetação e das variáveis de estrutura do pasto, em função da oferta de forragem e das estações do ano. Para a análise de correlação entre as variáveis de estrutura do pasto e os índices de vegetação, foi utilizada a correlação de *Spearman*, adequada para dados não paramétricos, condição dos dados de índices espectrais utilizados neste estudo. A análise de correlação foi realizada por meio da função *cor.test* do programa estatístico R (v.3.6.0), considerando nível de significância de 5% ($P < 0,05$).

Foi realizada análise de Random Forest para verificação do índice de vegetação (média ou desvio padrão) que melhor explica as variáveis de estrutura do pasto. A análise de Random Forest avalia a importância relativa de uma variável independente medindo-a pela

%IncMSE, quanto maior o valor de %IncMSE, maior a importância dessa variável para estimativas da variável dependente. A análise foi realizada por meio do pacote *Random Forest* do programa estatístico R (v.3.6.0), calculando-se 1000 árvores. Os índices de vegetação foram ranqueados por ordem de importância de explicação para as variáveis de estrutura do pasto (massa de forragem, altura e percentual de touceiras), considerando 5% de nível de significância ($P < 0,05$).

4.3 Resultados e discussão

De forma geral, observa-se variabilidade entre as ofertas de forragem e entre as estações do ano nas variáveis de estrutura do pasto altura do dossel, massa de forragem e percentual de touceiras, assim como nas variáveis espectrais analisadas, NDVI, EVI e GN (Figura 13).

As variáveis de estrutura do pasto, altura do dossel, massa de forragem e percentual de touceiras apresentaram variação similar entre os tratamentos de oferta de forragem, sendo menores no tratamento de 4 kg de MS/100 kg de PV, com valores médios observados de 3,1 cm, 732 kg MS.ha⁻¹ e 3%, respectivamente. Conforme aumentou a oferta de forragem, observa-se aumento na altura do dossel, na massa de forragem e no percentual de touceiras, chegando a valores médios de 8,9 cm, 1.688 kg MS.ha⁻¹ e 43% respectivamente, na oferta de 16 kg de MS/100 kg de PV. Estes resultados concordam com resultados encontrados por Trindade *et al.* (2012), em estudo realizado na mesma área experimental, evidenciando que a imposição de diferentes ofertas de forragem cria ambientes com estruturas contrastantes. Ao longo do ano, em termos gerais, parece que todos os tratamentos de oferta de forragem apresentaram redução em altura e massa de forragem no inverno, com medianas da altura variando anualmente de 3 a 4 cm (4%), 4 a 6 cm (8%), 6 a 8 cm (12%) e 7 a 9 cm (16%) e da massa de forragem variando anualmente de 645 a 753 kg (4%), 1.077 a 1.125 (8%), 1.329 a 1.629 kg (12%) e 1.448 a 1.829 kg (16%). Durante o inverno, o crescimento vegetal é limitado pela diminuição da quantidade de energia no ambiente, a menor quantidade de radiação solar global e temperatura do ar baixa levam a redução da quantidade de biomassa presente nos campos naturais (Fontana *et al.*, 2018). A massa de forragem não apresentou variação ao longo do ano nas ofertas de forragem 4 e 8 kg de MS/100 kg de PV. Nas maiores ofertas de forragem, 12 e 16 kg de MS/100 kg de PV, a massa de forragem foi maior no verão e outono. Já o percentual de touceiras foi similar ao longo do ano.

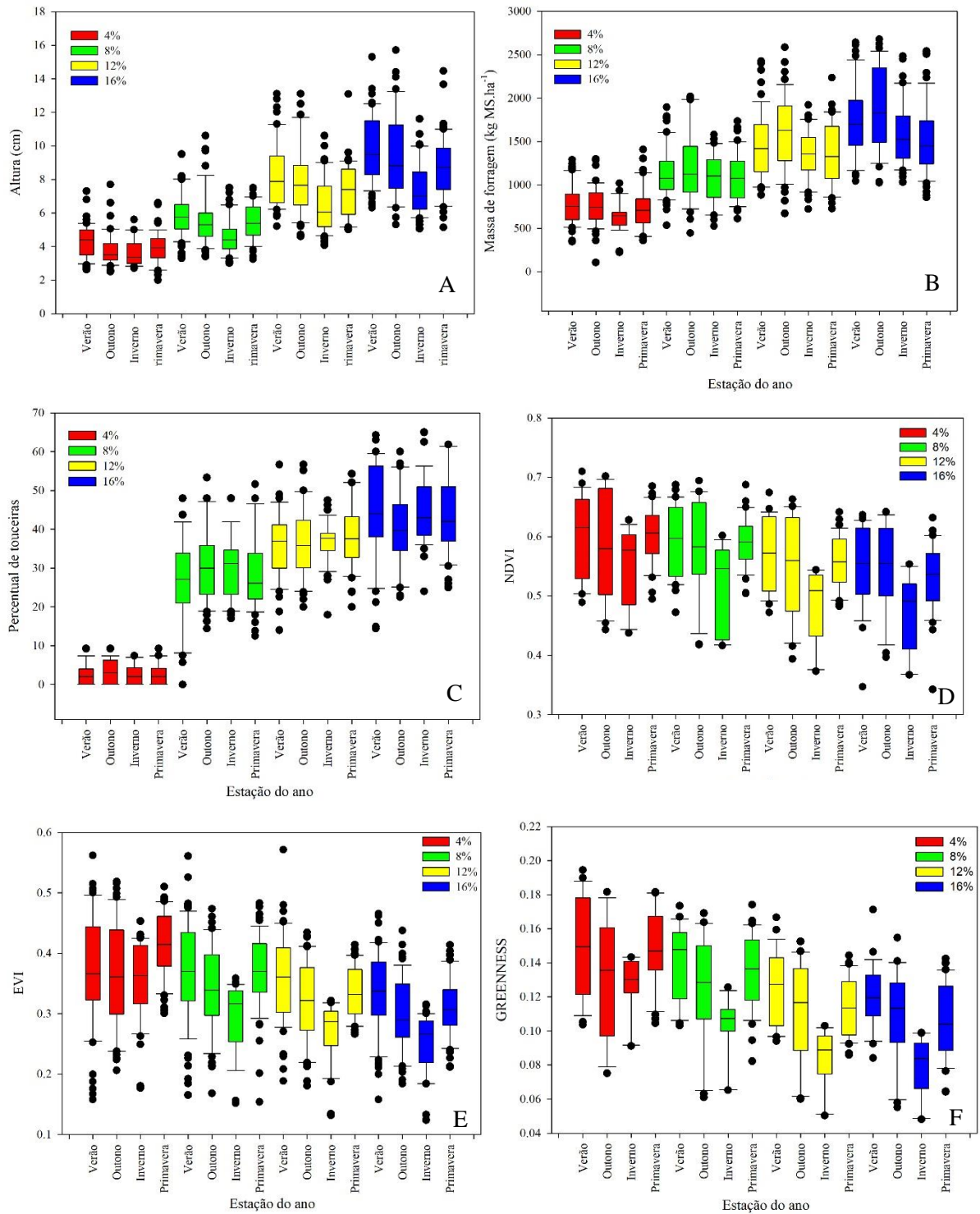


FIGURA 13. Diagramas de caixa das variáveis de estrutura do pasto Altura do dossel (A), Massa de forragem (B), Percentual de touceiras (C) e dos índices de vegetação NDVI (D), EVI (E) e GN (F), em função do nível de oferta de forragem 4% (vermelho), 8% (verde), 12% (amarelo) e 16% (azul) e estações do ano. Eldorado do Sul, Brasil, 2004-2016.

Os índices espectrais apresentaram dinâmica de variação inversa às variáveis de estrutura do pasto. Entre as ofertas de forragem, os valores dos índices espectrais foram maiores na menor oferta de forragem (4% PV), apresentando valores médios de 0,59, 0,38 e

0,14, respectivamente para NDVI, EVI e GN. Conforme aumentou a oferta de forragem, os valores dos índices espectrais, NDVI, EVI e GN diminuíram, chegando a valores médios de 0,49, 0,30 e 0,09, respectivamente, na oferta de forragem de 16 kg de MS/100 kg de PV (Figura 13). É esperado que quanto maior a quantidade de biomassa presente, maiores serão os valores dos índices espectrais, no entanto observou-se o oposto. Esse resultado pode ser explicado pela grande quantidade de material senescente que compõe a biomassa nas maiores ofertas de forragem, em decorrência do maior percentual de touceiras, o que reduz os valores dos índices espectrais, já que estes são estimadores de biomassa verde (Jensen, 2009).

Quanto à variabilidade anual, os índices espectrais também apresentaram queda no período de inverno, nas ofertas de forragem de 8, 12 e 16 kg de MS/100 kg de PV. Do início do outono ao final do inverno o material senescente apresenta maior participação na forragem disponível (Moojen *et al.*, 2002).

De maneira geral, as correlações entre as variáveis de estrutura do pasto e os índices espectrais foram negativas, com baixo coeficiente de correlação, mas significativas ($P < 0,05$). A baixa associação foi consequência da complexidade inerente a este tipo de formação vegetal. As pastagens naturais do bioma Pampa são caracterizadas pela coexistência de espécies vegetais com metabolismo fotossintético C3 e C4. Estes dois grupos de plantas têm seus ciclos de desenvolvimento em estações diferentes, espécies C3 são de ciclo hibernal, enquanto espécies C4 são de ciclo estival. Esta alternância na época de desenvolvimento das espécies vegetais que compõem as pastagens naturais garante que, de um mês para o outro, o aspecto da vegetação modifique completamente (Boldrini *et al.*, 2015).

As correlações entre altura do dossel e os índices de vegetação NDVI, EVI e GN foram significativas e negativas. Para a massa de forragem, as correlações, também negativas, foram significativas somente com EVI e GN. Já o percentual de touceiras apresentou correlação significativa de -0,23, apenas com GN (Tabela 4).

TABELA 2. Correlações entre as médias e desvio padrão (DP) dos índices de vegetação NDVI, EVI e GN e as variáveis de estrutura do pasto: Altura do dossel, Massa de forragem (MF) e percentual de touceiras (% touceiras). Eldorado do Sul, Brasil, 2004-2017.

	NDVI	EVI	GN	DP-NDVI	DP-EVI	DP-GN	Altura	MF	% touceiras
NDVI									
EVI	0,94**								
GN	0,91**	0,95**							
DP-NDVI	-0,25	-0,30	-0,31						
DP-EVI	0,15	0,25	0,07	0,77**					
DP-GN	0,34	0,32	0,28	0,59**	0,90**				
Altura	-0,16**	-0,22**	-0,28**	0,18**	0,03	-0,03			
MF	-0,09	-0,15**	-0,20**	0,13**	0,06	0,00	0,82**		
% touceiras	-0,06	-0,10	-0,23**	0,12	0,11	0,00	0,67**	0,65**	

** P<0,01

Espera-se coeficientes de correlação positivos entre índices espectrais e variáveis que expressem a biomassa vegetal (Jensen, 2009). Neste estudo, os coeficientes de correlação foram negativos, ou seja, quanto maiores foram os valores de altura do dossel, de massa de forragem e percentual de touceiras, menor foram os valores dos índices espectrais. Isto acontece devido a maior quantidade de material senescente, no estrato superior, nas maiores ofertas de forragem. Pode-se observar a diferença visual entre as ofertas de forragem contrastantes 4 e 16 kg de MS/100 kg de PV (Figura 14). Na oferta de forragem 4 kg de MS/100 kg de PV, não se nota a presença de material senescente (Figura 14A), em contraste com a oferta 16 kg de MS/100 kg de PV, onde a presença de material senescente é facilmente visualizada (Figura 14B). O incremento de material senescente nas maiores ofertas de forragem se dá em função da seleção da dieta pelos animais. Na menor oferta de forragem, os animais não têm opção de selecionar para a sua alimentação as espécies preferidas, pois a disponibilidade de alimento é reduzida. Conforme aumenta a oferta de forragem, os animais podem selecionar seu alimento, desta forma as espécies que não são frequentemente pastejadas crescem e formam touceiras, que aumentam a quantidade de material senescente ao completar o seu ciclo. Em áreas com condições de baixa intensidade de pastejo (alta oferta de forragem), os herbívoros concentram o pastejo em áreas de sua preferência (Boz, 2002), dando oportunidade para espécies formadoras de touceiras em condições de menor frequência de desfolhamento (Oom *et al.*, 2008).

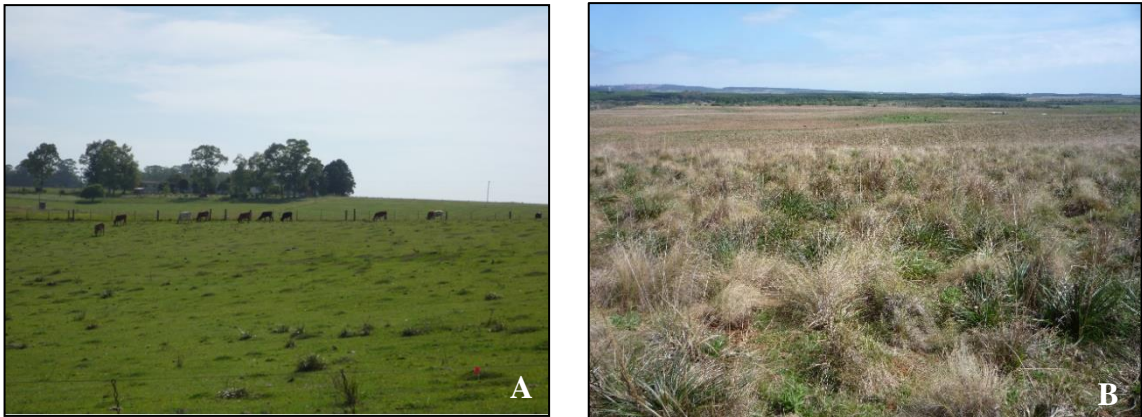


FIGURA 14. Imagens de áreas pertencentes às unidades experimentais com oferta de forragem 4 kg de MS/100 kg de PV (A) e 16 kg de MS/100 kg de PV (B). Eldorado do Sul, Brasil, 2019.

Quanto às correlações entre as variáveis de estrutura do pasto e os desvios padrão dos índices espectrais, elas foram positivas e significativas entre DP-NDVI e a altura do dossel, como também com a massa de forragem, ou seja, com aumento na altura do dossel e na massa de forragem, aumentou o desvio padrão do NDVI. A hipótese de utilização dos desvios padrão dos índices espectrais foi baseada em estudos prévios com uma série menor de imagens do sensor OLI, em que foi verificado que os desvios padrão poderiam ser usados como indicadores da heterogeneidade da vegetação e que seus valores foram maiores na maior oferta de forragem (Ogliari *et al.*, 2019). No entanto, as correlações com os desvios padrão dos demais índices espectrais não foram significativas neste estudo, quando se ampliou o período da série de dados analisados.

Segundo a análise de *Random Forest*, para massa de forragem, NDVI, EVI e GN tem percentuais de importância próximos, em torno de 30% (Figura 15A). Para a altura do pasto, o NDVI e EVI tem percentuais próximos e em torno de 25%. Já o GN possui percentual de importância maior e em torno de 35% (Figura 15B). Já para o percentual de touceiras, o GN tem percentual de importância em torno de 50%, enquanto o NDVI e o EVI tem percentual de importância em torno de 40% e 30%, respectivamente (Figura 15C). A diferença dos percentuais de importância entre os índices de vegetação pode estar associada às diferentes bandas utilizadas na construção de cada índice. O índice, na sua construção, é pensado para resolver algum tipo de problema. Por exemplo, o EVI foi desenvolvido com o intuito de diminuir os problemas com interferência atmosférica e saturação em altas quantidades de biomassa (Jensen, 2009). Desta forma, a diferença de cálculo dos três índices abordados

neste estudo pode ter ocasionado as diferenças na importância relativa destes para estimativas das variáveis de estrutura do pasto.

Em termos gerais, considerando as três variáveis de estrutura do pasto (massa de forragem, altura do pasto e percentual de touceiras) o índice mais efetivo em estimativas das variáveis de estrutura do pasto é o GN. Se a intenção do usuário for utilizar a massa de forragem para manejar a pastagem natural, qualquer um dos três índices avaliados pode ser utilizado. Se a intenção é utilizar a altura do pasto ou o percentual de touceiras para manejar a pastagem natural, o usuário deve utilizar preferencialmente o GN.

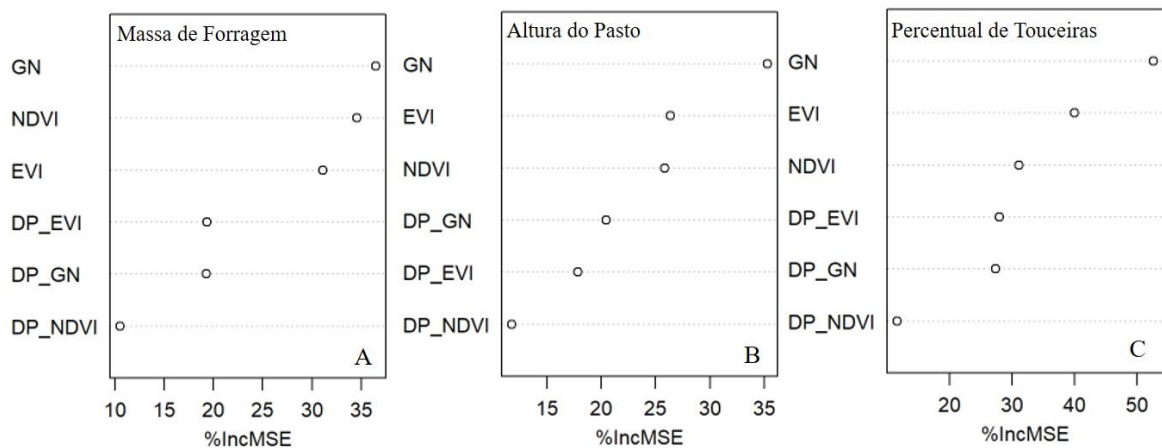


FIGURA 15. Ordem de importância da média e desvio padrão dos índices de vegetação NDVI, EVI e GN para estimativas de massa de forragem (A), altura do pasto (B) e percentual de touceiras (C). Eldorado do Sul, Brasil, 2004-2017.

4.4 Conclusões

Os índices espectrais são capazes de detectar variabilidade na estrutura do pasto associada, em parte, a variáveis de manejo e disponibilidade climática.

Em condições de menor oferta de forragem, dada a menor existência de material senescente, os índices espectrais são maiores. Já ao longo do ano, para todas as ofertas de forragem, o inverno é quando são observados os menores valores dos índices espectrais.

Apesar de estatisticamente significativos, os índices espectrais apresentam baixos coeficientes de correlação com as variáveis de estrutura do pasto, o que demonstra a complexidade deste ecossistema.

Entre os índices testados, o GN apresenta maior importância relativa para estimativas das variáveis de estrutura do pasto.

4.5 Referências Bibliográficas

ALVES, D. B. et al. Análise multitemporal de áreas afetadas pelo fogo no enclave de cerrado do Parque Nacional dos Campos Amazônicos utilizando sensoriamento remoto e trabalho de campo. *Geografia Ensino & Pesquisa*, Santa Maria, v. 22, p. 01-24, 2018.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

BAIG, M. H. A. et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. **Remote Sensing Letters**, Abingdon, v. 5, n. 5, p. 423–431, 2014.

BARTHAM, G.T. Experimental techniques: the HFRO sward stick. In: HILL Farming Research Organization. Biennial Report, 1985. p. 29-30.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da estação experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: UFRGS, 2013. 77 p.

BOLDRINI, I.I. **Dinâmica da vegetação de uma pastagem natural sob diferentes níveis de oferta de forragem e tipos de solo, Depressão Central, RS**. 1993. 262f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Curso de Pós-Graduação em Zootecnia, Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

BOLDRINI, I. I. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: PILLAR, V.D.P. et al. (ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, MMA, 2012. p. 63-77.

BOLDRINI, I. I.; OVERBECK, G.; TREVISAN, R. Biodiversidade de Plantas In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.). **Os campos do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p. 51-59.

BOS, D. **Grasing in coastal grasslands: brent geese and facilitation by herbivory**. 2002. 224 f. Tese (Doutorado) – Groningen University, Groningen, 2002.

BULLOCK, E. L.; WOODCOCK, C. E.; OLOFSSON, P. Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis. **Remote Sensing of Environment**, New York, 2018.

CASTILHOS, Z. M. S.; MACHADO, M. D.; PINTO, M. F. Produção animal com conservação da flora campestre do bioma Pampa. In: PILLAR, V.D.P. et al. (ed.). **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília, MMA, 2012. p. 199-205.

CRIST, E. P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 17, n.3, p. 301-306, 1985.

FONTANA, et al. NDVI and meteorological data as indicators of the Pampa biome natural grasslands growth. **Bragantia**, Campinas, v. 77, n. 2, p.404-414, 2018.

JAKIMOW, B. et al. Mapping pasture management in the Brazilian Amazon from dense Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 205, p. 453-468, 2018.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ª ed. São José dos Campos: Ed. Parêntese, 2009. 598 p.

MACHADO, I.R.; GIASSON, E. **Mapa de solos da Estação Experimental Agronômica da UFRGS**. 2016.

MELLO, O. et al. Levantamento de uma série de solos do Centro Agronômico. **Revista da Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS**, Porto Alegre, v.8, n.1/4, p.7-155, 1966.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Pampa**. [2019]. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomas/pampa.html>. Acesso em: 22 nov. 2019.

- MOOJEN, E. L.; MARASCHIN, G. E. Potencial produtivo de uma pastagem nativa do Rio Grande do Sul submetida a níveis de oferta de forragem. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 127-132, 2002.
- MOREIRA, A. et al. Seasonal dynamics of vegetation índices as a criterion for grouping grassland typologies. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 76, p. 24-39, 2019.
- MOTT, G.O.; LUCAS, H.L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In.: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRES, 6., 1952, Pennsylvania. **Proceedings...** Pennsylvania: State College Press, 1952. p.1380-1395.
- NABINGER, C. et al. Campos in Southern Brazil. In: GRASSLAND ecophysiology and grazing ecology. Wellingford: CABI, 2000. p. 335-376.
- OGLIARI, D. G. P. et al. NDVI como indicador de diferenças na estrutura da vegetação em pastagens naturais no Bioma Pampa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 19., 2019, Santos. **Anais**. Santos, 2019. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/ndvi-como-indicador-de-diferencas-na-estrutura-da-vegetacao-em-pastagens-naturais-do-bioma-pampa>. Acesso em: 12 jul. 2019.
- OOM, S. P. et al. Spatial Interactions models: from human geography to plant-herbivore interactions. **Oikos**, Copenhagen, v. 98, p. 65-74, 2002.
- OVERBECK, Biodiversidade de Plantas In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.). **Os campos do Sul**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2015. p. 51-61.
- PINTO, C. E.; WALLAU, M.; BOLDRINI, I. I. Estrutura da vegetação e composição florística In: NATIVÃO 30 anos de pesquisa em campo nativo. Porto alegre, 2017. P. 16-20. (Boletim Técnico, v. 1).
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E; KUPLICH, T. M. Sensoriamento Remoto da Vegetação. 2. Ed. Cubatão: Oficina de Textos, 2012.
- ROSA, F.; BREMM, C.; MACHADO, D. R. Nativão 30 anos de pesquisa em campo nativo: Efeito da oferta de forragem na estrutura do pasto. Porto Alegre, v. 1, 2017.
- TRINDADE, J. K. et al. Forage Allowance as a target of grazing managment: implications of grazing time and forage searching. **Rangeland Ecology & Management**, Lawrence, v. 65, p. 382-393, 2012.
- WAGNER, A. P. L. et al. Vegetation Indices Variability in the Pampa grasslands in Brazil and Uruguay. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 26, p. 83-92, 2018.
- WILM, H.G.; COSTELLO, D.F.; KLIPPLE, G.E. Estimating forage yield by the double sampling methods. **Journal of the American Society of Agronomy**, Geneva, n. 36, p. 194-203, 1944.

5 CAPÍTULO 3

Quantificação da área coberta por estrato superior, por método de classificação supervisionada, em pastagem natural no Bioma Pampa

RESUMO - A quantidade de área ocupada por estrato superior em pastagens naturais tem grande importância sobre o desempenho produtivo dos animais em pastejo, sendo importante mensurá-la. No entanto, as metodologias existentes para realização deste tipo de avaliação são limitadas. As imagens obtidas de sensores remotos como câmeras fotográficas a bordo de drones, podem fornecer informações úteis para este tipo de estudo, especialmente por possuírem grande resolução espacial, com pixel de tamanho menor que as touceiras que compõem o estrato superior. O objetivo deste trabalho foi testar dois diferentes classificadores supervisionados, utilizando uma imagem aérea obtida por câmera a bordo de um drone, no mapeamento da área coberta por estrato superior em pastagem natural no bioma Pampa. A área de estudo situa-se num experimento de pastagem natural, que vem sendo manejada sob diferentes ofertas de forragem, tendo sido neste estudo, considerados apenas os tratamentos 8, 12 e 16 kg de matéria seca por 100 kg de peso vivo. Foi obtida uma imagem aérea da área de estudos, em setembro de 2017, com uma câmera Cânon S100, a bordo de um drone, com resolução espacial de 5 cm. Foram testados dois classificadores o *Randon Forest* e *Support Vector Machine*. Para comparação com os resultados obtidos com a classificação foram utilizados dados de percentual de estrato superior obtidos a campo no experimento, dos anos de 2004 a 2016. As imagens de falsa cor quando comparadas às imagens classificadas, apresentam semelhança nos grandes padrões visuais da vegetação. Os classificadores testados foram capazes de mensurar a área coberta por estrato superior, em pastagem natural do bioma Pampa.

5.1 Introdução

Nas pastagens naturais, a distribuição das espécies vegetais é influenciada pelo clima, solo e relevo. Além destes fatores, o manejo é fundamental para definir a fisionomia campestre. Desta forma, o pastejo pode ser considerado indispensável para a manutenção dos campos e de sua biodiversidade e possui um papel importante em determinar a fisionomia vegetal. Quando a pressão de pastejo é intensa, a vegetação é composta apenas pelo estrato rasteiro (estrato inferior) e dominada pelas gramíneas rizomatosas ou estoloníferas. À medida que a pressão de pastejo diminui, a vegetação fica mais heterogênea e há o desenvolvimento de dois estratos, um rasteiro dominado por espécies rizomatosas e

um mais alto (estrato superior), com gramíneas cespitosas e arbustos. Este último tipo de gramíneas é forte competidor e tende a acumular muita biomassa, o que causa a redução da diversidade de espécies menores (Overbeck *et al.*, 2015).

Os herbívoros, ao pastejarem, selecionam a sua dieta. Eles desenvolveram uma série de mecanismos ou ferramentas de pastejo que compõem o que se chama de comportamento ingestivo (Carvalho *et al.*, 1999). Estes mecanismos permitem aos herbívoros colherem uma dieta de qualidade superior àquela presente na média do ambiente. A forma com que a pastagem está disponível ao animal é chamada de estrutura da pastagem, sendo responsável pela quantidade de nutrientes ingeridos em pastejo (Carvalho *et al.*, 2001). Desta forma, introduz-se o conceito de estrutura da vegetação, com a introdução de parâmetros como altura do pasto e proporção de área ocupada por touceiras, entre outros (Pinto *et al.*, 2017).

Em situações de alta oferta de forragem, a área ocupada por estrato superior influencia diretamente as ações dos animais no processo de pastejo. Segundo Bremm *et al.* (2012), em experimento com novilhas de corte e ovinos submetidos a diferentes níveis de cobertura por touceiras de *Eragrostis plana* Ness., a taxa de ingestão a curto prazo e a massa de bocado foram reduzidas quando a área coberta por estrato superior, composto por *Eragrostis plana*, foi maior que 34 e 44%, respectivamente. Em contraponto, quando a massa de forragem da pastagem é baixa, a massa de bocado diminui e, nesta situação, os animais aumentam o tempo de pastejo e a taxa de bocados (Pening, 1986). A qualidade da pastagem também é modificada em função da quantidade de estrato superior presente na área. O estrato inferior formado por “campos finos”, com presença de espécies forrageiras como grama tapete (*Axonopus affinis*), grama-forquilha (*Paspalum notatum*), grama-cinzenta (*Paspalum plicatum*), e grama-baixa (*Paspalum pumilum*), produz forragem com maior qualidade. Já o estrato superior, com espécies cespitosas e eretas, como capim-caninha (*Andropogon lateralis*), barba-de-bode (*Aristida laevis*), macega-estaladeira (*Saccharum angustifolius*) e capim-rabo-de-burro (*Schizachyrium microstachyum*), acumula maior quantidade de material morto e possui menores teores de proteína bruta e digestibilidade (Kuhn & Bremm, 2017).

Visto a influência da estrutura da pastagem, especialmente a quantidade de área ocupada por estrato superior, sobre o desempenho produtivo dos animais em pastejo, é importante mensurar a área coberta por estrato superior nas pastagens naturais. Isto é especialmente válido para o estado do Rio Grande do Sul, em que as pastagens naturais são a base da alimentação dos rebanhos. No entanto, as metodologias existentes para realização das avaliações da estrutura da vegetação são limitadas. Neste sentido, imagens obtidas de

sensores remotos, como câmeras fotográficas a bordo de aeronaves remotamente pilotadas (ARP), podem fornecer informações úteis para nestes estudos. A grande vantagem no uso das câmeras é a alta resolução espacial, com pixel de tamanho menor do que as touceiras que compõem o estrato superior predominante nos campos naturais. Esta característica, aliada ao uso cada vez mais frequente deste tipo de imagens para os mais variados campos da ciência, faz com que as imagens provenientes de câmeras se tornem uma alternativa a ser investigada em estudos de alvos de interesse agropecuário. Entre os muitos exemplos de aplicação, destacam-se, Tetila *et al.* (2017), que utilizaram imagens obtidas com drones para identificação de doenças foliares na soja, e Calou *et al.* (2019), que utilizaram imagens obtidas com drones para identificação da Sigatoka Amarela em bananeiras.

O passo seguinte, após a obtenção das imagens de câmeras a bordo ARPs, é a extração e interpretação das informações geradas, o que pode ser feito utilizando o processo de classificação digital. A classificação é o processo que busca atribuir um rótulo a certo dado descrito por um conjunto de atributos. Nesta, a identificação dos alvos presentes na imagem frequentemente está baseada nas diferenças como a vegetação interage com a radiação solar incidente e reflete ou emite a radiação, a qual será detectada na câmera, determinando resposta espectral de alvos. Em imagens digitais de sensoriamento remoto, esse processo equivale a determinar, para cada pixel, qual categoria está presente na superfície (Zanotta *et al.*, 2019). As diferentes respostas podem servir para, por exemplo, a diferenciação dos estratos superior e inferior nas pastagens naturais.

Existem diversos métodos de classificação de imagens digitais, que podem ser divididos em métodos de classificação não supervisionados e supervisionados. A diferença entre os dois métodos é a utilização, nos métodos supervisionados, de dados rotulados para o treinamento de modelos, esses dados são um subconjunto dos pixels da imagem que servem como exemplo das classes existentes na imagem (Zanotta *et al.*, 2019). Entre classificadores supervisionados, dois tem-se destacado em estudo recentes, o *support vector machine* e o *random forest*.

Assim, o objetivo deste trabalho foi testar dois diferentes classificadores, utilizando imagem obtida de câmera digital a bordo de drone, para o mapeamento da área coberta por estrato superior em pastagem natural no bioma Pampa. Visto que as pastagens naturais apresentam uma dinâmica muito intensa, o registro de fotografias, se comprovado eficaz, é adequado e tem baixo custo.

5.2 Material e métodos

A área onde foi realizado o estudo pertence a Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - EEA/UFRGS, localizada sob as coordenadas geográficas 30°05'27''S, 51°40'18''W e 46 m de altitude, no município de Eldorado do Sul, na Depressão Central do Rio Grande do Sul.

O clima da região é classificado como Cfa, (Alvares *et al.*, 2014). A precipitação pluvial média anual na EEA/UFRGS é de 1.440 mm com média mensal de 120 mm. A temperatura média do ar varia de 13,5 °C nos meses mais frios (junho e julho) a 24,6 °C nos meses mais quentes (janeiro e fevereiro). As médias diárias da radiação solar global oscilam de 206 (junho) a 509 cal.cm⁻².dia (dezembro) (Bergamaschi *et al.*, 2012). Na área experimental ocorrem três tipos de solos Planossolo Háplico Distrófico êndico, Argissolo Vermelho Distrófico típico e Plintossolo Argilúvico Distrófico típico (Mello *et al.*, 1966; Machado & Giasson, 2016).

A área de estudo situa-se num experimento de longa duração, composto de 64 ha de pastagem natural, que vem recebendo o mesmo nível de interferência antrópica desde 1986. O delineamento experimental é de blocos casualizados com duas repetições por tratamento, os quais consistem em diferentes ofertas de forragem (OF), fixas ao longo do ano e ofertas variáveis na estação primaveril. Para este estudo foram consideradas apenas as ofertas de forragem fixas: 4, 8, 12 e 16 kg de MS.100⁻¹ kg de peso vivo (% OF). Neste estudo, foram analisados apenas os tratamentos 8%, 12% e 16%. O método de pastejo utilizado é o contínuo com taxa de lotação variável (Mott & Lucas, 1952), para ajuste das ofertas de forragem preconizadas. A carga animal é ajustada em intervalos de aproximadamente 28 dias, de acordo com a massa de forragem disponível para pastejo, nas unidades experimentais (UE). Os animais utilizados nas unidades experimentais são novilhas de corte, oriundas de cruzamentos entre as raças Angus, Hereford e Nelore, com idade média inicial de 12 meses.

Para a obtenção dos dados relativos à resposta espectral da vegetação que compõe a área de estudo, foi obtida uma imagem aérea, em setembro de 2017, com uma câmera Cânon S100, a bordo de um drone. A câmera foi alterada, por adição de um filtro com sensor de vegetação, que filtra toda a luz vermelha e, em vez disso, permite que a faixa de infravermelho próximo, normalmente bloqueada, seja coletada. Esta manipulação permite que uma câmera colete a luz no infravermelho próximo, verde e azul. O voo foi realizado a uma altura de 120 m, com sobreposição frontal (na direção do voo) de 80% e sobreposição lateral (entre as linhas de voo) de 60%. A resolução espacial da imagem foi de 5 cm.

A classificação dos alvos foi realizada no *software* MATLAB, por metodologia adaptativa, derivada de experimentos exploratórios sobre as classes presentes na área de estudo. Após, amostras de cada classe foram coletadas por interpretação visual e utilizadas para treinar os classificadores, o número de amostras variou de três a sete, dependendo da variabilidade de tons de cor de cada classe. Foram testados dois classificadores: *Support Vector Machines* (SVM) ou *Random Forest* (RF). A opção por um ou outro se deu de maneira automática e foi definida a partir da combinação de classes presentes no problema particular de classificação.

O classificador SVM procura uma linha de separação chamada de hiperplano entre dados de duas classes. Quando o problema envolve mais classes, o método confronta uma classe contra um grupo de todas as classes restantes, uma de cada vez até que todas sejam analisadas em comparação com o restante do grupo. Um plano de separação é definido a fim de maximizar a distância entre os pontos mais próximos em relação a cada uma das classes. Essa distância entre o hiperplano e o primeiro ponto de cada classe costuma ser chamada de margem. O SVM define assim cada ponto pertencente a cada uma das classes, e em seguida maximiza a margem. Ou seja, ela primeiro classifica as classes corretamente e depois em função dessa restrição define a distância entre as margens (Zanotta *et al.*, 2019).

O classificador RF é similar a uma árvore de decisão. As árvores de decisão são um método popular para várias tarefas de aprendizado de máquina. O aprendizado em árvore é invariável em escala e robusto a inclusão de características irrelevantes. Em particular, as árvores que crescem muito fundo tendem a aprender padrões altamente irregulares: elas superestimam seus conjuntos de treinamento, ou seja, têm um viés baixo, mas uma variação muito alta. As RF são uma forma de calcular a média de várias árvores de decisão profunda, treinadas em diferentes partes do mesmo conjunto de treinamento, com o objetivo de reduzir a variação. Isso ocorre às custas de um pequeno aumento no viés e alguma perda de interpretabilidade, mas geralmente aumenta muito o desempenho no modelo final (Zanotta *et al.*, 2019).

A classificação utiliza atributos de brilho e forma/textura dos alvos. Numa primeira etapa, apenas os atributos de brilho (espectrais) são utilizados. Em uma segunda etapa, algumas combinações utilizam ainda elementos de forma e textura para diferenciar algumas classes espectralmente similares. O resultado apresenta medidas de acurácia da classificação por substituição dos elementos amostrais.

A validação se deu através de um conjunto de amostras coletadas especificamente para esse fim, diferente daquelas usadas na etapa de treinamento dos classificadores. Logo, se

exime qualquer contaminação ou vício dos classificadores e os resultados de precisão obtidos podem ser considerados de forma confiável. A escolha do melhor classificador para cada UE, SVM ou RF, foi realizada com base na exatidão global do classificador, como também pela observação visual nas imagens classificadas confrontadas com a imagem de falsa cor (NIR-G-B).

5.3 Resultados e discussão

Verificou-se que o desempenho do classificador foi distinto conforme a UE. O classificador que obteve o melhor desempenho para as UEs 3A, 1B, 5A e 6B foi o SVM, enquanto para as EU 7A e 4A foi o RF. Tais diferenças se devem a peculiaridades de cada ambiente, cujas quantidades e qualidades das classes variam. Foram identificadas 6 diferentes classes: água, sombra, estrato superior 1 (ES1), estrato superior 2 (ES2), estrato inferior 1 (EI1) e estrato inferior 2 (EI2). A classe estrato superior 1 ocorre em áreas com estrato superior secas, enquanto a classe estrato superior 2 ocorre em áreas com estrato superior em banhado, apresentando interferência da água no comportamento espectral desta classe. A classe estrato inferior 1 é o estrato inferior verde em áreas secas, enquanto o estrato inferior 2 é o estrato inferior em áreas de banhado ou com coloração diferentes de verde.

As imagens de falsa cor, obtidas da câmera do drone, quando comparadas às imagens classificadas mostraram semelhanças visuais (Figura 16), o que evidencia a qualidade da classificação realizada com base nos atributos espectrais da vegetação presente nas UEs avaliadas.

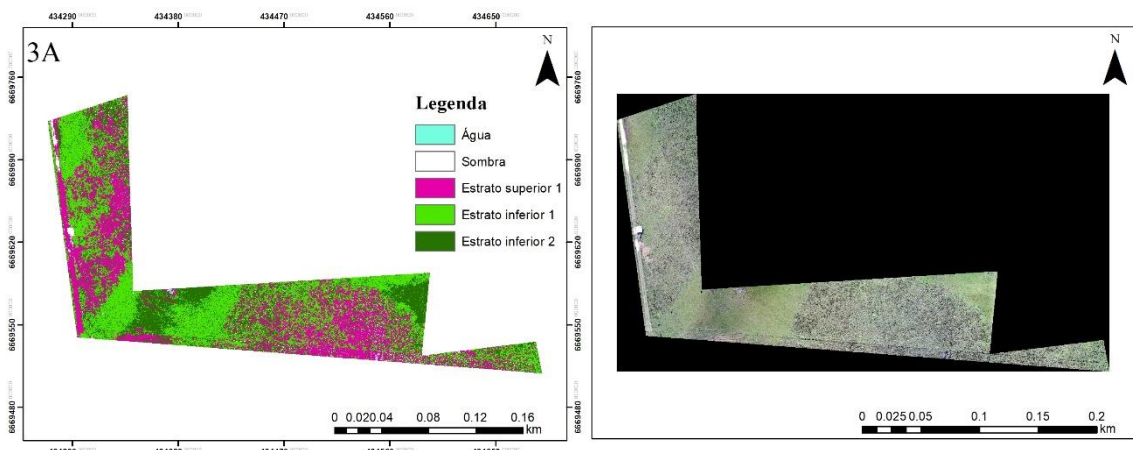
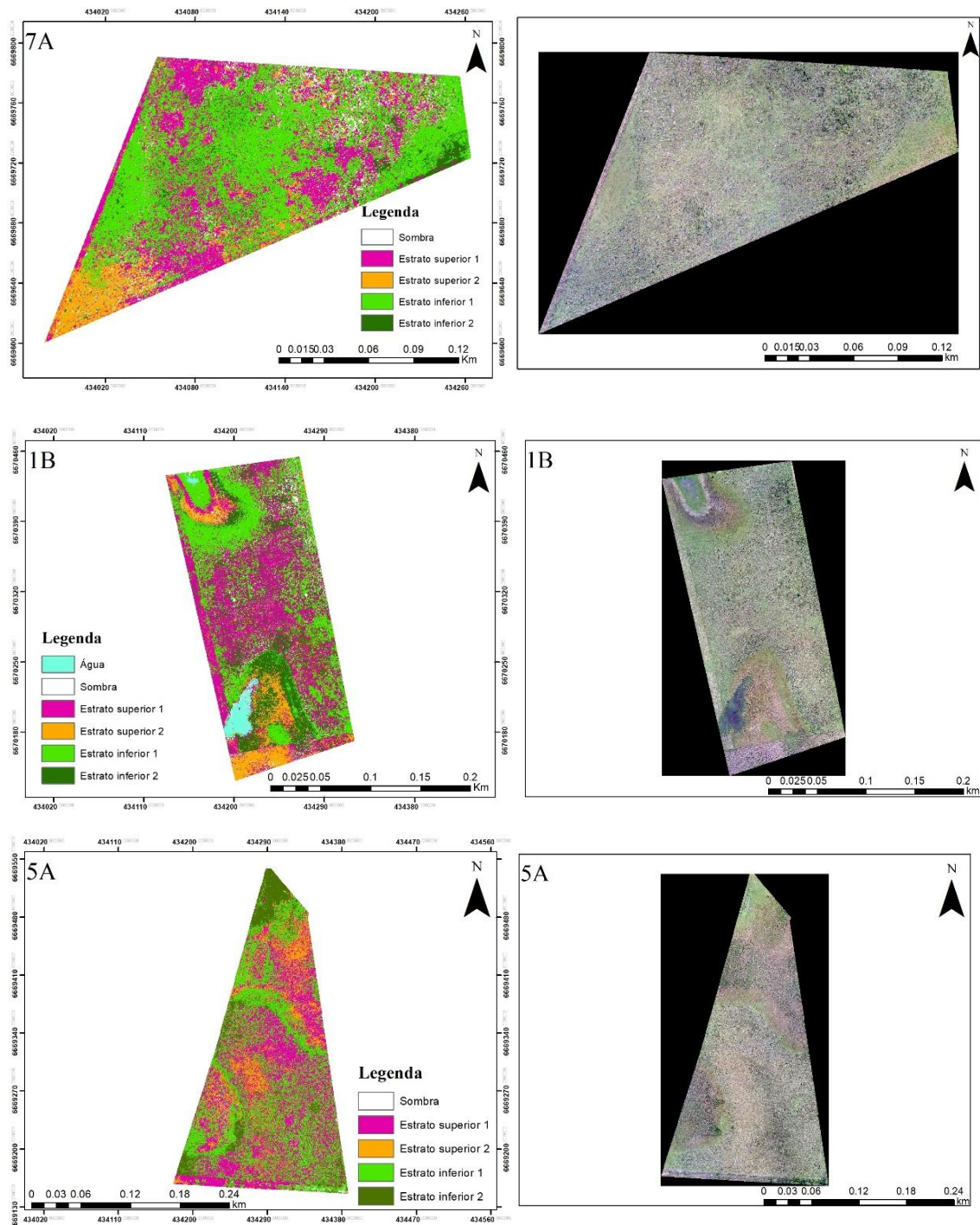
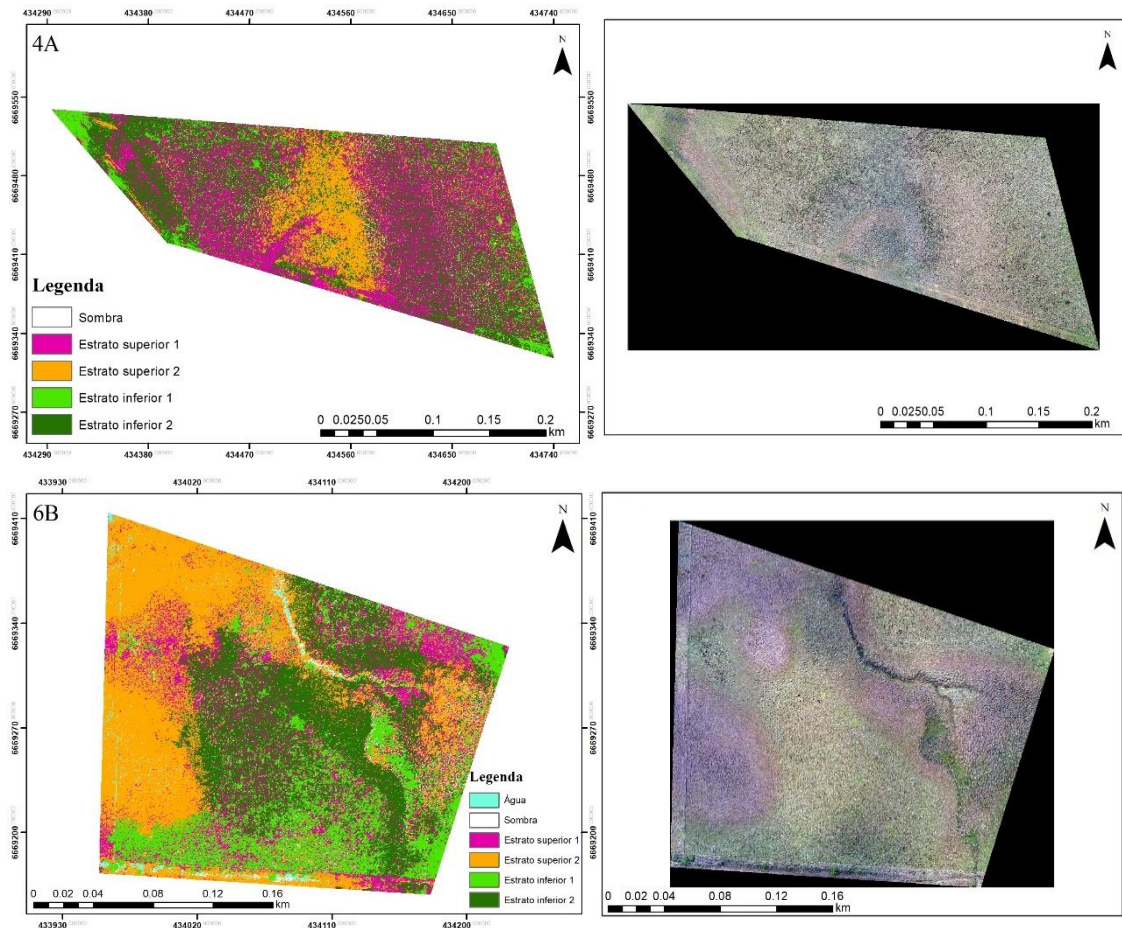


FIGURA 16. Mapas classificados (à esquerda), imagem de falsa cor: infravermelho, verde e azul (à direita) nas 6 Unidade Experimentais avaliadas (3A, 7A, 1B, 5A, 4ª e 6B). Eldorado do Sul, Brasil, 2019.



continuação FIGURA 16. Mapas classificados (à esquerda), imagem de falsa cor: infravermelho, verde e azul (à direita) nas 6 Unidade Experimentais avaliadas (3A, 7A, 1B, 5A, 4^a e 6B). Eldorado do Sul, Brasil, 2019.



continuação FIGURA 16. Mapas classificados (à esquerda), imagem de falsa cor: infravermelho, verde e azul (à direita) nas 6 Unidade Experimentais avaliadas (3A, 7A, 1B, 5A, 4^a e 6B). Eldorado do Sul, Brasil, 2019.

Na Tabela 5, estão apresentadas as matrizes de confusão ou matrizes de erro, o que permite avaliar quantitativamente a precisão da classificação para cada uma das UE. Observa-se que a exatidão global (EG) dos classificadores variou de 75% a 87% nas UE 4A e 5A, respectivamente, o que pode ser considerado um resultado satisfatório em função do tipo de alvos avaliados. As magnitudes das EG encontradas no presente estudo foram semelhantes às encontradas por Lu & He (2017), ao testar classificadores para identificação de espécies vegetais também em pastagens, no caso pastagens mistas. No estudo, os autores encontraram EG que variaram de 82% a 86%, também usando imagens obtidas com veículo aéreo não tripulado, com o objetivo de identificar espécies ecologicamente e economicamente importantes e investigar suas características fenológicas.

Em geral, as classes que geraram maior confusão entre si foram a Inferior 1 com Inferior 2. Isto pode ser observado nas UEs 3A e 7A, com exatidões do usuário mais baixas, de 60% (para EI1) e 65% (para EI2), respectivamente (Tabela 5). Também as classes estrato superior 1 com estrato superior 2, geraram erros de classificação, como pode ser observado

nas unidades 7A e 5A (Tabela 5), obtendo-se exatidões do usuário de 77% (para ES1) e 70% (para ES2), respectivamente. Este tipo de erro do classificador não foi considerado problemático, pois ocorreu entre subclasses do mesmo alvo. A presença de água nas áreas de banhado contribuiu para diferenciar a resposta espectral de um mesmo alvo em condição hídrica distinta. Entretanto, como o conteúdo de água possivelmente não seja constante em toda a área de banhado, existe uma transição da resposta de uma dada classe em condição mais seca e mais úmida, o que pode ter causado confusão na classificação.

TABELA 3. Matrizes de confusão geradas em cada Unidade Experimental (3A, 7A, 1B, 5A, 6B, 4A) no processo de classificação. Eldorado do Sul, Brasil, 2019.

3A									
	Água	Sombra	ES-1	EI-1	EI-2	Total	EP (%)	EU (%)	EG (%)
Água	312	0	43	0	0	355	88	96	78
Sombra	0	81	0	0	3	84	96	100	
ES-1	4	0	1792	12	109	1917	93	83	
EI-1	0	0	14	8642	371	9027	96	60	
EI-2	8	0	312	5721	12683	18724	68	96	
Total	324	81	2161	14375	13166	30107			

7A									
	Sombra	ES-1	ES-2	EI-1	EI-2	Total	EP (%)	EU (%)	EG (%)
Sombra	894	0	0	2	0	896	100	99	80
ES-1	3	2220	312	13	401	2949	75	77	
ES-2	2	505	707	0	0	1214	58	69	
EI-1	0	16	0	5137	1457	6610	78	94	
EI-2	0	135	12	299	3503	3949	89	65	
Total	899	2876	1031	5451	5361	15618			

1B										
	Água	Sombra	ES-1	ES-2	EI-1	EI-2	Total	EP (%)	EU (%)	EG (%)
Água	16111	0	6	0	0	3	16120	100	95	82
Sombra	756	420	0	22	5	9	1212	62	100	
ES-1	0	0	2619	317	631	3299	6866	79	79	
ES-2	37	0	168	2888	0	1568	4661	184	86	
EI-1	0	0	11	0	10187	22	10220	100	89	
EI-2	15	0	530	139	669	6285	7638	82	56	
Total	16919	420	3334	3366	11492	11186	46717			

continuação TABELA 3. Matrizes de confusão geradas em cada Unidade Experimental (3A, 7A, 1B, 5A, 6B, 4A) no processo de classificação. Eldorado do Sul, Brasil, 2019.

5A										
	Sombra	ES-1	ES-2	EI-1	EI-2	Total	EP (%)	EU (%)	EG (%)	
Sombra	176	0	0	0	0	176	100	100	87	
ES-1	0	4186	847	150	35	5218	80	84		
ES-2	0	445	2007	115	25	2592	77	70		
EI-1	0	129	9	6601	161	6900	96	94		
EI-2	0	207	11	393	3479	4090	85	89		
Total	176	4967	2874	7054	3905	18976				

6B										
	Água	Sombra	ES-1	ES-2	EI-1	EI-2	Total	EP (%)	EU (%)	EG (%)
Água	1051	0	0	100	0	0	1151	91	97	80
Sombra	0	159	0	0	2	0	161	99	100	
ES-1	0	0	1999	504	6	192	2701	74	54	
ES-2	34	0	260	3072	0	38	3404	90	83	
EI-1	0	0	69	0	3768	536	4373	86	98	
EI-2	0	0	1405	38	51	2552	4046	63	77	
Total	1085	159	3733	3714	3827	3318	15836			

4A										
	Sombra	ES-1	ES-2	EI-1	EI-2	Total	EP (%)	EU (%)	EG (%)	
Sombra	150	4	1	0	0	155	97	98	75	
ES-1	0	4299	567	10	1671	6547	66	65		
ES-2	0	332	3906	0	77	4315	91	85		
EI-1	0	25	0	4079	369	4473	91	96		
EI-2	3	1927	134	143	3057	5264	58	59		
Total	153	6587	4608	4232	5174	20754				

OBS: A classe ES-1 se refere a estrato superior em área seca, a classe ES-2 se refere a estrato superior em área de banhado, a classe EI-1 se refere a estrato inferior em área seca e a classe EI-2 se refere a estrato inferior em área de banhado ou com coloração diferente de verde. EP é eficiência do produtor, EU é eficiência do usuário

Também as classes estrato superior 1 com estrato inferior 2 apresentaram confusão entre si, como ocorreu nas UE 6B e 4A. Este sim é um tipo de erro do classificador problemático, pois o objetivo da classificação foi mapear e quantificar a presença do estrato superior. Assim, quando houve confusão entre estrato inferior e superior, o mapeamento do estrato superior ficou comprometido. Vale lembrar que as fotografias aéreas contam com poucas bandas espectrais, o que limita bastante o desempenho dos classificadores. A confusão entre as classes pode estar relacionada às semelhanças espectrais, mas também ao processo de coleta das amostras tanto para treinamento do classificador como para a avaliação da classificação. No caso dos campos naturais, a amostragem é muito dependente da experiência e conhecimento do operador, visto que cada uma das classes apresenta diferentes colorações e, muitas vezes o mesmo tom pode estar presente em mais de uma

classe, o que torna a amostragem complexa. Importante lembrar que ambas classes, estrato superior e inferior, são tipos de vegetação predominante em campos naturais, com padrões espectrais razoavelmente semelhantes e dispostos de forma quase aleatória nas UE. Isto difere da situação em que se busca classificar lavouras, maciços florestais, corpos d'água entre outros, em que há um agrupamento espacial evidente dos alvos, possibilitando o uso de outros tipos de atributos além do espectral.

Sabe-se que o sucesso da classificação supervisionada depende de uma série de fatores, entre eles: i) As medidas obtidas pelo sensor devem permitir a diferenciação das classes de interesse do usuário, ii) Quando se fala em sensores imageadores, espera-se que as resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal dos dados seja compatível com o problema a ser tratado, iii) Para a classificação de áreas agrícolas é importante ter dados com muitas bandas espectrais capazes de diferenciar classes espectralmente semelhantes (Zanotta *et al.*, 2019). No presente trabalho, a imagem utilizada apresentava apenas três bandas espectrais, o que pode limitar em parte a diferenciação dos alvos. Já a resolução espacial é adequada às classes avaliadas.

É esperado que com o aumento da oferta de forragem o aumento do percentual de touceiras. Isto ocorre pois, conforme aumenta a oferta de forragem, os animais podem selecionar seu alimento, desta forma as espécies que não são frequentemente pastejadas crescem e formam touceiras. Em áreas com condições de baixa intensidade de pastejo (alta oferta de forragem), os herbívoros concentram o pastejo em áreas de sua preferência (Boz, 2002), dando oportunidade para espécies formadoras de touceiras em condições de menor frequência de desfolhamento (Oom *et al.*, 2008).

Quando comparada aos dados obtidos a campo, o percentual da área coberta por estrato superior obtido no processo de classificação apresentou valores próximos, nas UE 3A, 7A, 1B e 4A. Já nas UE 5A e 6B, o percentual da área coberta por estrato superior obtido pela classificação foi maior que a obtido por avaliação à campo (Tabela 6). Acredita-se que esta diferença nos percentuais da área coberta por estrato superior tenha ocorrido pela complexidade de separar diferentes tipos de vegetação, que muitas vezes apresentavam resposta espectral semelhante. Também é importante salientar que parte das diferenças encontradas podem estar associadas a inconsistências associadas ao processo de amostragem feita a campo. Tais inconsistências podem estar associadas a mudança de avaliador a cada amostragem e a qualidade da aleatoriedade da coleta de dados, entre outros.

TABELA 4. Percentual de área de cada Unidade Experimental (UE) coberta por estrato superior, obtido através de avaliação a campo (%T - campo) e por classificação supervisionada (%T - imagem) nos distintos tratamentos de nível de oferta de forragem. Eldorado do Sul, Brasil, 2019.

UE	Tratamento	Nº de avaliações	%T - campo	DP	%T - imagem
3A	8%	17	29	±5	31
7A	8%	17	31	±8	37
1B	12%	17	35	±5	40
5A	12%	17	38	±3	50
6B	16%	17	40	±3	52
4A	16%	16	50	±7	50

Como estratégia para melhor entendimento dos resultados da classificação, pode-se observar, nas Figuras 17 e 18, a ampliação de algumas áreas em que houve facilidades e dificuldades no processo de classificação. Para as duas UEs (5A e 6B) em que houve diferenças maiores em relação aos dados de campo, é possível verificar algumas áreas em que o classificador diferenciou bem as classes de estrato superior e estrato inferior (Figura 17). Nestes casos, houve êxito na classificação, dada às evidentes diferenças espectrais entre as classes em questão, o que mesmo visualmente é percebido. Especialmente na Figura 6B, as touceiras se apresentam com contornos definidos e com um contraste de cores evidente em relação ao estrato inferior.

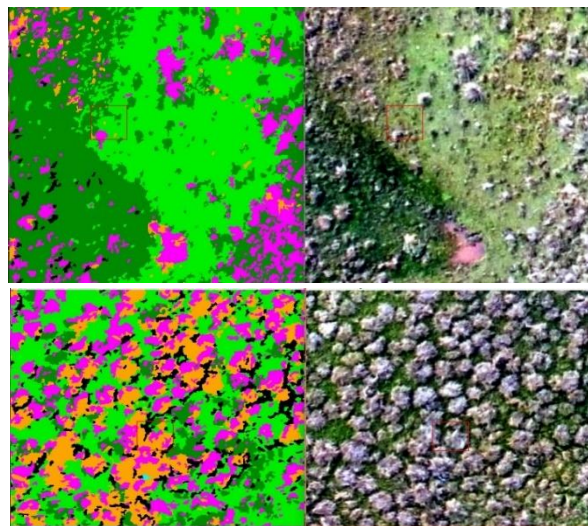


FIGURA 17. Detalhes dos mapas classificados nas UE 5A (a) e 6B (b). Casos em que o algoritmo classificou adequadamente as diferentes classes. À esquerda está a imagem classificada e à direita a imagem de falsa cor. Eldorado do Sul, Brasil, 2019.

Já na Figura 18 está apresentada um detalhado resultado da classificação para as mesmas EU (5A e 6B), mas agora em áreas em que se percebe problemas na classificação. Nestes dois casos, a complexidade da separação das classes de estrato inferior e estrato superior foi maior e o algoritmo classificou algumas áreas de estrato inferior como estrato

superior. Este tipo de erro trouxe problemas para o dimensionamento da área coberta por estrato superior.

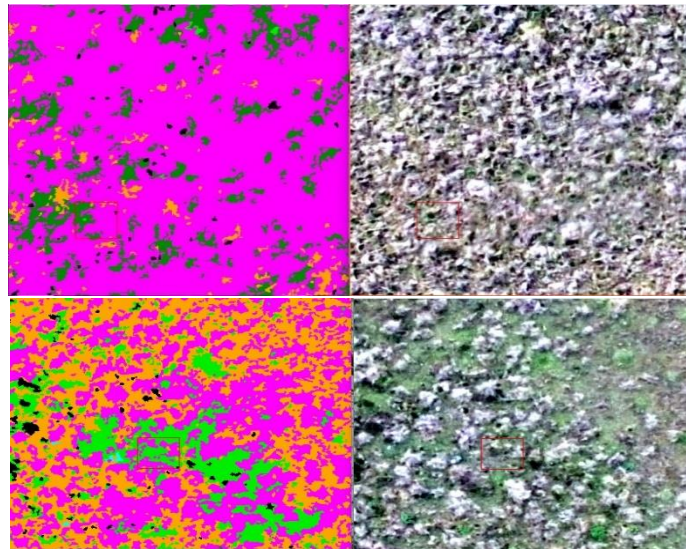


FIGURA 18. Detalhes dos mapas classificados nas UE 5A (a) e 6B (b). Casos em que o algoritmo não conseguiu classificar adequadamente as diferentes classes. À esquerda está a imagem classificada e à direita a imagem de falsa cor. Eldorado do Sul, Brasil, 2019.

5.4 Conclusões

As pastagens naturais são constituídas por um número grande de espécies vegetais compondo os estratos superior e inferior, cuja proporção varia com o nível de forragem ofertada aos animais. Esta diversidade no arranjo de espécies faz com que o padrão espectral do conjunto seja de complexa interpretação, dada a dependência do tipo e proporção de ocorrência das espécies em cada um dos estratos.

Apesar disto, com os dados coletados por uma câmera digital, a bordo de um drone, nas bandas do infravermelho, verde e azul, e, utilizando os classificadores SVM e RF, é possível diferenciar os grupos vegetais que compõem os estratos inferior e superior.

Estas características conferem aos dados espectrais a possibilidade de indicar a qualidade do pasto, com metodologia objetiva, de baixo custo e de fácil implementação, podendo ser utilizado de forma complementar às metodologias já consagradas.

No entanto, é importante considerar as especificidades dos ambientes para que os classificadores possam diminuir o grau de generalização ao mesmo tempo que melhorem o desempenho.

5.5 Referências Bibliográficas

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

- BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da estação experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: UFRGS, p. 77. 2012.
- BOS, D. **Grasing in coastal grasslands: brent geese and facilitation by herbivory**. 2002. 224 f. Tese (Doutorado) – Groningen University, Groningen, 2002.
- BREMM, C. et al. Foraging behaviour of beef heifers and ewes in natural grasslands with distinct proportion of tussocks. **Applied Animal Behaviour Science**. v. 141, p. 108-116, 2012.
- CARVALHO, P. C. F. et al. Defoliation process by ewes of reproductive compared to vegetative swards. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM THE NUTRITION OF HERBIVORES, 5, 1999, San Antônio, USA. [**Proceedings**]. San Antônio, 1999.
- CARVALHO, P. C. F. et al. Importância da estrutura da pastagem na ingestão e seleção de dietas pelo animal em pastejo. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 38., 2001, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba, 2001. v. 1, p. 853-871.
- CALOU, V. B. C. Uso de algoritmos de classificação para identificação de sigatoka amarela através de imagens de VANT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19, 2019, Santos. **Anais**. Santos, 2019. p. 1472-1475.
- KUHN, J.; BREMM, C. Qualidade do campo nativo In: NATIVÃO 30 anos de pesquisa em campo nativo. Porto alegre, 2017. p. 21-22. (Boletim Técnico, v. 1).
- PINTO, C. E.; WALLAU, M.; BOLDRINI, I. I. Estrutura da vegetação e composição florística In: NATIVÃO 30 anos de pesquisa em campo nativo. Porto alegre, 2017. p. 16-20. (Boletim Técnico, v. 1).
- LU, B.; HE, Y. Species classifications using unmanned aerial vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. **ISPRS Journal of photogrammetric and remote sensing**. v. 128, p. 73-85, 2017.
- MACHADO, I.R.; GIASSON, E. **Mapa de solos da Estação Experimental Agronômica da UFRGS**. 2016.
- MELLO, O. et al. Levantamento de uma série de solos do Centro Agronômico. **Revista da Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS**, Porto Alegre, v.8, n.1/4, p.7-155, 1966.
- MOTT, G.O.; LUCAS, H.L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRES, 6., 1952, Pennsylvania. **Proceedings...** Pennsylvania: State College Press, 1952. p.1380-1395.
- OOM, S. P. et al. Spatial Interactions models: from human geography to plant-herbivore interactions. **Oikos**, Copenhagen, v. 98, p. 65-74, 2002.
- OVERBECK, G. E. et al. Fisionomia dos campos. In: PILLAR, V.P.; LANGE, O. (Org.). **Os campos do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. p.31-41.
- PINTO, C. E.; WALLAU, M.; BOLDRINI, I. I. Estrutura da vegetação e composição florística In: NATIVÃO 30 anos de pesquisa em campo nativo. Porto alegre, 2017. P. 16-20. (Boletim Técnico, v. 1).
- TETILA, E. C. et al. Identification of soybeen foliar diseases using unmanned aerial vehicle images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter**, New York, v. 14, n. 12, p. 2190-2194, 2017.

ZANOTTA, D. C.; FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M. **Processamento de imagens de satélite**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 319 p.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo contribuiu para evidenciar a complexidade que é o estudo de pastagens naturais. É um sistema formado por diversas espécies vegetais, com diferentes ciclos de desenvolvimento e cujo padrão espectral é ainda pouco estudado. Além disso, as pastagens naturais sofrem a sistemática interferência na comunidade vegetal pelo pastejo dos bovinos, cuja lotação é variável de acordo com as opções de manejo do pecuarista. Soma-se ainda, as variações de biomassa associadas às condições meteorológicas, também com grande variabilidade ao longo do ano e entre anos. Estes fatores, aliados a outros não abordados no presente estudo, explicitam a complexidade da definição da quantidade e qualidade da pastagem natural ofertada aos animais. Este trabalho buscou aprofundar o entendimento a respeito da sazonalidade das pastagens naturais do bioma Pampa quando submetidas a diferentes ofertas de forragem utilizando, para isto, indicadores espectrais da quantidade e da qualidade das mesmas.

Apesar desta complexidade, o estudo evidenciou a contribuição que os sensores remotos, orbitais e aerotransportados utilizados podem trazer na medida em que são capazes de gerar informações úteis para o monitoramento das pastagens naturais do bioma Pampa. Monitoramento este importante quando se trata de um bioma com tamanha importância ambiental, econômica e cultural, mas implementado ainda de forma marginal frente as reais potencialidades.

As mais importantes contribuições deste estudo se referem ao teste de ferramentas que podem auxiliar no manejo das pastagens naturais. Os índices espectrais avaliados são capazes de detectar diferenças espectrais entre as distintas pressões de pastejo. Os índices espectrais detectam diferenças sazonais nas pastagens naturais, gerando informações sobre o ciclo de desenvolvimento das espécies vegetais que o compõem. Os índices espectrais são correlacionados, apesar de apresentarem baixos coeficientes de correlação, com as variáveis de estrutura do pasto. Também, os classificadores SVM e RF foram capazes de diferenciar os grupos vegetais que compõem os estratos inferior e superior, em grande parte da área analisada, sendo possível incluir este tipo de análise de forma complementar às análises já realizadas para percentual de touceiras, em pastagens naturais. Salienta-se que o percentual

de touceiras é uma variável importante para definir a qualidade da pastagem e para o desempenho animal.

Este trabalho dá subsídios a estudos futuros com pastagens naturais, como por exemplo aos estudos com modelagem em pastagens naturais, uma das linhas de pesquisas desenvolvidas no experimento, onde este estudo foi desenvolvido.