

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Elisiane Alba

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS DOSSÉIS E ESTIMATIVA DE
VARIÁVEL BIOFÍSICA EM PLANTIOS DE *Eucalyptus grandis* e
Pinus elliottii A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT 8/OLI**

Santa Maria, RS
2016

Elisiane Alba

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS DOSSÉIS E ESTIMATIVA DE VARIÁVEL
BIOFÍSICA EM PLANTIOS DE *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* A PARTIR DE
IMAGENS LANDSAT 8/OLI**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr^o. Rudiney Soares Pereira

Santa Maria, RS

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Alba, Elisiane

Caracterização espectral dos dosséis e estimativa de variável biofísica em plantios de *Eucalyptus grandis* e *P. elliotii* a partir de imagens Landsat 8/OLI / Elisiane Alba.-2016.

131 p.; 30cm

Orientador: Rudiney Soares Pereira

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2016

1. Reflectância 2. Análise de regressão 3. Volume estimado 4. Índices de vegetação I. Soares Pereira, Rudiney II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Elisiane Alba. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: elisianealba@gmail.com

Elisiane Alba

**CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS DOSSÉIS E ESTIMATIVA DE
VARIÁVEL BIOFÍSICA EM PLANTIOS DE *Eucalyptus grandis* e *Pinus
elliottii* A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT 8/OLI**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Aprovado em 03 de fevereiro de 2016:



Rudiney Soares Pereira, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Francisco Henrique de Oliveira, PhD. (UDESC)



Liane de Souza Weber, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, onde busco força e conforto nos momentos difíceis, e agradeço todas as conquistas;

À minha família, especialmente meus pais pelo apoio afetivo e incondicional que sempre dedicaram a mim, assim como os ensinamentos e incentivos para a busca de maior conhecimento e aprimoramento pessoal;

Ao André que muito contribuiu à minha formação, desde a graduação, dedicando grandes esforços para minha realização pessoal e profissional, sempre apoiando e confortando-me nos momentos difíceis. Obrigada pelo companheirismo, amor, carinho e amizade;

Ao meu orientador, Prof^o Dr. Rudiney Sorares Pereira pela oportunidade, confiança e prestimosos conselhos, o qual tive a oportunidade de conhecer, passando a ganhar o meu respeito e admiração como profissional e ser humano;

Aos meus amigos e colegas do Laboratório do Sensoriamento Remoto - LABSERE, em especial ao Emanuel Araújo, Eliziane Mello, Juliana Tramontina, Juliana Marchesan, Letícia Pedrali, Tiago L. Badin e Cristina Tabarelli. Indubitavelmente contribuíram muito para minha formação, nos quais sempre encontrei apoio e amizade;

A Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e seus docentes pela oportunidade de ampliar o conhecimento;

À empresa TREFLOR pela concessão da área para a realização desta pesquisa, em especial ao Engenheiro Florestal Luiz Rafael Delgado Barcelos pelos ensinamentos práticos e embasamento histórico da área de estudo, assim como o auxílio prestado à logística da coleta dos dados a campo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa disponibilizada;

Enfim, à todas as pessoas que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e não estão citados nominalmente.

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS DOSSÉIS E ESTIMATIVA DE VARIÁVEL BIOFÍSICA EM PLANTIOS DE *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* A PARTIR DE IMAGENS LANDSAT 8/OLI

AUTORA: Elisiane Alba

ORIENTADOR: Rudiney Soares Pereira

A superfície ocupada por florestas plantadas tem aumentado significativamente no território nacional, especialmente com os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Contudo, os meios de determinação das variáveis dendrométricas a campo são onerosos, requer de tempo e abrangem pequenas áreas. Assim, os produtos orbitais aplicados na estimativa das variáveis biofísicas constituem-se de uma importante fonte de dados, os quais facilitam o processo de aquisição de informações dos dosséis, sendo útil, especialmente, no planejamento visando a otimização da produtividade. Desse modo, esse estudo tem por objetivo avaliar a potencialidade das imagens do satélite Landsat 8 na diferenciação do estágio de crescimento e determinação da variável biofísica de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. Utilizou-se a cena 221-083 do satélite Landsat 8/OLI do dia 30 de agosto de 2013, sendo essa convertida para reflectância bidirecional de superfície a partir da calibração radiométrica e, posteriormente gerados os índices de vegetação ARVI, DVI, GNDVI, MVI, NDVI, SAVI₂₅, SAVI₅₀ e SR. O comportamento espectral dos povoamentos com idades distintas foi estabelecido com base na reflectância das bandas do vermelho e infravermelho próximo. A reflectância das bandas e índices de vegetação foi relacionada com o volume florestal, analisando a sua correlação e o ajuste dos dados à modelos de regressão, conduzindo a seleção de variáveis por meio do método *Stepwise*. A imagem Landsat 8/OLI mostrou-se sensível às variações das características dos indivíduos em função das diferentes fases de crescimento dos povoamentos florestais, sendo que para *E. grandis* aos 4, 18 e 23 anos, o aumento da idade ocasionou a redução da reflectância na banda B5 e aumento na banda do vermelho. No entanto, em povoamentos de *P. elliottii* observou-se que o aumento da idade propiciou um aumento da reflectância na banda B5 e redução na banda do vermelho. A análise de correlação entre os dados espectrais e o volume florestal de *E. grandis* demonstrou que o índice SAVI_{L=0,50} apresentou melhor correlação com variável florestal em ambas as idades. Para povoamentos de *P. elliottii* a banda B5 demonstrou maior correlação com o volume aos 9 anos de idade, porém aos 10 anos de idades, o índice DVI apresentou maior correlação com a variável florestal. A análise de regressão para *E. grandis* expôs os modelos de melhor ajuste, de modo que aos 4 e 18 anos, a equação contendo o índice SAVI explicou 76% e 68% da variabilidade dos dados, respectivamente. Aos 23 anos, o modelo composto pelo índice SAVI e a banda B7 obteve R²_{aj} de 0,67. Para *P. elliotti* o melhor modelo aos 9 anos de idade explicou 74% da variabilidade dos dados, sendo esse composto pela banda B5, já aos 10 anos o modelo englobou 73% da variabilidade, sendo esse composto pelo índice DVI e a banda B7. Desse modo, os dados Landsat 8/OLI podem ser utilizados no planejamento florestal, auxiliando em inventários florestais, bem como no conhecimento das fases de crescimento dos indivíduos e na identificação de espécies florestais.

Palavras-chave: Reflectância. Análise de regressão. Volume estimado. Índices de vegetação.

ABSTRACT

SPECTRAL CHARACTERIZATION OF CANOPIES AND ESTIMATION OF BIOPHYSICS VARIABLE IN PLANTATIONS of *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* FROM LANDSAT 8/OLI IMAGES

AUTHOR: Elisiane Alba

ADVISER: Rudiney Soares Pereira

The area occupied by planted forests has increased significantly in the country, especially with *Eucalyptus* and *Pinus* genus. However, the means of determining of dendrometric variables the field are costly, require time and covers small areas. Thus, the orbital products applied in estimating the biophysical variables constitute an important source of data, which facilitate the process of acquiring information of the canopies, being useful, especially, in the planning in order to optimize productivity. This manner, this study aims evaluate the potential of the Landsat 8 satellite images in the differentiation of stage of growth and determining the biophysical variable of *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. We used the 221-083 scene of Landsat 8/OLI satellite of the day 30th August 2013, being this converted to surface bidirectional reflectance from the radiometric calibration and, subsequently generated the ARVI vegetation indices, NDVI, NDVI, MVI, NDVI, $SAVI_{L=0.25}$ $SAVI_{L=0.50}$ and SR. The spectral behavior of the stands with different ages was established based on the reflectance of the red and near infrared bands. The reflectance of the bands and vegetation indexes was related to the forest volume, analyzing their correlation and adjustment of the data to the regression models, leading to selection of variables through Stepwise method. The Landsat 8 images are sensitive the variations of the characteristics of individuals according to the different growth stages of the forest stands, wherein for *E. grandis* to 4, 18 and 23 years, the increasing age caused reduction in reflectance in the NIR band and increased in the band Red. However, in stands of *P. elliottii* it was observed that increasing age led to an increased reflectance in the NIR band and reduction in red band. Correlation analysis between the spectral data and the forest volume of *E. grandis* showed that $SAVI_{L=0.50}$ index showed better correlation with forest variable at both ages. The stands of *P. elliottii* the B5 band showed higher correlation with the volume to 9 years old, however at 10 years of age, the DVI index showed the highest correlation with the forest variable. Regression analysis for *E. grandis* has exposed the models of best fit, so that at 4 and 18, the equation containing the SAVI index explained 76% and 68% of the variability of the data. At 23 years, the composite model of the SAVI index and B7 band obtained R^2_{aj} of 0.67. For *P. elliottii* the best model to 9 years of age explained 74% of data variability, being this composed of the DVI index and B7 band. Thus, the Landsat 8 / OLI data can be used in forest planning, assisting in forest inventory, as well as knowledge of the individual phases of growth and the identification of forest species.

Keywords: Reflectance. Regression analysis. Estimated volume. Vegetation indexes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área ocupada pelas principais espécies florestais para fins comerciais no estado do Rio Grande do Sul	22
Figura 2 - Reflectância espectral e as características da folha vegetal verde sadia para o intervalo de comprimento de onda entre 0,4 e 2,6 μm	28
Figura 3 - Comportamento espectral de coníferas e folhosas	30
Figura 4 - Dossel hipotético composto apenas de folhas no sentido horizontal	31
Figura 5 - Distribuição espectral do fluxo radiante proveniente do sol em três diferentes superfícies	42
Figura 6 - Fluxograma da metodologia aplicada no estudo.....	49
Figura 7 - Localização da área de estudo no município de Rio Grande – RS	50
Figura 8 - Fotografia aérea de povoamentos de <i>P. elliotii</i> situados próximos às áreas arenosas (Margem inferior direita).....	52
Figura 9 - Representação dos talhões e unidades amostrais inventariadas	54
Figura 10 - Resposta espectral dos povoamentos de <i>E. grandis</i> aos 4, 18 e 23 anos em relação as bandas B4 e B5	61
Figura 11 - Resposta espectral dos povoamentos de <i>P. elliotii</i> aos 9 e 10 anos de acordo com as bandas B5 e B4	64
Figura 12 - Reflectância média das unidades amostrais dos plantios de <i>E. grandis</i> e <i>P. elliotii</i> nas bandas espectrais do satélite Landsat 8	66
Figura 13 - Representação do interior dos talhões de <i>E. grandis</i> com crescimento dissimilar dos indivíduos amostrados.....	72
Figura 14 - Ilustração do dossel dos povoamentos de <i>E. grandis</i>	73
Figura 15 - Exemplar de <i>E. grandis</i> aos 23 anos tombado em função dos ventos fortes	74
Figura 16 - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e as variáveis espectrais de <i>E. grandis</i> aos 4 anos de idade.....	76
Figura 17 - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e as bandas multiespectrais de <i>E. grandis</i> aos 18 anos de idade	79
Figura 18 - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e as bandas multiespectrais de <i>E. grandis</i> aos 23 anos de idade	82
Figura 19 - Gráficos de dispersão no ajuste da equação linear em povoamentos de <i>P. elliotii</i> aos 9 anos	88
Figura 20 - Gráficos de dispersão no ajuste da equação linear em povoamentos de <i>P. elliotii</i> aos 10 anos	91
Figura 21 - Distribuição dos resíduos referentes aos modelos de regressão linear selecionados na modelagem para povoamentos de <i>E. grandis</i> aos 4 (a), 18 (b) e 23 anos (c)	99
Figura 22 - Relação entre o volume de madeira estimado e o volume de madeira observado aos 4, 18 e 23 anos	101
Figura 23 - Distribuição dos resíduos referentes aos modelos de regressão linear selecionados na modelagem para povoamentos de <i>P. elliotii</i> aos 9 (a) e 10 anos (b)	106
Figura 24 - Relação entre o volume de madeira estimado e o volume de madeira observado aos 9 (a) e 10 anos (b)	107
Figura 25 - Precipitação pluvial registrada diariamente na estação de monitoramento Granja Santa Maria, localizada no município de Rio Grande	108
Figura 26 - Distribuição espacial do volume de madeira estocado em povoamentos de <i>E. grandis</i> gerado a partir da análise de regressão linear	111

Figura 27 - Distribuição espacial do volume de madeira estocado em povoamentos de <i>P. elliotii</i>	112
Figura 28 - Distribuição espacial do volume de madeira em classes de qualidade para povoamentos de <i>E. grandis</i>	114
Figura 29 - Distribuição espacial do volume de madeira em classes de qualidade para <i>P. elliotii</i>	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Satélites do Programa Landsat.	33
Tabela 2 - Características espectrais, espaciais e temporais do satélite Landsat 8.	35
Tabela 3 - Número dos UA inventariadas em povoamentos florestais.	53
Tabela 4 - Informações inseridas no código MODTRAN necessárias a correção atmosférica da imagem Landsat 8/OLI.	56
Tabela 5 - Índices de Vegetação analisados no presente estudo.	57
Tabela 6 - Comportamento da resposta espectral nas bandas B5 e B4.	63
Tabela 7 - Comportamento da resposta espectral nas bandas B5 e B4.	65
Tabela 8 - Estatística descritiva da resposta espectral das bandas e índices de vegetação em povoamentos de <i>E. grandis</i>	68
Tabela 9 - Análise de correlação linear de Pearson entre o volume e a reflectância das bandas espectrais e índices de vegetação dos povoamentos de <i>E. grandis</i>	69
Tabela 10 - Análise descritiva da resposta espectral das bandas e índices de vegetação em povoamentos de <i>P. elliotii</i>	85
Tabela 11 - Análise de correlação de Pearson entre o volume e a reflectância das bandas espectrais e índices de vegetação dos povoamentos de <i>P. elliotii</i>	86
Tabela 12 - Modelos de melhor ajuste para povoamentos de <i>E. grandis</i> aos 4, 18 e 23 anos.	94
Tabela 13 - Análise das condicionantes de regressão para <i>E. grandis</i> aos 4, 18 e 23 anos.	97
Tabela 14 - Modelos de melhor ajuste para povoamentos de <i>P. elliotii</i> aos 9 e 10 anos.	103
Tabela 15 - Análise das condicionantes de regressão para <i>P. elliotii</i> aos 9 e 10 anos.	105
Tabela 16 - Modelos selecionados para estimativa do volume de madeira de <i>E. grandis</i> e <i>P. elliotii</i>	109

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	26
Equação 2.....	27
Equação 3.....	37
Equação 4.....	37
Equação 5.....	37
Equação 6.....	38
Equação 7.....	38
Equação 8.....	39
Equação 9.....	39
Equação 10.....	41
Equação 11.....	45
Equação 12.....	45
Equação 13.....	47
Equação 14.....	47
Equação 15.....	48
Equação 16.....	48
Equação 17.....	55
Equação 18.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF	Associação de Brasileira de Floresta Plantada
DAP	Diâmetro a altura do peito
DVI	<i>Difference Vegetation Index</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
ERTS	<i>Earth Resources Technology Satellite</i>
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
GNDVI	<i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IVM	Infravermelho médio
IVP	Infravermelho próximo
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
MSS	<i>Multispectral Scanner</i>
MVI	<i>Moisture Vegetation Index</i>
NASA	<i>National Aerospace and Space Administration</i>
ND	Níveis digitais
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
Pixel	<i>Picture element</i>
RBV	<i>Return Beam Vidicom</i>
REM	Radiação Eletromagnética
SAVI	<i>Soil adjusted vegetation index</i>
SPOT	<i>Système Pour l'Observation de la Terre</i>
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SR	<i>Simple Ratio Vegetation Index</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
UA	Unidade amostral
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
XML	<i>eXtensible Markup Language</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	ESPÉCIES FLORESTAIS	21
2.1.1	<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden	22
2.1.2	<i>Pinus elliottii</i> Engelm.	23
2.2	SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À ESTUDOS FLORESTAIS	24
2.2.1	Interação da vegetação com a energia eletromagnética	26
2.2.2	Comportamento espectral do dossel	30
2.3	SISTEMAS ORBITAIS: PROGRAMA LANDSAT	32
2.4	ÍNDICES DE VEGETAÇÃO	35
2.5	CORREÇÕES RADIOMÉTRICAS	39
2.5.1	Conversão de ND para valores físicos: Reflectância de superfície	40
2.5.2	Correção atmosférica	41
2.6	ANÁLISE DE REGRESSÃO	43
2.6.1	Regressão Linear	44
2.6.2	Modelagem dos parâmetros dendrométricos	46
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	50
3.2	MATERIAIS	52
3.2.1	Equipamentos e sistemas de processamento	52
3.2.2	Produtos orbitais e materiais de campo	52
3.3	MÉTODOS	53
3.3.1	Dados de campo	53
3.3.2	Processamento da imagem	55
3.3.2.1	<i>Correção radiométrica</i>	55
3.3.2.2	<i>Índices de vegetação</i>	57
3.3.3	Caracterização espectral dos dosséis	58
3.3.4	Análise da relação entre a variável biofísica e as variáveis espectrais	58
3.3.5	Análise de regressão	59
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS DOSSÉIS EM FUNÇÃO DA IDADE DOS POVOAMENTOS	61
4.2	RELAÇÃO ENTRE O VOLUME FLORESTAL E AS VARIÁVEIS ESPECTRAIS	67
4.2.1	Povoamentos de <i>E. grandis</i>	67

4.2.2	Povoamentos de <i>P. elliotii</i>	84
4.3	ANÁLISE DE REGRESSÃO	94
4.3.1	Povoamentos de <i>E. grandis</i>	94
4.3.2	Povoamentos de <i>P. elliotii</i>	103
4.4	ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL BIOFÍSICA	108
5.	CONCLUSÃO	117
	RECOMENDAÇÕES FINAIS	119
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos de origem florestal vem aumentando consideravelmente nas últimas décadas fazendo com que a silvicultura ocupe grandes extensões do território nacional. Os gêneros de *Pinus* e *Eucalyptus* são os principais responsáveis por abastecer esse mercado, para os quais, destinam-se pesquisas no desenvolvimento de variedades com elevada produtividade, aliado a um rápido crescimento, resistência a patógenos ou ainda, destinadas a fins específicos como celulose, serraria ou para o setor energético.

Segundo o boletim informativo Ibá (2015), as florestas plantadas no Brasil ocuparam uma área de 7,74 milhões de hectares em 2014, correspondendo a 0,9% do território nacional. Dentre esse total, 71,9% estão ocupados com espécies do gênero *Eucalyptus*, 20,5% com *Pinus* e 7,6% com as demais espécies florestais cultiváveis. A produtividade dos povoamentos brasileiros se mantém elevada, de modo que os plantios de eucalipto atingem 39 m³/ha.ano e a produtividade de pinus é de 31 m³/ha.ano.

A observação regular e precisa do estado da floresta, incluindo o monitoramento dos possíveis danos causados por deficiências, estresse hídrico ou doenças, facilitam o desenvolvimento de estratégias e manejo adequado para cada situação (TILLACK et al., 2014), garantindo a eficiência da produtividade ao longo de seu desenvolvimento. O conhecimento das propriedades biofísicas de uma floresta, assim como o seu padrão de crescimento é fundamental em ações e intervenções apropriadas, subsidiando as estratégias de manejo e o planejamento da exploração.

Entretanto, a avaliação das variáveis dendrométricas a campo demanda de altos investimentos, tempo e mão de obra, uma vez que os povoamentos florestais ocupam grandes extensões e por vezes, em difícil acesso. Com o propósito de incrementar os dados obtidos a campo, as técnicas e métodos de sensoriamento remoto são aplicados ao estudo dos plantios comerciais, obtendo estimativas dos parâmetros biofísicos, de forma a complementar os dados de inventário florestal, dispensando periódicas e onerosas avaliações a campo ou ainda, auxiliando no planejamento e alocação das unidades amostrais.

A simulação das variáveis biofísicas por meio de imagens orbitais apresenta-se como um meio ágil de definição do potencial produtivo, sendo possível concentrar recursos financeiros e técnicos em áreas deficitárias e/ou de maior interesse,

contribuindo para a tomada de decisão em tempo hábil, o que reduz as possíveis perdas na produtividade dos povoamentos. A definição da localização das áreas produtivas é fundamental para a otimização da rentabilidade da matéria-prima com a redução dos custos envolvidos na produção.

A associação dos dados de sensoriamento remoto com objetos na superfície terrestre engloba o processo de interação da radiação eletromagnética com o alvo em estudo (PONZONI et al., 2015). Essa relação, normalmente, é expressa pelos valores de reflectância, a qual consiste em uma variável física que permite relacionar os dados espectrais com os parâmetros situados a campo (PONZONI et al., 2012).

No entanto, Jensen (2009) afirma que os valores físicos da imagem são influenciados por fatores intrínsecos do alvo, fatores geométricos de iluminação e visada, assim como os componentes presentes na atmosfera (gases, poluição, vapor de água, dentre outros). Esse conjunto de fatores provocam a atenuação dos valores de reflectância, exigindo a realização de correções para minimizar esses efeitos, quando o objetivo é a caracterização espectral dos objetos. A reflectância de superfície, assim chamada a variável física resultante do processo de correção dos efeitos atmosféricos, pode ser utilizada para detectar possíveis alterações nas propriedades biofísicas dos povoamentos florestais decorrente, dentre outros fatores, do crescimento dos indivíduos, o qual pode alterar a quantidade da radiação armazenado pelo sensor, permitindo modelar essa relação (BERRA, 2013).

A modelagem dos parâmetros estruturais da floresta por meio de métodos indiretos baseando-se na relação estabelecida entre os valores de reflectância de superfície e as variáveis mensuradas a campo, inclui o uso de análises estatísticas. Esse processo apresenta-se como forma de definir a intensidade dessa relação. Do mesmo modo, utiliza-se modelos lineares e não lineares para descrever a relação das variáveis, sendo que esses, devem responder ao máximo a variabilidade existente a campo.

Nesse sentido, a resposta espectral obtida por meio de produtos da série Landsat representa uma fonte de dados de fácil aquisição, gratuita e eficiente para a gestão florestal. Inúmeras pesquisas relacionaram com êxito as imagens multiespectrais com as características dos dosséis utilizando os produtos dos satélites Landsat 5/TM e Landsat 7/ETM+ (ARDÖ, 1992; BERRA, 2013; COSTA et al. 2015; FERRAZ et al., 2014; PONZONI et al., 2015).

No entanto, o satélite Landsat 7/ETM+ deixou de fornecer dados da superfície em 2007, já o Landsat 5/TM encerrou suas atividades em junho de 2011, deixando uma lacuna no fornecimento de produtos dessa série até 2013, quando do lançamento do seu sucessor, o satélite Landsat 8. Esse novo satélite teve seu lançamento em 11 de fevereiro de 2013, porém passou a gerar dados da superfície terrestre para uso da comunidade mundial em abril do mesmo ano.

As imagens Landsat 8 contemplam melhorias e modificações em relação aos seus antecessores, sendo que uma das principais alterações consiste no aumento da resolução radiométrica, passando de 8 para 16 bits, o que interferiu na escala de distribuição dos níveis de cinza. Essa mudança proporcionou a distribuição dos níveis de cinza em uma escala maior, relacionando-se diretamente com a capacidade de detectar as diferenças apresentadas pela vegetação. Outro avanço consiste no aumento do número de bandas espectrais, cobrindo maior número de faixas do espectro eletromagnético. O satélite Landsat 8 apresenta a bordo, dois sistemas sensores, o OLI contando com nove bandas espectrais e o TIRS com duas bandas espectrais destinadas a estudos de temperatura.

Contudo, estudos que avaliem os alcances e limitações do uso das imagens Landsat 8 na obtenção de estimativas das variáveis biofísicas em plantios comerciais são fundamentais, uma vez que o mesmo apresenta produtos com características diferenciadas. Tais informações justificam-se frente as necessidades enfrentadas pelos gestores de recursos florestais, vindo a contribuir para o desenvolvimento do setor, especialmente no que se refere a otimização da produtividade, uma vez que se constitui como importante ferramenta para o planejamento, aliando ainda, a produção com a sustentabilidade.

Neste sentido, o estudo tem por objetivo geral avaliar a potencialidade das imagens do satélite Landsat 8 sensor OLI em fornecer informações detalhadas sobre a estrutura dos povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*. Analisando assim, a resposta espectral desses plantios em diferentes idades, relacionando-a com o estágio de crescimento e o volume florestal estocado a campo.

Desse modo, para desenvolver esta pesquisa foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar o comportamento espectral dos dosséis de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* a partir da relação oriunda da resposta espectral das bandas do infravermelho próximo (B5) e vermelho (B4) com a idade dos povoamentos;

2. Examinar a correlação existente entre a variável biofísica (volume) e os índices de vegetação (ARVI, DVI, GNDVI, MVI, NDVI, SAVI_{L=0,25}, SAVI_{L=0,50}, SR) e bandas multiespectrais do satélite Landsat 8/OLI (B2, B3, B4, B5, B6 e B7);

3. Testar modelos de regressão linear simples e múltipla tendo como variável dependente o volume de madeira estocado (m³/ha) e a resposta espectral como variável independente;

4. Analisar o nível de detalhamento com que o volume pode ser estimado a partir de dados fornecidos pelas imagens Landsat 8/OLI;

5. Espacialização do volume florestal baseando-se em modelos matemáticos compostos pelas variáveis espectrais.

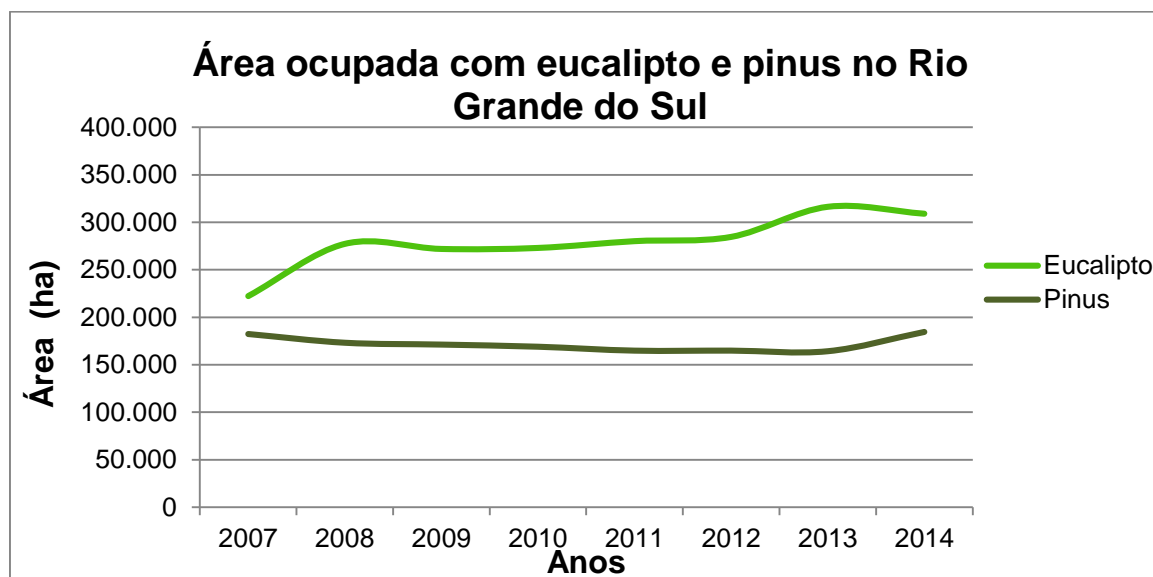
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ESPÉCIES FLORESTAIS

Os plantios florestais de espécies exóticas apresentaram grande expansão territorial a partir do final da década de 60 com a implantação da política de incentivos fiscais. Atualmente no Brasil, o setor de florestas plantadas ocupa lugar de destaque entre os diferentes segmentos da economia do país, relacionando-se com a geração de renda, arrecadação de tributos e programas sociais (ABRAF, 2013).

No Brasil, em 2014 a área ocupada por plantios dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* atingiu 7,15 milhões de hectares, apresentando um crescimento de 1,8% em relação ao indicador de 2013 (IBÁ, 2015). No estado do Rio Grande do Sul, em 2014 a área reflorestada por esses gêneros foi de 493.710 mil hectares, expondo uma retração de 7,32% na área ocupada por plantios de eucalipto em relação ao ano de 2013, porém identificou-se um crescimento de 20,4% na área ocupada por pinus no estado. Assim, povoamentos de eucalipto representam 62,6% e pinus 37,4% do total reflorestado no estado. Esses dados podem ser observados na Figura 1, a qual demonstra as séries históricas dessas espécies no período de 2007 a 2014 no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 1 – Área ocupada pelas principais espécies florestais para fins comerciais no estado do Rio Grande do Sul



Fonte: Adaptação de IBÁ (2015).

2.1.1 *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

O gênero *Eucalyptus* de acordo com Rizzini (1981), pertence à família botânica Myrtaceae, subfamília Leptospermoideae. Originário da Austrália, apresenta ampla distribuição em todos os continentes, compondo uma matéria-prima de uso múltiplo. Existem cerca de 720 espécies reconhecidas desse gênero, cobrindo aproximadamente 90% do território mundial, sendo que 250 delas são utilizadas para fins madeireiros (MARCHIORI, 1997).

De acordo com Berndt e Moreira (2005), em solos empobrecidos devido às diversas formas de cultivo agrícola desenvolvidas por longo período e corriqueiramente em áreas impróprias, encontram no reflorestamento desse gênero, uma alternativa eficiente para a sua recuperação. De maneira geral, as espécies de eucalipto apresentam rápido crescimento e baixa demanda de nutrientes para o seu desenvolvimento, destacando que algumas variedades são mais resistentes que outras a determinadas condições climáticas, edáficas ou hídricas.

Esse gênero foi introduzido no Brasil em meados do século XX, visando a produção de madeira para lenha, carvão e estruturas simples. Posteriormente, passou a fornecer matéria-prima para fabricação de celulose, chapas de partícula e por fim abastecer a indústria de MDF (NAHUZ, 1998). No Rio Grande do Sul, o cultivo de

Eucalyptus sp. ultrapassou o ciclo do extrativismo ao fornecer lenha para as ferrovias, agroindústrias, entre outros segmentos da economia, contribuindo de forma significativa na expansão econômica da região Sul (HASSE, 2006).

Neste contexto, o *Eucalyptus grandis* devido as suas características silviculturais e qualidade da madeira, associado a fácil adaptação, destaca-se no cenário mundial por ser uma das espécies do gênero mais cultivada. Stape (1998) enfatiza que o *E. grandis* é considerado uma espécie de grande plasticidade permitindo adaptação a diversas condições de solo e clima, o que favorece a sua expansão no território nacional.

No Brasil, devido ao clima tropical e grande extensão territorial, essa espécie possui adaptação em praticamente todas as regiões, com plantios em grande escala apresentando potencial silvicultural satisfatório (ROCHA, M., 2000). Apesar do *E. grandis* se estabelecer em lugar com recursos limitados, Schneider et al. (1998) definem que os tratamentos silviculturais e, em especial, a densidade populacional dos indivíduos são fatores importantes para a obtenção de uma boa produtividade desses povoamentos, indicando a necessidade de desbastes periódicos de acordo com as características inerentes a cada plantio.

Esta espécie consiste em árvores de porte elevado podendo chegar até 55 m de altura, com diâmetro a altura do peito de até 2 m, copa aberta e casca fibrosa clara-acinzentada na base do tronco e lisa na parte superior (MARCHIORI, 1997). A madeira é de fácil manuseio, uma vez que possui baixa densidade. Porém no Brasil, as madeiras são oriundas de indivíduos de rápido crescimento, em função do clima e condições edáficas, o que desencadeia problemas como empenamento, contração e rachaduras quando realizado o desdobro, já que a tensão é liberada. Entretanto, quando bem manejadas, estas plantações fornecem um produto de boa qualidade, destinando-se a fins mais nobres como a serraria e laminação.

2.1.2 *Pinus elliottii* Engelm.

O gênero *Pinus* pertence à família Pinacea, possuindo aproximadamente 90 espécies, o qual foi introduzido no Brasil no século XIX com a finalidade de ornamentação (DOSSA et al., 2002). Na década de 50, as espécies de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* começaram a ser introduzidas no país em escala comercial visando a

produção de madeira para suprir a demanda dessa matéria-prima, tão desejada à indústria moveleira e de celulose (BRACELPA, 2013).

Dossa et al. (2002) enfatizam que na década de 60, o governo estimulou o aquecimento do mercado por meio de investimentos na indústria de papel e celulose. Sendo assim, os povoamentos de pinus passaram a ocupar grandes áreas, com o intuito de suprir a demanda desse produto, empregados especialmente em substituição da madeira de araucária. De modo geral, esse gênero possui adaptação em solos geralmente ácidos e bem drenados, permitindo ocupar grandes áreas do território nacional, tornando-se assim, importantes no fornecimento de matéria-prima em substituição às madeiras de espécies nativas tão exploradas na colonização do país (KRONKA et al., 2005).

Por sua vez, a espécie *Pinus elliottii* Engelm destaca-se pela produção de matéria-prima na região sul e sudeste do país, apresentando qualidades inerentes como resistência a geada e altos rendimentos em volume, suportando fatores limitantes para a maioria das espécies florestais tais como alagamentos, solos rasos e arenosos (SHIMIZU, 2005). O mesmo autor define que a região de ocorrência natural do *P. elliottii* apresenta clima úmido, precipitação média anual oscilando entre 1.020 a 1.500 mm, com temperaturas médias anuais variando de 13 a 24°C, e crescimento em altitudes de até 800 metros. Em condições naturais podem atingir entre 20 a 40 m de altura e diâmetro à altura do peito de 60 a 90 cm (LAMPRECHT, 1990).

A madeira de *P. elliottii* abastece as indústrias na fabricação de compensados, chapas de fibras e a produção de celulose com fibras longas (EMBRAPA, 1988). Inicialmente, com o aquecimento econômico, ocorreu um aumento na produção de madeira, resultando no crescimento dos materiais serrados, o que cedeu espaço, posteriormente, à geração de produtos de baixo valor agregado como *pallets* e *blocks*.

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À ESTUDOS FLORESTAIS

A energia eletromagnética emitida pelo sol é essencial para a sobrevivência e desenvolvimento da vegetação. Essa interação é estudada por diversas áreas, incluindo o sensoriamento remoto, o qual se baseia em técnicas e processos que permitem obter remotamente informações detalhadas sobre a vegetação, assim como associações com os parâmetros mensuráveis a campo.

Juntamente com o avanço das técnicas e dados disponíveis ao sensoriamento remoto, originaram-se os métodos indiretos de estimativas dos parâmetros biofísicos da vegetação. Esses parâmetros podem ser obtidos por meio da análise da radiação eletromagnética (REM) interceptada e não interceptada pela vegetação (coleta a campo), ou ainda, por meio de imagens orbitais fazendo-se uso dos valores de radiância (SOUSA, 1997). As propriedades biofísicas da vegetação tais como abundância, quantificação e distribuição são alguns dos parâmetros ambientais passíveis de serem detectados remotamente com o uso de dados provenientes de instrumentos sensores.

Neste contexto, Sousa e Ponzoni (1998) enunciam que as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas para representar as características de reflectância da REM em áreas florestadas, destinam-se especialmente à determinação e quantificação de biomassa florestal, estudo das relações existentes com os povoamentos e os tradicionais mapeamentos da vegetação. Como o volume é a variável de maior interesse em povoamentos comerciais, estudos são desenvolvidos constantemente para a sua obtenção de forma eficiente a partir de dados coletados de instrumentos sensores.

Neste contexto, Srivastava et al. (1999) estudaram imagens do satélite IRS-1B na obtenção de estimativas de variáveis dendrométricas em povoamentos de *Shoera robusta*, as quais possibilitaram a criação de tabelas de volume. Da mesma forma, diversos autores realizaram estudos baseados em imagens do sensor Landsat para geração de modelos de estimativas do volume em povoamentos florestais (ARDÖ, 1992; BERRA, et al., 2011; BERRA, 2013; GOERGEN, 2014; ORUÉ, 2002). No entanto, Orué (2002) esclarece que dados provenientes do sensor TM nem sempre são capazes de responder às necessidades dos planejadores florestais, destacando-se problemas relacionados com as classes de inventário, as quais podem corresponder ou não às classes detectáveis remotamente.

Estudos desenvolvidos por CURRAN (1993) para determinar os fatores que controlam a radiância do dossel de plantações de coníferas, concluiu que as respostas dos povoamentos estão relacionadas principalmente com a estrutura dos talhões. Aliado a isso, apurou-se que a radiância está correlacionada com a idade do talhão, a densidade das árvores, o diâmetro médio e a altura média. Quando deseja-se identificar diferentes tipos de vegetação ou extrair informações biofísicas da mesma, a partir do sensoriamento remoto é interessante analisar as características temporais,

uma vez que existem épocas mais apropriadas que outras para obter resultados condizentes.

2.2.1 Interação da vegetação com a energia eletromagnética

Os instrumentos sensores a bordo de satélites são capazes de coletar e registrar as variações da REM refletida e emitida pelos objetos situados na superfície terrestre. Assim, o estudo dos recursos naturais por meio de dados oriundos do sensoriamento remoto envolve a aquisição e a análise dos mesmos, englobando inicialmente quatro fatores: a fonte de REM, a atmosfera, o alvo e o sensor (SOUSA, 1997).

A REM age como um transmissor entre o objeto observado e o sensor que coleta as informações, desse modo a energia interage com o alvo situado na superfície terrestre tendo como resultado o comportamento espectral característico detectado pelo sensor (KOUKAL, 2004). A REM apresenta também interação com os componentes presentes na atmosfera, os quais afetam a intensidade da radiação armazenada pelo sensor.

Entretanto, ao estudar a relação da REM refletida pela vegetação (folhas, plantas individuais ou dossel), torna-se necessário o conhecimento do processo de interação, o qual envolve os três fenômenos físicos: reflectância, transmitância e absorptância espectral (PONZONI, 2002). O resultado da interação da energia incidente com a vegetação é dependente das características físico-químicas do alvo, juntamente com o comprimento de onda.

Neste contexto, Jensen (2009) enuncia que a folha sadia se caracteriza pela interceptação do fluxo radiante incidente (ϕ) proveniente do sol ou oriundo da radiação difusa espalhada sobre a folha. Assim, a quantidade de fluxo radiante refletido (ϕ_r), a quantidade de fluxo radiante absorvido (ϕ_a) e a quantidade de fluxo radiante transmitido por meio da folha (ϕ_t) pode ser medido em função do balanço de energia (Equação 1). Já a normalização da inter-relação entre a energia incidente e suas frações está demonstrada na Equação 2 (MOREIRA, 2007).

$$\phi_{i\lambda} = \phi_{r\lambda} + \phi_{a\lambda} + \phi_{t\lambda} \quad (1)$$

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (2)$$

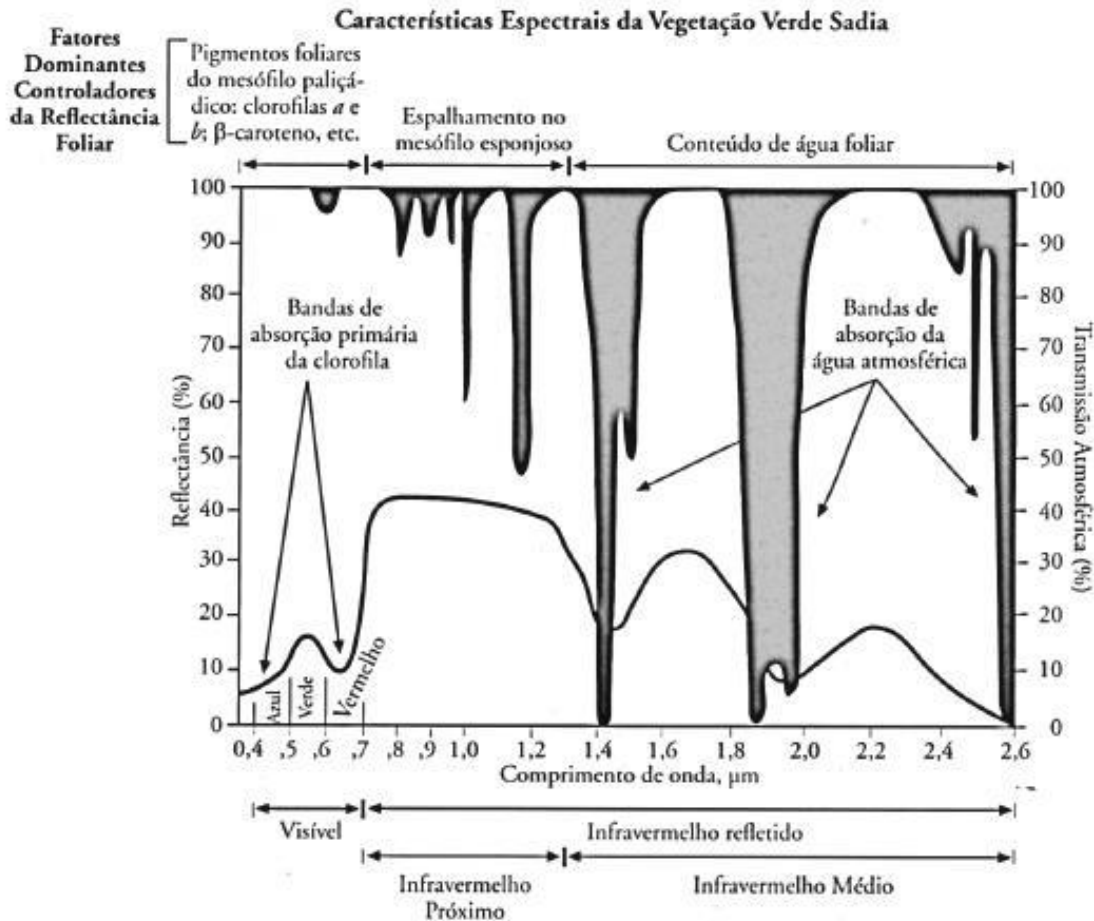
Dessa forma, ρ , α e τ passam a ser denominados como reflectância, absorptância e transmitância, respectivamente, definindo a partir de seus valores as propriedades radiométricas do alvo. As proporções dessas frações são variáveis de uma feição para outra, sendo influenciadas pelos tipos de materiais, condições e comprimento de onda (SOUSA, 1997).

Para o sensoriamento remoto, a energia refletida é a que apresenta maior importância, já que nessa faixa do espectro eletromagnético se dispõe da maior parte dos sensores orbitais e suborbitais com capacidade de armazenar informações da superfície terrestre (MOREIRA, 2007). Ponzoni et al. (2012) definem a reflectância como a porção da energia eletromagnética incidente sobre um objeto que é refletida pelo mesmo e armazenada pelo sensor.

A reflectância é expressa por meio da relação entre a quantidade de energia refletida e a energia incidente sobre a superfície das folhas ou dossel (JENSEN, 2009). Entretanto, o estudo de diferentes alvos na superfície terrestre exige conhecimento do examinador sobre o comportamento espectral dos alvos de interesse.

Neste aspecto, ao estudar a reflectância emitida pela vegetação, observa-se que as regiões do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio (μm) sofrem interferência de diversos fatores conforme sumarizado na Figura 2. Assim, uma folha verde sadia possui picos de reflexão nos comprimentos de onda do visível entre 0,4 – 0,72 μm , no infravermelho próximo entre 0,72 – 1,10 μm , e infravermelho médio entre 1,10 – 3,20 μm (PONZONI et al., 2012).

Figura 2- Reflectância espectral e as características da folha vegetal verde sadia para o intervalo de comprimento de onda entre 0,4 e 2,6 μm



Fonte: (JENSEN, 2009).

O comprimento de onda correspondente a maior reflectância da vegetação está entre 0,7 μm e 1,3 μm devido à interferência da estrutura celular (mesófilo). Entre 1,3 μm e 2,5 μm , a reflectância é determinada pelo conteúdo de água das folhas, havendo ainda pontos de máxima absorção de água em determinados comprimentos de onda, o que justifica o deslocamento das faixas espectrais dos sensores para regiões de menor interferência da atenuação atmosférica (NOVO, 2010).

De acordo com Jensen (2009), as moléculas de uma vegetação quando atingidas por uma onda de luz, refletem parte da energia ou ainda a absorvem, sendo esse comportamento associado aos comprimentos de onda luminosos específicos. Desse modo, ao analisar uma planta verde, observa-se que comprimentos de onda

na região do visível são absorvidos em função da presença de pigmentos para a produção de fotossíntese como clorofila, xantofila, carotenoides e antocianinas.

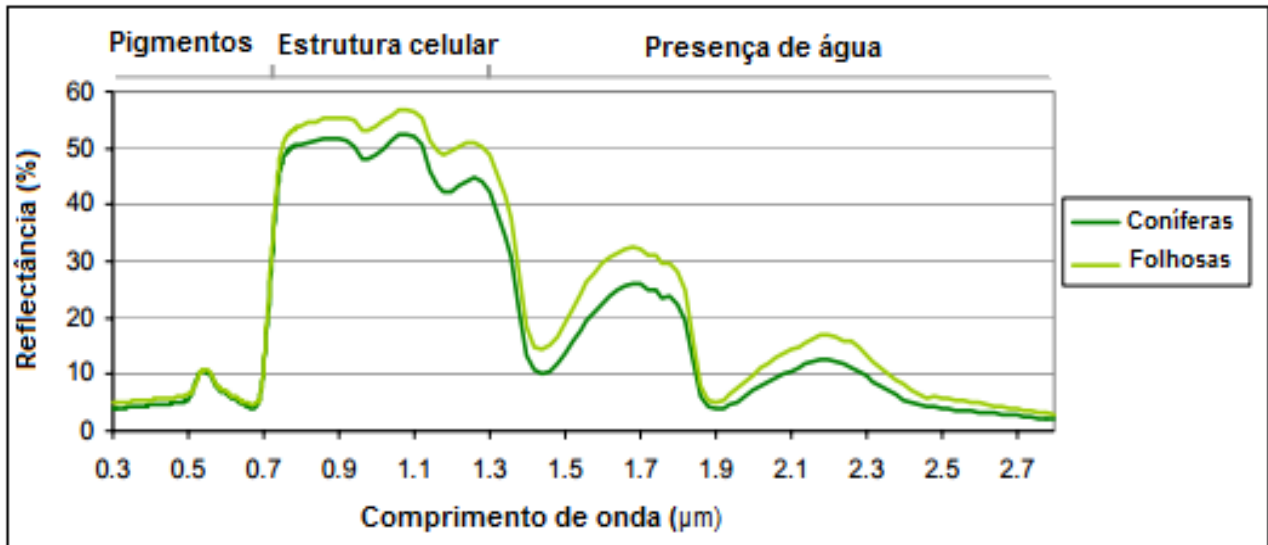
Entretanto, o comportamento da reflexão na região do visível de uma folha jovem é determinado especialmente pela presença de clorofila, desse modo, ocorre a absorção da energia radiante nas porções do azul e do vermelho, enquanto na região do verde o fenômeno predominante é a reflexão (GUYOT et al., 1989). Esta maior reflectância nessa região define a coloração verde das folhas saudas.

Para Swain e Davis (1978), existe uma relação inversamente proporcional entre a reflectância de uma folha e o grau de maturidade, uma vez que, com a senescência perde-se a clorofila, restando apenas carotenóides e xantofilas. Assim, com o aumento da idade, a reflectância da folha na região do verde diminui, havendo modificações na coloração da mesma, tornando-a amarelada e por vezes produzindo antocianina, a qual confere a aparência avermelhada à folha, explicada pela maior reflexão na região do vermelho. Na região do visível, destaca-se ainda o fato de que a reflectância das folhas se diferencia quando se estuda a face dorsal e ventral, de modo que a face dorsal apresenta maior reflectância, uma vez que possui maior concentração de pigmentos nos cloroplastos (PARDI LACRUZ, 1996).

Na região do infravermelho próximo, uma vegetação sadia é caracterizada pela alta reflectância e transmitância, e baixa absorptância quando comparada com a região do visível, devido à disposição da estrutura morfológica interna das folhas que é a maior controladora da reflectância na região do infravermelho próximo (HOFFER, 1978). Segundo Ponzoni (2002) quanto maior a presença de espaços na estrutura interna foliar, maior será a reflectância nessa região devido ao processo de espalhamento interno.

Nesse comprimento de onda, a maior parte da vegetação apresenta comportamento semelhante, refletindo aproximadamente 50% da energia incidente, sendo que 45 a 50% representam transmitância e menos de 5% absorptância (SWAIN e DAVIS, 1978). De acordo com Chuvieco (1990), a estrutura interna das folhas varia para cada espécie, assim esse fator possibilita a discriminação das plantas ao utilizar a região do infravermelho próximo, já que neste intervalo as mesmas apresentam comportamentos específicos de reflexão, absorção e transmissão. Corroborando com este estudo, a Figura 3 demonstra as curvas espectrais de coníferas e folhosas, evidenciando que entre 0,7 μm e 2,7 μm as espécies folhosas apresentam maior reflectância que às coníferas, diferenciando-se entre si.

Figura 3 – Comportamento espectral de coníferas e folhosas



Fonte: Adaptação de Koukal (2004).

A água é um bom absorvedor da REM na região do infravermelho médio (1,3 µm a 2,6 µm), de modo que quanto maior a turgidez das folhas, menores as reflectâncias nesta região (PONZONI, 2002). À medida que as moléculas de água existentes nos espaços intercelulares das folhas diminuem, maior é a taxa de espalhamento da energia do infravermelho médio incidente pelas interfaces das paredes intercelulares, resultando em maiores índices de reflectância nesse intervalo (JENSEN, 2009). Segundo Swain e Davis (1978) ao longo do espectro eletromagnético existem três pontos de absorção de água localizados em 1,4 µm, 1,9 µm e 2,7 µm, sendo que os picos de reflectância localizam-se entre essas bandas de absorção, em dois comprimentos de onda específicos: 1,6 µm e 2,2 µm.

2.2.2 Comportamento espectral do dossel

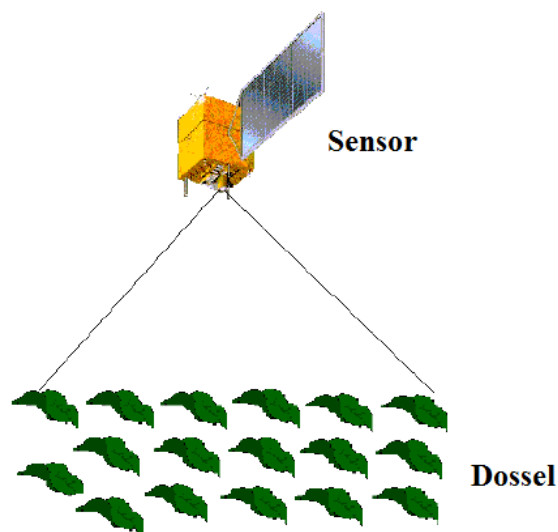
Knipling (1970) destaca que a reflectância de um dossel é consideravelmente menor que a de uma folha individual, ainda que o formato da curva seja semelhante. O autor enfatiza ainda, que esse comportamento se deve à atenuação da radiação associada a fatores como a variação no ângulo de incidência da radiação, orientação das folhas, sombras e superfícies de fundo como o solo. A presença de sombras no

interior da cobertura florestal é um dos principais fatores responsáveis por fazer com que a reflectância espectral de uma folha isolada seja superior àquela dos dosséis.

Desse modo, Ardõ (1992) argumenta que quando o objeto de estudo é a energia refletida pela copa das árvores, deve-se levar em consideração a interferência das sombras. Ressaltando ainda que as mesmas apresentam importância ao analisar a resposta das variáveis biofísicas, interferindo em todas as bandas, sendo tão importante quanto o conteúdo de água na determinação da resposta no infravermelho próximo.

Ponzoni et al. (2012) demonstraram, de modo hipotético, que mesmo o dossel sendo composto apenas por folhas (Figura 4), a sua resposta espectral seria inferior àquela apresentada por uma folha isolada. Para os autores, esse processo é atribuído a influência da geometria de iluminação e a de visada na reflectância. No entanto, é esperado que a curva de reflectância seja similar à de uma folha isolada.

Figura 4 - Dossel hipotético composto apenas de folhas no sentido horizontal



Fonte: (PONZONI et al., 2012).

Neste sentido, espera-se que o dossel de uma vegetação oriunda de imagens multiespectrais apresente na região do visível, uma tonalidade escura, ocasionada pelos pigmentos fotossintetizantes causadores da baixa reflectância da REM (PONZONI, 2002). Todavia, o contrário ocorre na região do infravermelho próximo, na qual o dossel deve apresentar tonalidade clara, explicada pela elevação dos valores

de reflectância. Por sua vez, na região do infravermelho médio, espera-se tonalidade intermediária.

Ao estudar as propriedades de reflectância da cobertura de uma floresta, Guyot et al. (1989) explicam que a resposta não é dependente unicamente das características espectrais de cada indivíduo, sendo também relacionados a fatores edáficos e a tipologia vegetal. Jensen (2009) define ainda, que as principais variáveis que afetam a função de distribuição de reflectância bidirecional de um dossel referem-se à iluminação (geometria e características espectrais), sensor, vegetação (dossel, copas, troncos e folhas), substratos e características do solo.

O comportamento espectral da vegetação modifica-se ao longo do ciclo vegetativo, sendo que as alterações fisiológicas e morfológicas das plantas variam de acordo com a região do espectro, tipo de cultura, arquitetura do dossel e tipo de substrato (NOVO, 2010). Outros fatores inerentes às plantas podem influenciar na resposta espectral em diferentes comprimentos de onda, tais como estresses ocasionados por ataques de insetos, doenças fisiológicas ou condições ambientais desfavoráveis à planta. Esses fatores modificam o conteúdo de pigmentos fotossintetizantes, interferindo na resposta da região do visível, assim como, a ocorrência de necrose e alteração do equilíbrio hídrico geram consequências na resposta espectral na região do infravermelho próximo (PONZONI, 2002).

2.3 SISTEMAS ORBITAIS: PROGRAMA LANDSAT

Desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o programa Landsat fornece dados para o Brasil desde 1973, ancorando estudos relacionados ao ambiente atmosférico em diversas áreas de pesquisa, consolidando-se como um produto amplamente utilizado, demonstrando eficiência no mapeamento e monitoramento da superfície terrestre em grande escala. Essa série é composta por oito satélites orbitais, porém apenas o Landsat 8 encontra-se em pleno imageamento, coletando aproximadamente 400 cenas diariamente (USGS, 2013).

Tendo como missão permitir a comparação do estado da superfície terrestre ao longo do tempo por meio da aquisição repetitiva de dados multiespectrais calibrados, os produtos Landsat tornaram-se os mais completos, permitindo longos registros da superfície terrestre, aliado a boa resolução espacial (NOVO, 2010). A Tabela 1 apresenta os satélites do programa e suas características.

Tabela 1 - Satélites do Programa Landsat

Sistema	Operação	Sensores	Resolução espacial (m)	Revisita (dias)
Landsat 1	23/07/1972 01/06/1978	RBV MSS	80	18
Landsat 2	22/01/1975 25/02/1982	RBV MSS	80	18
Landsat 3	05/05/1978 31/03/1983	RBV MSS	30 80	18
Landsat 4	16/07/1982 08/1993	TM MSS	30 80	16
Landsat 5*	01/03/1984 05/06/2011	TM MSS	30 80	16
Landsat 6	10/05/1993 10/05/1993	ETM+	15(pan) 30 (ms)	16
Landsat 7	04/04/1999 a 2007	ETM+	15(pan) 30 (ms)	16
Landsat 8	11/02/2013	OLI TIRS	15(pan) 30 (ms)	16

Fonte: Adaptação de Novo (2010).

* Transmissão de dados TM apenas por telemetria.

Inicialmente, esses satélites foram programados para apresentar uma vida útil de 2 anos, porém a grande maioria permaneceu em atividade por tempo superior. Ao longo do tempo ocorreram modificações na resolução espacial, temporal e faixas espectrais, propiciando a incorporação de novos sensores e adequação às necessidades dos usuários.

O programa Landsat iniciou com o lançamento do *Earth Resources Technology Satellite – 1* (ERTS-1) em 1972, passando a ser chamado de Landsat a partir de 1975 (ROCHA, C., 2000). Os dois primeiros modelos (Landsat 1 e 2) possuíam a bordo o sistema RBV (*Return Beam Vidicom*) e MSS (*Multispectral Scanner*), os quais apresentavam a mesma resolução espacial (80m) e temporal (18 dias).

Novo (2010) descreve que o Landsat 3, embora tivesse os mesmos sistemas sensores que os anteriores, apresentou melhorias no sensor RBV, fornecendo dados com resolução espacial de 30 metros em uma única faixa do espectro, já o sistema

MSS passou a operar na região do infravermelho termal, devido a adição de uma faixa espectral (banda 8). Os satélites Landsat 4 e 5 carregavam a bordo o sensor MSS como o seu antecessor, porém contou com a adição do sistema TM (*Thematic Mapper*), o qual passou a registrar dados em 7 faixas espectrais, com resolução espacial de 30 metros e temporal de 16 dias.

A transmissão de dados ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) foi incorporada ao satélite Landsat 6, lançado em 10/05/1983, porém o mesmo não chegou a entrar em órbita. Diante disso, o governo norte-americano lançou o satélite Landsat 7 com o sensor ETM+, sendo composto de oito bandas espectrais (NOVO, 2010). A adição da banda pancromática com resolução espacial de 15 metros, assim como melhorias nos parâmetros geométricos, radiométricos e aumento da resolução espacial da banda termal para 60 metros, permitiram que este satélite gerasse imagens com aplicações em escala de até 1:25.000 (NASA, 2013).

Com o intuito da continuidade deste programa, em 2013 passou a operar o satélite Landsat 8, possuindo a bordo dois instrumentos imageadores: o sensor TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) e OLI (*Operational Land Imager*). Lançado em 11 de fevereiro de 2013, o Landsat 8 passou a gerar imagens a partir de abril do mesmo ano. Uma das principais mudanças em relação aos demais de sua série, está na adição de bandas espectrais, aliado à maior capacidade de gravação de dados e na detecção de mudanças na superfície terrestre (resolução radiométrica de 16 bits com um intervalo de 1 a 65.535 níveis de cinza). Esse satélite contempla onze faixas espectrais conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Características espectrais, espaciais e temporais do satélite Landsat 8

Banda	Sensor	Faixa espectral (μm)	Resposta espectral	Resolução espacial (m)	Resolução temporal
B1	OLI	0,43 – 0,45	Ultra-azul	30	16 dias
B2		0,45 – 0,51	Azul		
B3		0,53 – 0,59	Verde		
B4		0,64 – 0,67	Vermelho		
B5		0,85 – 0,88	IVP		
B6		1,57 – 1,65	IVM 1		
B7		2,11 – 2,29	IVM 2		
B8		0,50 – 0,68	Pan	15	
B9		1,36 – 1,38	Cirrus	30	
B10	TIRS	10,60 – 11,19	Termal 1	100	16 dias
B11		11,50 – 12,51	Termal 2	100	

Fonte: Adaptação de USGS (2013).

O sensor OLI dispõe de oito bandas multiespectrais (Banda 1 a 7 e 9) com resolução espacial de 30 metros, além de conter a banda pancromática (Banda 8) com resolução espacial de 15 metros. O sensor OLI contempla estudos costeiros e aerossol com a adição da banda ultra azul (Banda 1), a qual trabalha na faixa espectral de 0,43 μm – 0,45 μm , e para detecção de nuvens, a banda cirrus (Banda 9), compreendendo o intervalo de 1,36 μm – 1,38 μm (USGS, 2013). O sensor TIRS foi projetado para abranger duas faixas térmicas, sendo essas descritas pelas bandas 10 e 11 com resolução espacial de 100 metros apresentando-se como um instrumento imageador da temperatura, compondo duas faixas espectrais 10,60 μm – 11,19 μm e 11,50 μm – 12,51 μm .

2.4 ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Os índices de vegetação consistem em combinações de bandas com objetivo de realçar características da vegetação, minimizando efeitos do solo e da atmosfera (EPIPHANIO et al., 1996). Barbosa et al. (2008) consideram que os modelos matemáticos desenvolvidos relacionam o comportamento espectral e os parâmetros mensuráveis a campo, seja quantitativamente como qualitativamente.

Devido a essas características, os índices de vegetação são largamente utilizados na avaliação da resposta espectral apresentada pelo dossel. Nesse

contexto, Ponzoni (2001) afirma que as medidas resultantes podem ser utilizadas também como indicadores do crescimento e do vigor da vegetação verde.

Destaca-se que os índices de vegetação exploram as propriedades espectrais da vegetação, principalmente nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo. Para Ponzoni et al. (2012) esses índices permitem relacionar os parâmetros biofísicos da cobertura vegetal por meio de imagens, como por exemplo, o índice de área foliar, biomassa e volume, minimizando ainda os efeitos de iluminação e declividade da superfície, os quais influenciam negativamente nos valores de reflectância da vegetação.

Os critérios considerados úteis para a definição de índices de vegetação segundo Ponzoni (2001) deveriam englobar características como a minimização dos efeitos da influência do solo, normalização dos efeitos externos (ângulo solar e de visada, nuvens e atmosférica) e a geração de produtos que permitem a comparação das condições de vegetação em escalas globais. A escolha dos índices está associada ao comportamento da resposta espectral normalmente em duas regiões: do visível e do infravermelho próximo. Assim, quanto maior for a densidade da cobertura vegetal, menor será a reflectância verificada na região do visível, e maior será a reflectância na região do infravermelho próximo (PONZONI et al., 2012). Esse processo é dependente da quantidade de folhas e distribuição espacial das mesmas no dossel, de acordo com os fatores expostos no item 2.2.1.

Com o objetivo de explorar as características espectrais da vegetação, diferentes combinações de bandas foram desenvolvidas e estudadas por inúmeros autores (HUETE et al., 1985; JORDAN, 1969; ROUSE et al., 1974; SOUSA e PONZONI, 1998). Dentre os índices de vegetação, destaca-se a diferença normalizada e a razão simples, as quais são frequentemente utilizadas quando se deseja a obtenção de parâmetros ambientais, como as características biofísicas (FERREIRA, 2012).

O Índice de vegetação Razão Simples (*Simple Ratio Vegetation Index*) definido por Jordan (1969) consiste no valor de reflectância obtida pela relação estabelecida entre a faixa do infravermelho próximo e o valor na faixa do vermelho (Equação 3). Contudo, vegetações densas refletem pouco na região do vermelho, assim foi desenvolvido por Rouse et al. (1974) o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), o qual apresenta um intervalo de -1 a +1, obtido de acordo com Equação 4.

Esse índice de vegetação é amplamente conhecido e utilizado para o monitoramento da vegetação, uma vez que se relaciona ao vigor vegetativo da mesma.

$$SR = \frac{\rho_{IVP}}{\rho_V} \quad (3)$$

Em que:

ρ_{IVP} = reflectância na região do infravermelho próximo;

ρ_V = reflectância na região do vermelho.

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \quad (4)$$

Segundo Huete et al. (1985), os índices SR e NDVI proporcionam realce do contraste entre o solo e a vegetação, minimizando os efeitos de iluminação da imagem, porém ambos são sensíveis às propriedades ópticas da linha do solo. Os mesmos autores observaram que a sensibilidade dos índices de vegetação em relação ao solo é maior nos dosséis com níveis médios de cobertura vegetal. Assim, propuseram um índice designado de SAVI (*Soil adjusted vegetation index*), o qual usa uma constante “L” a fim de minimizar o efeito do solo (calor e brilho) no resultado final. O SAVI é obtido por meio da relação das bandas do infravermelho próximo e do vermelho (Equação 5).

$$SAVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V + L)} * (L+1) \quad (5)$$

Em que:

L = constante que minimiza o efeito do solo podendo variar de 0 a 1, sendo: L = 1 (para densidades baixas de vegetação); L = 0,5 (densidades médias); L = 0,25 (densidades altas).

Jensen (2009) enfatiza que a diferença de reflectância de uma vegetação em relação à outra quando se analisam os fatores biofísicos é atribuída às influências do solo ou do substrato. Desse modo, a complementação de um índice tornando-o capaz de minimizar tais efeitos, apresenta-se como uma alternativa frequentemente utilizada em modelos matemáticos que predizem variáveis biofísicas, conforme estudo desenvolvido por Xavier (1998), Berra (2013) e Costa et al. (2015), em que esta

variável foi considerada eficiente na estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e volume de madeira.

Estudo realizado por Sousa e Ponzoni (1998) mostrou a eficiência do índice GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) na determinação de mudanças no volume de madeira. Este índice é obtido pela relação entre a banda do infravermelho próximo e a banda do verde (Equação 6). Diante disso, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o emprego do índice de vegetação GNDVI, de modo a evidenciar correlações significativas com as variáveis dendrométricas a campo, permitindo sua mensuração com o auxílio do sensoriamento remoto.

$$\text{GNDVI} = \frac{\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{Verde}}}{\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{Verde}}} \quad (6)$$

O índice DVI (*Difference Vegetation Index*) por sua vez, é expresso pela diferença da resposta espectral da banda do infravermelho próximo e a banda do vermelho (Equação 7). Proposto por Clevers (1988), o DVI é sensível a quantidade de vegetação verde, de modo que em estudos desenvolvidos em florestas nativas por Mohammadi et al. (2010) demonstraram a eficiência desse índice na obtenção de volume estocado a campo.

$$\text{DVI} = \rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}} \quad (7)$$

Objetivando explorar a reflectância nas faixas do infravermelho próximo e infravermelho médio, Sousa e Ponzoni (1998) designaram o índice MVI (*Moisture Vegetation Index*), conforme demonstra a Equação 8. Os autores definem que estas são regiões inversamente proporcionais, já que existe uma baixa reflectância na região do infravermelho médio com o aumento da densidade vegetal, causada pela maior absorção de água nessa faixa espectral.

$$MVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{IVM}}{\rho_{IVP} + \rho_{IVM}} \quad (8)$$

Em que:

ρ_{IVM} = reflectância na região do infravermelho médio.

Composto pela combinação das bandas do visível (banda do vermelho e verde) e do infravermelho próximo, o índice ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index*) foi desenvolvido por Kaufman e Tanré (1992), destinando-se a estudos da vegetação, com intuito de reduzir os efeitos da atmosfera sobre o índice NDVI do sensor Modis (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). Segundo Jensen (2009), a faixa do vermelho é sensível aos efeitos atmosféricos devido a sua baixa reflectância, desse modo, a normalização da radiância no azul, vermelho e infravermelho próximo, torna esse índice menos sensível a esses efeitos (Equação 9).

$$ARVI = \frac{\rho_{IVP} - (\rho_V - 1 (\rho_{Azul} - \rho_V))}{\rho_{IVP} + ((\rho_V - 1 (\rho_{Azul} - \rho_V)))} \quad (9)$$

Em que:

ρ_{Azul} = reflectância na região do azul.

2.5 CORREÇÕES RADIOMÉTRICAS

As informações obtidas dos sensores são provenientes da REM emitida pelo sol, a qual é refletida pelos alvos, propagando-se em um ângulo sólido. Diante disso, o uso dos valores armazenados pelos sensores não apresenta valores físicos (radiância ou reflectância), sendo disponibilizados de forma discreta e expressos em números digitais (ND), os quais são dependentes da intensidade do fluxo incidente, da geometria de incidência e por fim da geometria de visada (PONZONI et al., 2012).

As técnicas de adequação radiométrica incluem correções que visam minimizar as diferenças entre os valores medidos de radiância. Essas diferenças decorrem de possíveis alterações das sensibilidades radiométricas dos detectores ao longo do tempo, incluindo diferenças nas calibrações dos sensores, efeitos atmosféricos e de iluminação diferenciadas entre imagens de diferentes datas (SOUSA, 1997). Neste contexto, estudos relacionados ao uso de imagens multitemporais ou a quantificação das características da superfície terrestre, tais como índice de área foliar, volume e

biomassa baseados em dados de sensoriamento remoto, requerem a conversão dos números digitais em reflectância de superfície (PANDYA et al., 2002).

Os dados de satélite de sensoriamento remoto são representados por meio de uma matriz contendo os NDs, os quais se encontram em um intervalo numérico. Para imagens Landsat 8, os NDs apresentam um intervalo de 1 a 6550, referentes a resolução de 16 bits.

2.5.1 Conversão de ND para valores físicos: Reflectância de superfície

As informações contidas nos NDs originais representam uma relação numérica entre os valores, limitados a cada banda da imagem, o que impossibilita a comparação de bandas espectrais entre si, nem imagens de diferentes datas ou sensores (ORUÉ, 2002). A análise comparativa desses dados torna-se possível a partir da conversão dos NDs a valores físicos.

Para Ponzoni et al. (2012), cada sensor de acordo com as bandas espectrais, apresenta um critério próprio para discriminar os valores de radiância medidos de acordo com a sua resolução radiométrica. Assim, as bandas de um mesmo sensor podem não apresentar NDs compatíveis, tornando-se inviável a caracterização espectral dos objetos utilizando essa variável.

Nesse sentido, Robinove (1982) determina que o primeiro passo para a adequação radiométrica consiste na conversão dos dados orbitais, originalmente em valores digitais, para valores que representem qualidades físicas do alvo, como radiância ou reflectância. Contudo, o autor recomenda essa transformação apenas em determinadas situações como no mosaico de duas ou mais cenas com diferentes ângulos solares ou diferentes sensores orbitais e após modificações na calibração de um dos sensores.

Valores de radiância ou de reflectância são mais compreensíveis ao usuário do que os valores digitais, já que representam valores físicos reais (SOUSA, 1997). Essa conversão é necessária quando se deseja associar os dados espectrais com variáveis físicas localizadas na superfície terrestre. Assim, estudos de mapeamento, classificação e mosaicos utilizam-se dos valores digitais, de modo que para esse tipo de análise, não há a necessidade da conversão dos NDs para valores físicos.

Ponzoni et al., (2012) consideram que por meio dos valores de reflectância é possível realizar o monitoramento de uma determinada cobertura, já que as mudanças

ocorridas se relacionam apenas com a propriedade estrutural e espectral da mesma e não, em decorrência das variações dos sensores. Desse modo, a conversão dos NDs à valores físicos exige informações do sensor, assim como a caracterização das condições ambientais de quando a imagem foi gerada, já que a reflectância é dependente das características do alvo e das condições de observação.

O processo de conversão difere entre os produtos orbitais disponíveis, assim para Landsat 8 essa conversão baseia-se nas informações contidas nos arquivos complementares como o ângulo de elevação do sol, o fator multiplicativo e aditivo da imagem. O processo em questão apresenta modificações em relação aos demais satélites da série Landsat, uma vez que não possuem valores da irradiação solar na exoatmosfera. Nesse caso, a obtenção de valores de reflectância aparente se dá por meio da Equação 10 (NASA, 2013).

$$\rho = \frac{M_p * Q_{cal} + A_p}{\text{Sin}(\Theta_{SE})} \quad (10)$$

Em que:

ρ = reflectância planetária no topo da atmosférica;

M_p = fator de redimensionamento multiplicativo da banda específica;

A_p = fator de redimensionando aditivo específico da banda a partir dos metadados;

Q_{cal} = valor quantizado calibrado pelo pixel em DN;

Θ_{SE} = Ângulo elevação solar.

2.5.2 Correção atmosférica

O processo de transformação dos dados brutos à reflectância no topo da atmosfera não elimina os efeitos atmosféricos, representando uma simplificação da realidade, sendo comumente denominada de reflectância aparente. Assim, o valor calculado corresponde apenas à reflectância captada pelo sensor, porém não se refere àquela mensurável na superfície terrestre (CHUVIECO, 1990).

A intensidade do fluxo da REM armazenada pelos sensores sofre interferência da atmosfera, uma vez que os mesmos estão localizados à grande distância dos alvos terrestres (KAUFMAN, 1989). Dessa forma, a energia refletida encontra barreiras físicas na atmosfera, mascarando os valores refletidos pelos alvos situados na superfície.

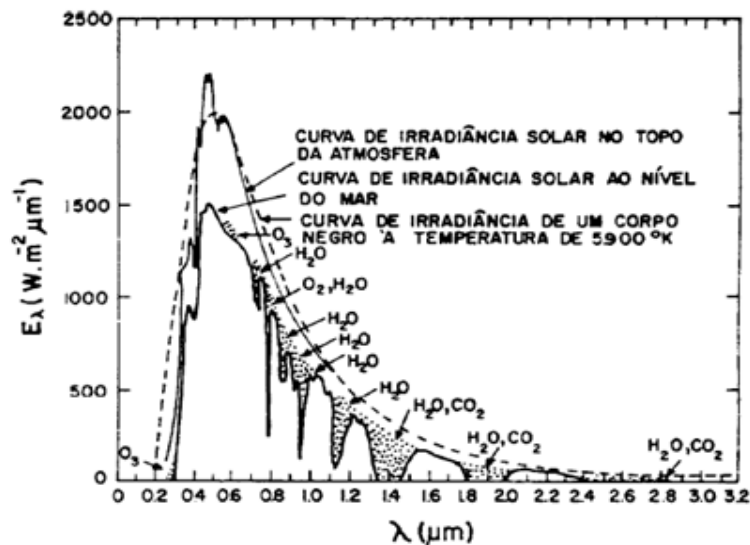
Os fenômenos de absorção e espalhamento representam os principais efeitos atmosféricos causadores de mudanças nas imagens, promovendo a perda da nitidez

e do brilho superficial (NASCIMENTO, 2006). No processo de espalhamento (difusão ou dispersão), as partículas captam REM incidente modificando a direção original, enquanto que no processo de absorção ocorre a transformação da REM em outra fonte de energia (LIOU, 1980).

Segundo Nascimento (2006), as partículas que causam o espalhamento da energia na atmosfera apresentam tamanhos diferentes, podendo ser microscópicos (moléculas de gases da atmosfera) ou maiores que $100 \mu\text{m}$ (gotas ou partículas de gelo). Por outro lado, a absorção é um processo termodinâmico, resultante da perda de energia por parte dos compostos presentes na atmosfera em determinados comprimentos de onda (LATORRE, 1998). Este autor esclarece que os gases presentes na atmosfera como vapor de água, dióxido de carbono, ozônio, óxido nítrico, monóxido de carbono, metano e oxigênio apresentam características de absorção de energia.

A Figura 5 apresenta a distribuição da REM emitida pelo sol no topo da atmosfera e na superfície terrestre ao longo das faixas espectrais do visível ($0,4 \mu\text{m} - 0,72 \mu\text{m}$), infravermelho próximo ($0,72 \mu\text{m} - 1,1 \mu\text{m}$) e infravermelho médio ($1,1 \mu\text{m} - 3,2 \mu\text{m}$). A absorção de energia por parte dos gases na atmosfera limpa é representada pelas áreas sombreadadas, destacando ainda, os principais gases absorvedores de energia (MORAIS, 2002).

Figura 5 - Distribuição espectral do fluxo radiante proveniente do sol em três diferentes superfícies



Fonte: (SWAIN e DAVIS, 1978).

Neste sentido, Mather (1999) enfatiza que diante dos processos atmosféricos expostos acima, os dados oriundos de sensores remotos quando destinadas ao monitoramento de parâmetros físicos na superfície terrestre, necessitam ser submetidos aos métodos de correção dos efeitos atmosféricos devido à interferência dos mesmos nas bandas espectrais das imagens. Ao utilizar valores de reflectância bidirecional aparente é possível realizar operações aritméticas utilizando dados de diferentes sensores e bandas espectrais. No entanto, para a caracterização espectral de um objeto é necessário a realização da correção atmosférica (PONZONI et al., 2007).

Existem diferentes métodos de correção atmosférica com aplicabilidade aos dados espaciais, os quais possibilitam a identificação da influência da atmosfera nos processos de espalhamento e absorção (LATORRE et al., 2002). Entretanto, destacam-se os métodos alternativos e os físicos, com ampla utilização na obtenção da reflectância de superfície.

O DOS (*Dark Object Subtraction*) desenvolvido por Chavez (1988), é um dos métodos alternativos mais conhecidos baseado na subtração do pixel escuro. Esse método caracteriza-se pela simplicidade no processamento, uma vez que não depende de parâmetros atmosféricos ou informações da superfície, utilizando-se apenas de dados contidos na própria imagem.

Os modelos físicos ou códigos de transferência radiativa apresentam resultados mais confiáveis, quando se deseja relacionar valores de reflectância presentes nas imagens com parâmetros biofísicos ou geofísicos de um objeto, uma vez que esses consideram tanto o fenômeno de espalhamento quanto o de absorção. Os modelos físicos mais difundidos no meio científico são: MODTRAN (*Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance*), LOWTRAN (*Low Resolution Transmittance*), 5S (*Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) e 6S (*Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*).

2.6 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Schneider et al. (2009) atribuem a análise de regressão à solução de grande parte dos problemas florestais, especialmente, quando se pretende obter as estimativas de parâmetros da floresta, utilizando relações biométricas que possibilitam a aquisição de valores estimados de forma indireta por meio de equações de

regressão. Harris (2001) por sua vez, define-a como uma técnica desenvolvida para estimar valores da variável dependente (Y) a partir de valores de variáveis independentes (X).

A análise de regressão tem a função de estabelecer formas de medir a relação entre as variáveis, podendo expressar a possível relação entre as mesmas (fraca ou forte), propondo um modelo que interprete a relação funcional, e por fim, empregá-lo para a predição (FONSECA, 2008). O uso desse método envolve alguns aspectos estatísticos importantes como o planejamento na coleta dos dados, visando boa precisão no ajuste das equações, além da escolha do modelo que melhor explica a variável dependente. No entanto, é essencial a verificação das condicionantes da análise de regressão, as quais consistem na homogeneidade de variância, normalidade e independência dos resíduos (SCHNEIDER et al., 2009).

Para atender aos critérios estabelecidos pelas condicionantes, Freese (1964) argumenta que os dados devem ser oriundos de uma população com variância homogênea, desse modo a variância nos valores de Y será a mesma em todos os pontos, gerando assim, a situação de homoscedasticidade. O autor ainda destaca, que os desvios das unidades amostrais nos valores de Y devem ser independentes entre si, ou seja, diferentes amplitudes e direções para cada unidade amostral, podendo essa condição ser verificada pelos testes de Durbin-Watson, correlação em série, entre outros.

Outro critério para que o ajuste do modelo de regressão apresente dados confiáveis, consiste na normalidade dos resíduos. Schneider et al. (2009) afirmam que a normalidade pode ser verificada por meio de testes como Shapiro-wilk, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, entre outros.

2.6.1 Regressão Linear

A relação existente entre as variáveis dendrométricas dos povoamentos florestais pode ser explicada por meio de regressão linear. Dessa forma, Schneider et al. (2009) ressaltam que a mesma apresenta três características importantes: o ponto médio situado sobre a linha de regressão; a soma dos desvios é nula e a soma dos quadrados dos desvios é mínima.

Assim, os modelos matemáticos relacionam o comportamento de uma variável Y com outra X (BARROS, 2013). Essa relação pode ser explicada por modelos de

regressão linear simples, envolvendo apenas duas variáveis (Equação 11) ou modelos de regressão linear múltipla (Equação 12).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \varepsilon_i \quad (11)$$

Em que:

Y_i = valor da ocorrência i da variável dependente;

β_0 = intercepto múltiplo;

X_{ij} = valor da ocorrência i da variável independente;

β_j = coeficiente de regressão;

ε_i = valor residual, sendo a diferença entre o valor observado de Y e sua estimativa.

A análise de regressão múltipla para Tabachnick e Fidell (1996) consiste em uma técnica estatística que permite a avaliação da relação entre uma variável dependente com diversas variáveis independentes. O resultado da interação é uma equação da reta que melhor representa a estimativa de uma variável dependente, podendo ser explicada por diversas variáveis explicativas, sendo essa expressa pela Equação 12.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \beta_2 X_{i,2} + \dots + \beta_n X_{i,n} + \varepsilon_i \quad (12)$$

Em que:

Y_i = valor da ocorrência i da variável dependente;

β_0 = intercepto múltiplo;

X_{ij} = valor da ocorrência i da variável independente;

β_j = coeficiente de regressão;

ε_i = valor residual, sendo a diferença entre o valor observado de Y e sua estimativa.

Segundo Steel e Torrie (1960), o melhor ajuste da reta aos dados é realizado utilizando o método dos mínimos quadrados, o qual necessita da menor soma dos quadrados dos resíduos, visando do mesmo modo, estabelecer a maximização do coeficiente de correlação. Em vista disso, uma equação de regressão deve explicar sempre que possível a variação dos dados, fato esse, ocasiona frequentemente a agregação do maior número de variáveis. Porém, no que tange o princípio da economia, aconselha-se o uso de menos variáveis independentes sempre que possível, explicando assim, a parte substancial da variabilidade da variável dependente (MAZOROTTO, 1989).

2.6.2 Modelagem dos parâmetros dendrométricos

A fim de reduzir o custo na coleta de dados e auxiliar no seu planejamento, a regressão linear baseia-se em um processo estatístico de ajuste de modelos matemáticos envolvendo diferentes variáveis que se relacionam (SCHNEIDER et al., 2009). Inúmeros modelos matemáticos são empregados na área florestal, assim como em estudos visando o progresso da análise quantitativa nos povoamentos florestais, predizendo o desenvolvimento futuro em condições específicas.

Nesse sentido, Campos (1980) argumenta que a predição do crescimento dos indivíduos é de fundamental importância para a avaliação econômica das alternativas de manejo a serem empregados para cada situação. Diversos estudos têm sido desenvolvidos utilizando dados orbitais como meio de obtenção das variáveis biofísicas (BERRA et al., 2013; CANAVESI et al., 2010; COSTA et al., 2015). Essa relação é passível de ser conhecida devido ao comportamento espectral da variável física, podendo este ser observado por meio de imagens de satélite e sua relação expressa por equações empíricas.

A criação de modelos de estimativas inicia-se com a escolha das variáveis explicativas que apresentam maior correlação perante a variável a ser estimada. Existem diferentes métodos para a avaliação da contribuição de cada variável, destacando-se a técnica de *Stepwise regression* (passo a passo), *Forward selection* (passo a passo para frente) e *Backward elimination* (passo a passo para trás).

O método de seleção *Stepwise* é amplamente difundido na literatura, devido a sua eficiência e praticidade, já que o mesmo não requer a computação de todas as possíveis regressões. Schneider et al. (2009) relata que este método efetua procedimentos passo a passo para frente e para trás. Assim, verifica a precisão estatística com a entrada de uma nova variável ao modelo e o efeito na precisão se a mesma for removida, testando ainda, alternativas englobando as demais variáveis. A inclusão ou eliminação de variáveis pertencente ao modelo pode ser determinada seguindo a análise dos valores apresentados pelo coeficiente de correlação parcial, soma de quadrados dos resíduos e a estatística F.

Para a seleção das equações de regressão entre os vários modelos testados, utiliza-se também a análise dos parâmetros estatísticos. Essa análise é comumente baseada no coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa (S_{yx}) e o índice de Furnival (IF) para equações logarítmicas (SCHNEIDER et al., 2009).

Dessa maneira, Tsuchiya (2002) define o R^2 como uma medida de precisão da variabilidade da variável dependente, a qual é explicada pela variável independente. O R^2 apresenta valores entre 0 e 1, optando-se pela equação que apresentar maior valor para esse coeficiente (Equação 13). Contudo, quando se deseja comparar equações com diferentes números de coeficientes deve-se optar pelo uso do coeficiente de determinação ajustado (Equação 14). No entanto, Finger (1992) ressalta que o uso isolado desse coeficiente como critério de seleção, especialmente quando o modelo apresenta muitos coeficientes é perigoso, uma vez que seu valor aumenta com o acréscimo de uma nova variável ao modelo.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (13)$$

Sendo que:

R^2 = coeficiente de determinação;

\hat{Y}_i = valor estimado da variável dependente;

\bar{Y}_i = valor médio da variável dependente;

Y_i = valor observado da variável dependente.

$$R^2_{aj} = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} * (1 - R^2) \quad (14)$$

Em que:

R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado;

R^2 = coeficiente de determinação;

n = numérico de níveis da variável independente;

p = número de coeficientes de variáveis na equação de regressão.

O erro padrão da estimativa (S_{yx}) por sua vez, consiste em uma medida de dispersão entre os valores observados e estimados pela regressão (SCHNEIDER et al., 2009), sendo obtido por meio da Equação 15. Recomenda-se o uso do erro padrão da estimativa relativo quando se deseja comparar equações que apresentam variáveis dependentes com diferentes unidades.

$$S_{yx} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}}{\bar{y}} \quad (15)$$

Em que:

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

y_i = variável dependente observada a campo;

\hat{y}_i = variável dependente estimada;

\bar{y} = média aritmética da variável dependente;

n = número de observações.

O índice de Furnival (IF) é uma variável importante na escolha dos modelos de regressão, uma vez que permite a comparação de equações ponderadas ou então com variáveis dependentes transformadas para logaritmo (SCHNEIDER et al., 2009), conforme apresentado na Equação 16. Essa variável deve ser comparada com o S_{yx} quando a equação for logarítmica.

$$IF = \text{antilog} \frac{\sum \log(Y)}{n} * \log e^{-1} * S_{yx} \quad (16)$$

Em que:

IF= Índice de Furnival;

n = número de observações;

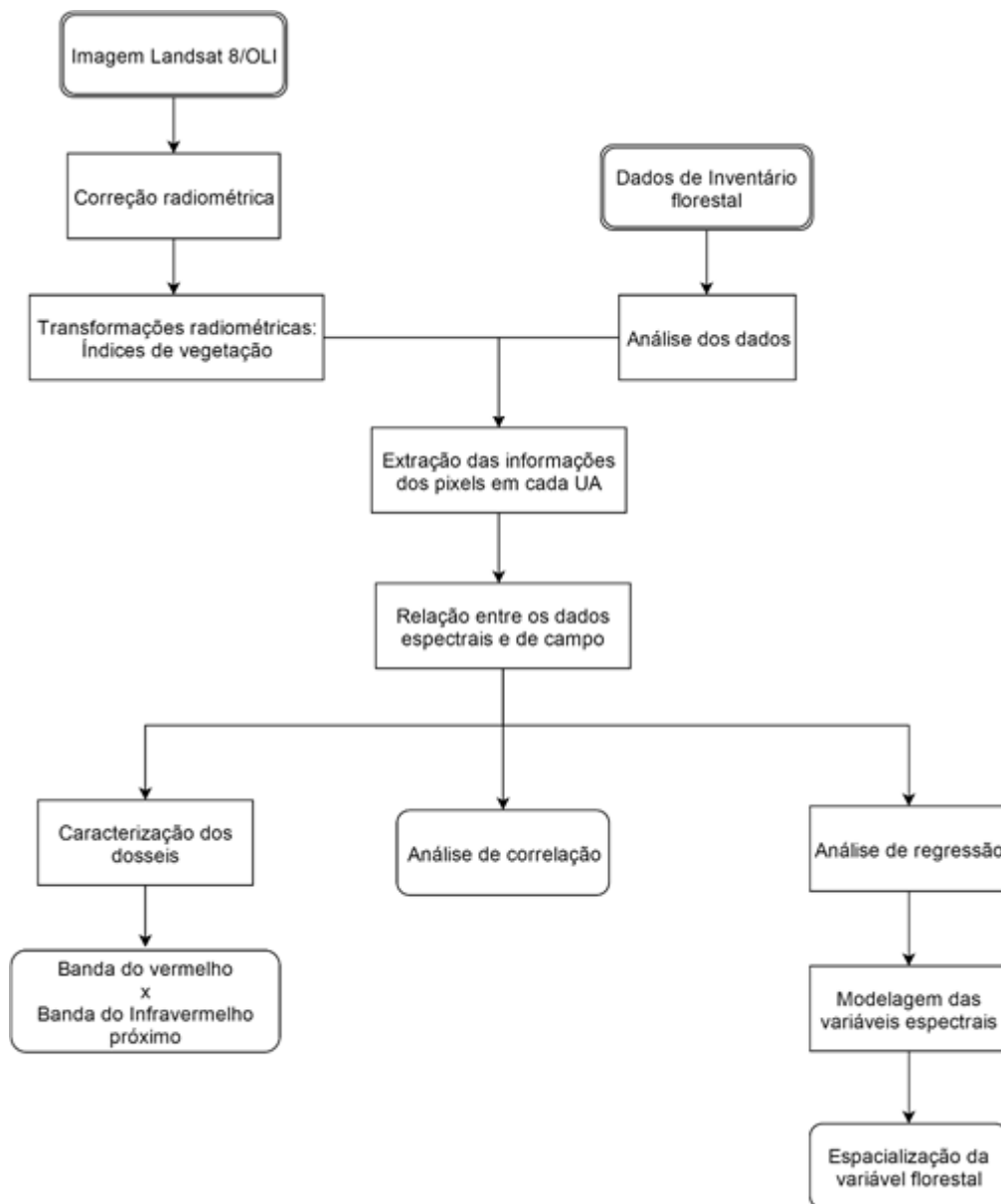
Y = variável dependente;

S_{yx} = erro padrão da estimativa.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada por este estudo pode ser visualizada no fluxograma exposto na Figura 6. As atividades realizadas englobaram procedimentos metodológicos aplicados nos dados de campo e nos dados orbitais.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia aplicada no estudo

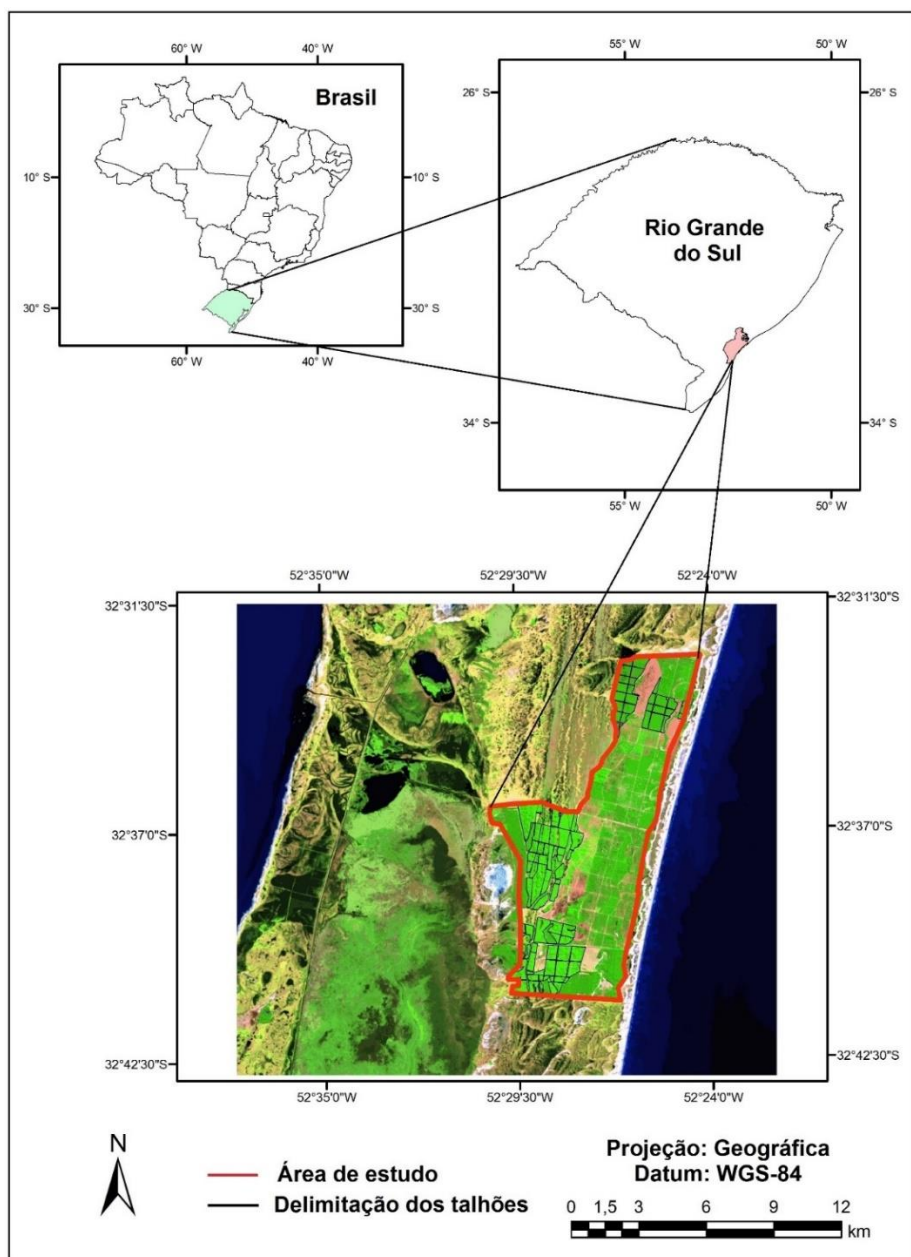


Fonte: Autora.

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada entre as latitudes $32^{\circ} 33' 22''$ a $32^{\circ} 41' 03''$ Sul e longitudes $52^{\circ} 30' 29''$ a $52^{\circ} 25' 20''$ Oeste. A propriedade pertence a empresa Trevo Florestal LTDA (TREFLOR), situada no município de Rio Grande no estado do Rio Grande do Sul, possuindo aproximadamente 5.800 hectares de áreas reflorestadas com as espécies de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* (Figura 7).

Figura 7 - Localização da área de estudo no município de Rio Grande – RS



Segundo classificação de Koppen-Geiger o clima é subtropical úmido do tipo Cfa1, com temperatura média anual de 16,5 °C a 18,0 °C e a precipitação média anual oscila entre 1.186 a 1.423 mm. Porém, em estações chuvosas, grandes volumes de água permanecem no interior dos talhões, necessitando a abertura de canais de drenagem no entorno dos mesmos com o intuito de mitigar esses efeitos.

A área de estudo apresenta solos originados de sedimentos quaternários do tipo Neossolo Quartzarênico, apresentando características predominantemente arenosas, mal drenadas e compostas de um relevo plano em toda sua extensão, o qual se eleva apenas alguns metros do nível do mar (CUNHA et al., 1996). Baseando-se em análise dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), Weber et al., (2004) observaram que a área de estudo apresenta altitudes variando de 1 a 25 metros.

A vegetação característica da região é constituída pelos campos litorâneos compostos de banhados e matas, os quais abrigam inúmeras espécies de gramíneas, leguminosas e ciperáceas. Assim, a vegetação nativa é caracterizada por formações pioneiras, composta por vegetação com influência marinha, denominada de restinga (RADAMBRASIL, 1986).

Restinga refere-se a um conjunto de ecossistemas predominantes em terrenos arenosos, banhados e campos alagados em áreas mais baixas (SALLES et al., 1994). Essa formação compreende uma comunidade florística distinta formada por herbáceas, subarbustivas, arbustivas ou arbóreas, as quais podem ocorrer em mosaicos ou apresentar áreas desprovidas de vegetação (CONAMA, 1999).

A empresa Trevo Florestal cultiva as espécies de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, sendo que o tipo de solo define qual a espécie a ser implantada. Assim, solos arenosos com baixo teor de matéria orgânica são destinados ao plantio de *P. elliottii*, e solos heterogêneos, com alguma concentração de matéria orgânica, são utilizados para o plantio de *E. grandis* (BERRA, 2013). A Figura 8 permite a visualização dos povoamentos de *P. elliottii* situados próximos às áreas arenosas (margem inferior direita).

Figura 8 - Fotografia aérea de povoamentos de *P. elliotii* situados próximos às áreas arenosas



Fonte: Trevo Florestal LTDA, 2015.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Equipamentos e sistemas de processamento

Para a execução deste estudo utilizou-se os programas computacionais de processamento da imagem: SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) versão 5.2, ENVI (*Environment for Visualizing Images*) versão 5.1[®]. A análise estatística dos dados dendrométricos e espectrais foi realizada na Linguagem estatística R[®].

3.2.2 Produtos orbitais e materiais de campo

- Imagem do satélite Landsat 8, sensor OLI na Órbita/ponto 221-083, cobrindo a área de estudo, constituída pelas bandas da região do visível e infravermelho (B2, B3, B4, B5, B6 e B7), referentes a data 30 de agosto de 2013;

- Mapas dos talhões, contendo as coordenadas geográficas das unidades amostrais;
- *Shapefile* contendo a delimitação de cada talhão e área total de estudo;
- Base de dados obtida por meio de inventário florestal sistemático realizado na empresa proprietária, contendo informações quanto à espécie, idade, Diâmetro a Altura do Peito (DAP), altura total, área basal, volume e densidade de plantas.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Dados de campo

Mediante inventário florestal realizado no período de agosto a setembro de 2013, foram obtidos os dados de DAP, altura total e densidade da população, os quais serviram como base para os cálculos de área basal e volume. Foram amostradas 85 unidades amostrais (UA) em povoamentos de *E. grandis* distribuídas em 29 talhões e 53 UA em povoamentos de *P. elliotii* distribuídos em 22 talhões (Tabela 3). Para a localização das unidades amostrais empregou-se o GPS (*Global Positioning System*) Garmin Etrex Legend® no sistema de coordenadas UTM datum WGS - 84. As coordenadas foram tomadas a partir do centro da UA.

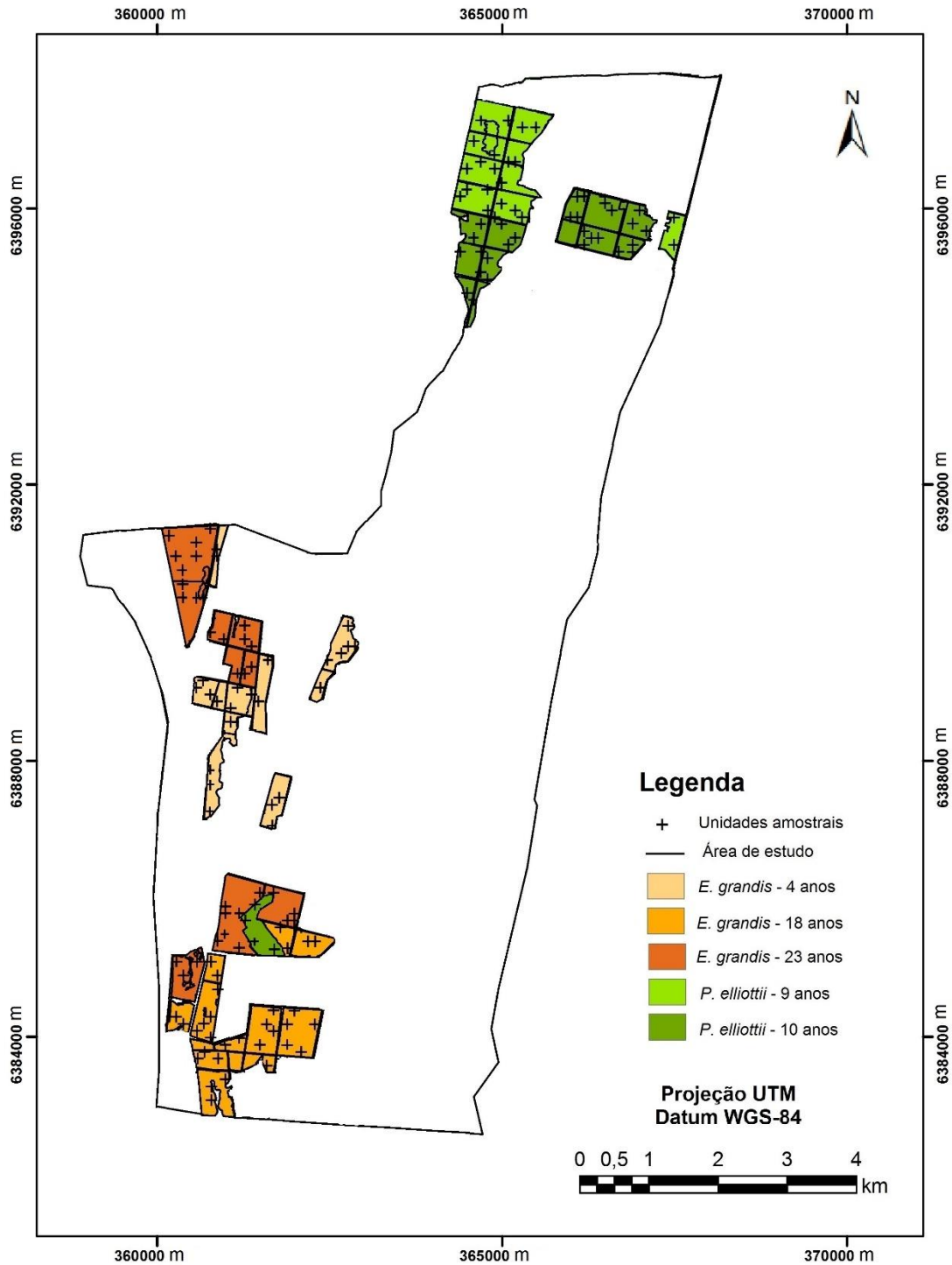
Tabela 3 - Número dos UA inventariadas em povoamentos florestais

Espécie	Nº amostral	Nº talhões
<i>E. grandis</i> aos 4 anos	26	9
<i>E. grandis</i> aos 18 anos	30	11
<i>E. grandis</i> aos 23 anos	29	9
<i>P. elliotii</i> aos 9 anos	25	9
<i>P. elliotii</i> aos 10 anos	28	13

Os dados foram obtidos por meio de amostragem sistemática, com a alocação das UAs proporcionais à área, com intensidade amostral a cada 5 hectares. O tamanho padrão de cada UA foi definido com base no espaçamento inicial dos plantios, sendo esse de 3 x 2 m. Assim, os pontos amostrais apresentavam formato

retangular com área de 420 m² (20 x 21 m). Os talhões inventariados e as unidades amostrais estão apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Representação dos talhões e unidades amostrais inventariadas



Determinou-se o diâmetro dos indivíduos por meio de medições do Diâmetro a Altura do Peito (DAP) utilizando a suta dendrométrica e por vezes o uso de fita métrica quando o DAP era superior a 60 cm. O inventário florestal restringiu-se a indivíduos que apresentavam DAP igual ou superior a 10 cm dentro de cada UA. A mensuração da altura total dos indivíduos ocorreu por meio do hipsômetro de sunnto.

A partir dos dados de altura e diâmetro de cada indivíduo, estimou-se o volume (m^3) por meio de equações alométricas (Equação 17), de modo que essas informações foram organizadas em planilhas em formato XLM. Visando estabelecer relações entre as variáveis coletadas a campo e os dados digitais da imagem, foram calculados os coeficientes de correlação dos mesmos.

$$V = G * h * f \quad (17)$$

Em que:

V = volume de madeira (m^3/ha);

h = altura total;

f = fator de forma;

G = área basal por hectare.

3.3.2 Processamento da imagem

Inicialmente, elaborou-se um banco de dados com um projeto no *software* SPRING contendo a imagem da área de estudo, sendo esta adquirida por meio da base de dados *United States Geological Survey* (www.earthexplorer.usgs.gov). A imagem Landsat 8 sensor OLI apresenta 9 bandas espectrais, porém neste estudo foram excluídas as bandas 1, 8 e 9, uma vez que as mesmas não apresentam informações relevantes para os alvos analisados.

3.3.2.1 Correção radiométrica

De modo a tornar possível a obtenção dos parâmetros biofísicos dos povoamentos florestais, os NDs da imagem original foram transformados em reflectância bidirecional no topo da atmosfera baseando-se na Equação 10 demonstrada anteriormente, inserindo os parâmetros intrínsecos do satélite. Assim, o

fator de redimensionamento multiplicativo (M_p) possui um valor de 0,00002, o fator de redimensionamento aditivo (A_p) de -0,100 e o ângulo de elevação do sol de 38,3111.

A reflectância bidirecional de superfície foi gerada pelo *software Environment for Visualizing Images* (ENVI 5.1®), por meio do algoritmo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) (ACHARYA et al., 1999). O FLAASH utiliza o modelo MODTRAN para caracterizar a atmosfera e eliminar efeitos causados por partículas de vapor de água, aerossol e gases, com base em informações pré-definidas sobre o satélite, conteúdo de aerossol e composição atmosférica no momento em que a imagem foi captada pelo sensor. Os parâmetros de entrada do algoritmo estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Informações inseridas no código MODTRAN necessárias a correção atmosférica da imagem Landsat 8/OLI

Parâmetros	Informações da imagem e condições atmosféricas
Satélite	Landsat 8
Altitude do sensor (km)	705
Elevação do terreno (Km)	0,015
Tamanho do pixel (m)	30
Coordenadas geográficas centrais	-53,387° -32,112°
Mês, dia, ano	8-30-2013
Hora (HH: MM: SS)	13:21:33
Modelo atmosférico	Mid-Latitude Summer
Modelo de aerossol	Rural
Modelo de concentração de aerossol – Km (visibilidade)	100

A imagem de entrada deste aplicativo apresenta valores de radiância (sofrendo interferência dos fatores atmosféricos, aerossóis, fumaça, vapor de água) e após o processamento das informações requeridas, tem como resultado uma imagem de reflectância bidirecional de superfície, a qual possui valores que se aproximam dos observados a campo por equipamentos específicos.

3.3.2.2 Índices de vegetação

Após a correção radiométrica da imagem, as bandas espectrais foram utilizadas tanto individualmente como de forma combinadas, obtendo-se os índices de vegetação para a caracterização espectral dos povoamentos de interesse. Elaboraram-se oito índices de vegetação, os quais permitem a avaliação de diferentes aspectos da vegetação, assim como a comparação do desempenho e a sensibilidade apresentada pelos mesmos (Tabela 5). Os valores de reflectância extraídos da imagem consideraram os *pixels* abrangentes da área na UA, procedendo, quando necessário, com a média aritmética.

Tabela 5 - Índices de Vegetação analisados no presente estudo

Índice de vegetação	Fórmula	Autor
ARVI	$ARVI = \frac{\rho_{IVP} - (2 * \rho_V + \rho_{azul})}{\rho_{IVP} + (2 * \rho_V + \rho_{azul})}$	Kaufman e Tanré (1992)
DVI	$DVI = \rho_{IVP} - \rho_V$	Clevers (1988)
GNDVI	$GNDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{Verde}}{\rho_{IVP} + \rho_{Verde}}$	Sousa e Ponzoni (1998)
MVI	$MVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{IVM}}{\rho_{IVP} + \rho_{IVM}}$	Sousa e Ponzoni (1998)
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V}$	Rouse et al. (1974)
SAVI	$SAVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V + L)} * (1+L)$	Huete et al. (1985)
SR	$SR = \frac{\rho_{IVP}}{\rho_V}$	Jordan (1969)

Sendo que:

ρ_{Azul} = Reflectância da banda do azul;

ρ_{Verde} = Reflectância da banda do verde;

ρ_V = Reflectância da banda do vermelho;

ρ_{IVP} = Reflectância da banda do Infravermelho próximo;

ρ_{IVM} = Reflectância da banda do infravermelho médio;

L = constante que minimiza os efeitos do solo, utilizada nesse estudo o valor de 0,25 e 0,50.

3.3.3 Caracterização espectral dos dosséis

Comumente é observada a resposta da vegetação ao longo da região do espectro abrangido pelas bandas multiespectrais dos satélites, porém as maiores diferenças quando comparado espécies florestais, encontram-se ao utilizar a faixa do infravermelho próximo e a do vermelho. Diante disso, estabeleceu-se a relação entre a resposta espectral dos povoamentos de *E. grandis* e *P. elliotii* em diferentes idades utilizando as bandas do infravermelho próximo (B5) e do vermelho (B4), buscando a diferenciação dos estágios de crescimento de acordo com cada espécie.

3.3.4 Análise da relação entre a variável biofísica e as variáveis espectrais

A resposta espectral e o volume de madeira dos povoamentos foram representados por meio de suas respectivas médias para as duas espécies estudadas, considerando ainda, a diferença etária entre as amostras. Neste sentido, efetuou-se a análise estatística para dois diferentes alvos, ou seja, realizaram-se leituras das UAs de *E. grandis* com idades de 4, 18 e 23 anos e *P. elliotii* aos 9 e 10 anos. As variáveis espectrais constituíram-se das bandas multiespectrais B2, B3, B4, B5, B6 e B7 e dos índices de vegetação ARVI, DVI, MVI, GNDVI, NDVI, SAVI_{L=0,25}, SAVI_{L=0,50} e SR.

A fim de investigar a possível relação existente entre o volume e a reflectância das bandas e índices de vegetação, aplicou-se a análise descritiva e a correlação de Pearson (r), sendo essa, demonstrada anteriormente na Equação 18. Com o intuito de elucidar a magnitude das correlações, realizaram-se gráficos de dispersão entre as variáveis dendrométricas e as variável espectrais, associando um modelo de regressão simples, cuja precisão foi expressada pelo coeficiente de determinação (R^2).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X-\bar{X})(Y-\bar{Y})}{\sqrt{\{\sum_{i=1}^n (X-\bar{X})^2\}\{\sum_{i=1}^n (Y-\bar{Y})^2\}}} \quad (18)$$

Em que:

r = coeficiente de correlação de Pearson;

X = valores observados da variável independente;

\bar{X} = média aritmética da variável independente;

Y = corresponde aos valores observados da variável dependente;

\bar{Y} = média aritmética da variável dependente.

3.3.5 Análise de regressão

A análise de regressão foi empregada com o propósito de determinar quais são as variáveis provenientes de imagens Landsat 8 que melhor estimam o volume florestal estocado a campo. O volume é a variável de maior importância econômica dentro de um povoamento com fins comerciais, uma vez que indica a produtividade da área. Desse modo, optou-se por ajustar modelos de regressão visando estimar essa variável por meio do processo indireto.

Examinou-se a relação entre o volume e os dados de reflectância por meio da análise de regressão linear múltipla, considerando cada UA. Os modelos de estimativa de volume foram testados baseando-se nos valores de reflectância, os quais foram extraídos da imagem em cada unidade amostral. Assim, todas as variáveis espectrais entraram no modelo como variável independente e o volume florestal como variável dependente.

Por meio da estimativa *Stepwise* foram selecionadas as variáveis espectrais com maior contribuição ao modelo proposto, já que este processo permite examinar a contribuição de cada variável independente para o modelo de regressão (HAIR et al., 2006). A inclusão de variáveis no modelo, deu-se por meio da análise dos valores apresentados pelo coeficiente de correlação parcial, soma de quadrados dos resíduos e estatística F.

Para a escolha da equação que melhor se ajustou aos dados, procedeu-se com a avaliação do comportamento dos modelos matemáticos selecionados. Assim, levou-se em consideração os critérios estatísticos: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa (S_{yx}), índice de Furnival (IF) e teste F com o nível de significância de 5% de probabilidade.

Foram realizados cálculos referentes às condicionantes de regressão para o melhor modelo em cada idade de análise. Assim, a homogeneidade de variância foi avaliada pelo teste de Bartlett, a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro Wilk e a independência dos resíduos pelo teste de Durbin-Watson. Na sequência, para os

modelos de melhor ajuste em cada faixa etária realizou-se a análise gráfica dos resíduos e a validação das estimativas.

A espacialização do volume da área de estudo baseou-se no modelo que melhor respondeu a análise de regressão para cada idade das distintas espécies englobadas por este estudo, segundo os critérios estabelecidos anteriormente. Desse modo, cada pixel da imagem passou a representar o volume de madeira estocado (m^3/ha), o que permitiu o mapeamento do volume em classes.

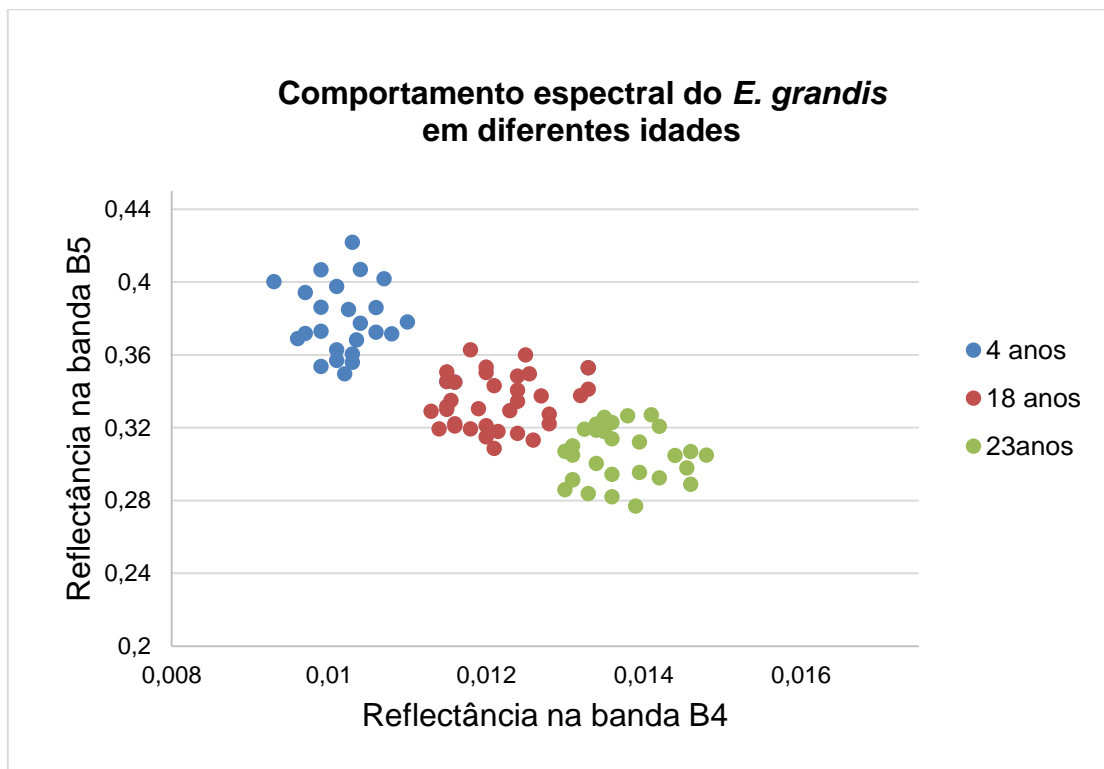
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL DOS DOSSÉIS EM FUNÇÃO DA IDADE DOS POVOAMENTOS

A relação entre a resposta espectral dos povoamentos de *E. grandis* e *P. elliottii* em diferentes idades foi analisada baseando-se na relação das bandas B5 e B4, as quais melhor evidenciam as características da vegetação. Desse modo, a Figura 10 demonstra o comportamento espectral dos plantios de *E. grandis* aos 4, 18 e 23 anos de idade.

Os povoamentos comerciais apresentaram comportamentos distintos em cada fase de crescimento, demonstrando que a resposta espectral é sensível ao estágio de desenvolvimento dos indivíduos. No entanto, aos 4 anos de idade, os povoamentos apresentaram valores superiores de reflectância na banda B5 e maior absorção na banda B4, quando comparada com as demais idades.

Figura 10 – Resposta espectral dos povoamentos de *E. grandis* aos 4, 18 e 23 anos em relação as bandas B4 e B5



Analisando-se os povoamentos aos 18 anos, constatou-se que o valor máximo de reflectância na banda B5 foi de 0,362 e a mínima reflectância na banda B4 foi de 0,0113. Todavia, a resposta espectral máxima apresentada aos 23 anos na banda B5 foi de 0,325 e mínima de 0,013 para a banda B4.

Nota-se que o aumento da idade propiciou a diminuição da reflectância na banda B5 e a redução da absorção na banda B4 (aumento da reflectância na faixa do vermelho). Nesse sentido, Ponzoni et al. (2015) enfatizam que o comportamento da resposta espectral nesses dosséis pode estar associado a perda da influência das folhas verdes e por vezes, ganho da participação de galhos secos depositados sobre o solo, especialmente quando realizado o desbaste dos povoamentos.

O aumento do volume relaciona-se diretamente com o crescimento em diâmetro e altura dos indivíduos, e para povoamentos jovens, esse fator culmina na maior produção de folhas verdes, com elevada atividade fotossintética (BERRA, 2013). Esse processo, segundo Ponzoni et al. (2012) faz com que povoamentos jovens apresentem valores elevados de reflectância na região do infravermelho próximo e menor na região do visível. Entretanto, Carreiras et al. (2006) definem que a intensidade do sinal armazenado pelas bandas B5 e B4 também é fortemente relacionada com a classe de fundo (background), desse modo quanto maior a cobertura do dossel, maior a reflectância na faixa do infravermelho próxima devido a menor influência do brilho do solo na resposta espectral.

Nesse sentido, os resultados demonstram que aos 4 anos de idades, a reflectância na banda B5 é superior àquela apresentada aos 18 e 23 anos. Os povoamentos jovens amostrados nesse estudo apresentam maior densidade populacional e conseqüentemente, maior cobertura da superfície do solo, aliado a um dossel formado por folhas jovens, sendo assim, esse conjunto de fatores justificam a maior intensidade do sinal nessa faixa espectral.

Por outro lado, observou-se a redução da absorção da REM na banda B4 com o aumento da idade, o que se atribui à redução da atividade dos pigmentos foliares, os quais utilizam a REM incidente para a produção de fotossíntese. Desse modo, os povoamentos aos 23 anos apresentam taxa de crescimento inferior (capacidade fotossintética) que aos 18 e aos 4 anos de idade.

A redução das taxas de crescimento desencadeia a diminuição da absorção da REM pelos pigmentos presentes no mesófilo foliar, dos quais segundo Jensen (2009) a clorofila *b* é o pigmento de maior influência no comprimento de onda do vermelho,

sendo essa responsável pela absorção de luz. O autor afirma ainda, que é fundamental entender a fisiologia das plantas, especialmente as características de pigmentação, já que fornece o entendimento quando a absorção da REM pela clorofila começa a diminuir.

Esse estudo corrobora com Ponzoni et al. (2015), os quais identificaram por meio das componentes principais, que dosséis em fase inicial de desenvolvimento (1 a 3 anos) apresentam grande influência do plano de fundo na resposta espectral, ao passo que dosséis com 4 e 6 anos demonstram que a reflectância está regida, principalmente, pelas folhas verdes, contendo pequena interação com o sub-solo. No entanto, observaram que aos 8 e 9 anos de idade, a resposta espectral demonstrou perda da influência das folhas verdes e aumento da interferência de galhos secos e do solo em decorrência de desbastes.

No presente estudo, observa-se que o processo de diferenciação do estágio de crescimento é dificultado a medida que os povoamentos se aproximaram da fase de estagnação do crescimento, uma vez que os plantios florestais têm suas taxas metabólicas estabilizadas nesse estágio fisiológico. Assim, é possível identificar a influência dos processos fisiológicos na resposta espectral exibida pelos povoamentos comerciais, especialmente na região do espectro estudado. Os resultados apresentados pelos povoamentos de *E. grandis* nas faixas espectrais estão sumarizadas na Tabela 6.

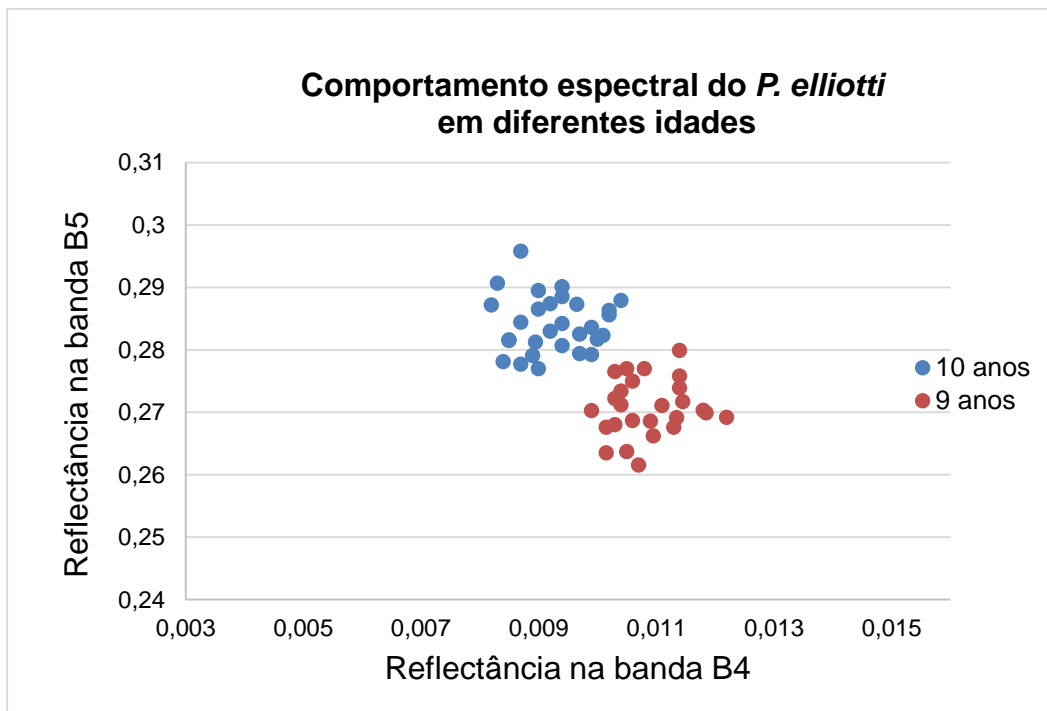
Tabela 6 - Comportamento da resposta espectral nas bandas B5 e B4

Idade	Banda B5	Banda B4
4 anos	Maior reflectância: devido a presença de folhas verdes	Menor reflectância: alta absorção da REM devido a atividade fotossintética
18 anos	Reflectância intermediária: decorrente da menor presença de folhas verdes	Reflectância intermediária: menor atividade fotossintética dos pigmentos
23 anos	Menor reflectância: devido a maior influência de galhos e menor presença de folhas verdes.	Maior reflectância: menor absorção da REM pelos pigmentos fotossintetizantes

Fonte: Autora.

Para povoamentos *P. elliotii* aos 9 e 10 anos de idade, o comportamento espectral das bandas B5 e B4 está exposto na Figura 11. Observou-se que o aumento da idade propiciou um acréscimo na reflectância na banda B5 e, maior absorção na banda B4.

Figura 11 - Resposta espectral dos povoamentos de *P. elliotii* aos 9 e 10 anos de acordo com as bandas B5 e B4



Fonte: Autora.

Baseando-se na análise de campo e dados espectrais, percebeu-se que os povoamentos estudados estão em estágio de desenvolvimento da estrutura de copa e agregação de valor comercial. Assim, os povoamentos com 10 anos de idade, apresentam maior atividade fotossintética e maior concentração de folhas verdes que aos 9 anos, reduzindo os espaços vazios do dossel.

Desse modo, o aumento da reflectância na banda B5 com desenvolvimento dos povoamentos pode ser explicado pela otimização do processo de espalhamento aditivo, ocasionado pela presença de folhas verdes na formação do dossel e nível de cobertura (HOFFER, 1978; JENSEN, 2009; PONZONI, 2002). Em contrapartida, as plantas com alto vigor vegetativo demonstram maior absorção na banda B4 (JENSEN, 2009), o que evidencia a elevada atividade fotossintética, uma vez que os pigmentos

foliares absorvem maior quantidade da REM incidente sobre as folhas, indispensável para seu crescimento.

Carreiras et al. (2006) observaram que o aumento na cobertura do dossel considerando-se uma mesma classe de fundo, exibiu um aumento da reflectância na banda B5 e um decréscimo na banda B4 com dados Landsat. Nesse sentido, Jensen (2009) afirma que a medida que o dossel se desenvolve, a reflectância do *pixel* tende a sofrer menor interferência da linha do solo. Esse processo resulta em maior reflectância na banda B5, uma vez que o sub-bosque ou serapilheira possuem grande influência na radiância armazenada pelo sensor nessa faixa do espectro. O comportamento da resposta espectral nas duas idades dos povoamentos de *P. elliottii* está sumarizada na Tabela 7.

Tabela 7- Comportamento da resposta espectral nas bandas B5 e B4

<i>P. elliottii</i>	Banda B5	Banda B4
9 anos	Menor reflectância: maior influência da serapilheira na resposta espectral	Maior reflectância: devido a menor estrutura de dossel e menor absorção
10 anos	Maior reflectância: maior desenvolvimento do dossel e maior presença de folhas verdes e menor influência da serapilheira	Menor reflectância: maior absorção da REM pelos pigmentos fotossintetizantes

Fonte: Autora.

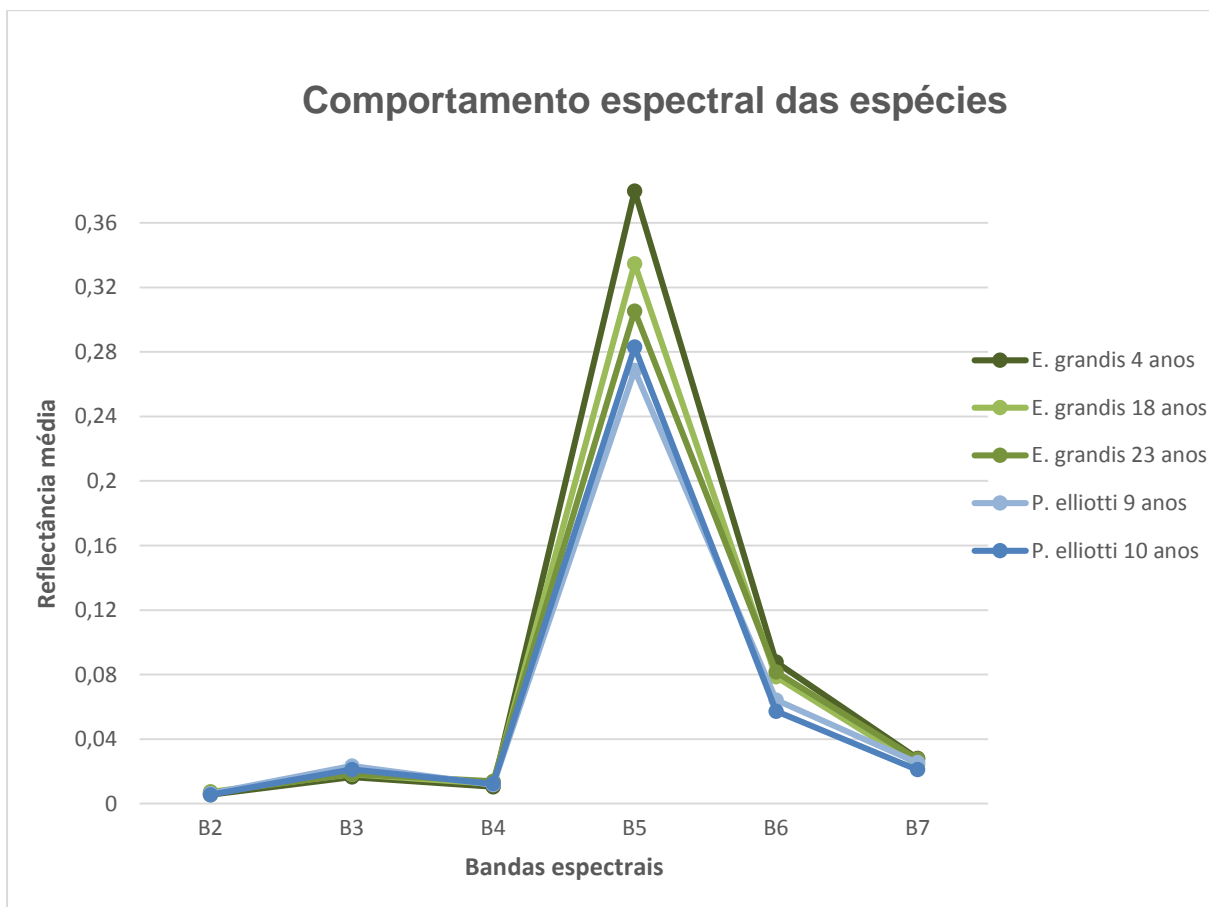
Neste contexto, quando analisado os povoamentos de *P. elliottii*, a resposta espectral apresentou comportamento inverso aos enunciados anteriormente para *E. grandis*, o que se atribui as fases fisiológicas dos povoamentos. Esse estudo englobou povoamentos de *E. grandis* em diferentes fases de desenvolvimento (4, 18 e 23 anos), os quais permitem análise do comportamento espectral do dossel ao longo do ciclo produtivo, porém para *P. elliottii*, foram incluídos apenas indivíduos jovens (9 e 10 anos).

A cultura de pinus apresenta desenvolvimento lento, quando comparada ao ciclo produtivo do eucalipto. Estudos indicam que a idade de rotação para as espécies de pinus, normalmente é a partir dos 20 anos, em função do período de estagnação e rentabilidade econômica (FLORIANO et al., 2009; MEDEL et al., 2011).

Esses resultados corroboram com citações de Ponzoni et al. (2015), Ponzoni et al. (2012) e Jensen (2009) sobre o comportamento da vegetação. No entanto, os dados Landsat 8 descreveram a trajetória do crescimento florestal, incluindo o monitoramento do incremento dos plantios, assim como a proximidade com a estagnação, detectando ainda, variações em um curto espaço de tempo (anual).

Ao analisar a resposta espectral das espécies alvo desse estudo ao longo das bandas espectrais, observou-se que os povoamentos de eucalipto apresentam de modo geral, maior reflectância na banda B5 que a espécie de pinus (Figura 12). Esse processo pode ser explicado em decorrência das diferenças estruturais e morfológicas das folhas dessas distintas espécies. Ponzoni (2002) enuncia que quanto maior a existência de espaços na estrutura interna foliar, maior será a reflectância nessa região.

Figura 12 – Reflectância média das unidades amostrais dos plantios de *E. grandis* e *P. elliotii* nas bandas espectrais do satélite Landsat 8



O presente estudo corrobora com Koukal (2004), o qual ao analisar a resposta espectral de coníferas e folhosas, observou que povoamentos de folhosas apresentam maior valor de reflectância que as coníferas. Lillesand et al. (2007) enfatizam que as espécies de folhosas normalmente apresentam maiores valores de reflectância tanto na região do infravermelho próximo quanto na região do visível, uma vez que dispõem maior variabilidade de pigmentos e estruturas celulares. Esse comportamento é confirmado ao analisar a curva espectral ao longo da região do visível, infravermelho próximo e médio.

Neste contexto, Chuvieco (1990) enfatiza que a estrutura interna das folhas varia para cada espécie, assim esse fator possibilita a discriminação das espécies por imagens de satélite ao utilizar a região infravermelho próximo. Nesse intervalo a vegetação demonstra comportamento específico de reflexão da REM incidente.

Observa-se ainda, que a banda B5 descreve o crescimento florestal, de modo que os povoamentos com maior taxa de crescimento apresentaram resposta espectral superior aos demais de sua espécie. Assim, para *E. grandis* o ponto de maior inflexão corresponde aos 4 anos de idade, valores superiores que aos 18 e 23 anos. Do mesmo modo, os povoamentos *P. elliotii* aos 10 anos apresentaram valores superiores àqueles expostos aos 9 anos de idade, evidenciando que para essa espécie, está ocorrendo incremento em volume e em estrutura de copa em ritmo acelerado.

4.2 RELAÇÃO ENTRE O VOLUME FLORESTAL E AS VARIÁVEIS ESPECTRAIS

4.2.1 Povoamentos de *E. grandis*

Por meio da análise exploratória dos dados, identificou-se o comportamento de cada banda espectral e índice de vegetação nas diferentes fases de crescimento dos povoamentos. A Tabela 8 evidencia que para povoamentos de *E. grandis*, as bandas B5 e B6 apresentaram as maiores amplitudes, enquanto que entre os índices de vegetação, o SR está associado a maior amplitude desse conjunto de dados. Esses resultados corroboram com os encontrados por Goergen (2014) utilizando produtos do sensor TM.

Tabela 8 - Estatística descritiva da resposta espectral das bandas e índices de vegetação em povoamentos de *E. grandis*

		B2	B3	B4	B5	B6	B7	ARVI	DVI	GNDVI	MVI	NDVI	SAVI _{L=0,25}	SAVI _{L=0,50}	SR
4 anos	Mediana	0,0053	0,016	0,010	0,375	0,086	0,027	0,900	0,365	0,917	0,626	0,947	0,717	0,860	36,746
	Média	0,0056	0,016	0,010	0,380	0,088	0,028	0,898	0,370	0,917	0,625	0,946	0,721	0,865	36,805
	Mínima	0,0042	0,013	0,009	0,349	0,078	0,025	0,853	0,339	0,902	0,573	0,920	0,696	0,835	24,030
	Máxima	0,0083	0,021	0,016	0,421	0,101	0,034	0,914	0,411	0,938	0,656	0,955	0,755	0,906	43,040
	Amplitude	0,0041	0,008	0,007	0,072	0,023	0,009	0,061	0,072	0,037	0,082	0,034	0,059	0,071	19,013
	Des. Padrão	0,0010	0,002	0,001	0,019	0,005	0,002	0,013	0,020	0,009	0,017	0,007	0,016	0,019	3,870
	CV (%)	18,73	13,53	12,46	4,94	6,00	7,97	1,43	5,33	1,04	2,73	0,70	2,25	2,25	10,52
18 anos	Mediana	0,0071	0,018	0,012	0,333	0,079	0,024	0,871	0,321	0,898	0,619	0,930	0,674	0,809	27,583
	Média	0,0074	0,018	0,012	0,335	0,079	0,024	0,870	0,322	0,897	0,619	0,929	0,675	0,810	27,464
	Mínima	0,0052	0,016	0,011	0,309	0,069	0,022	0,853	0,297	0,883	0,582	0,919	0,649	0,779	23,772
	Máxima	0,0097	0,022	0,015	0,363	0,086	0,028	0,883	0,351	0,907	0,651	0,937	0,702	0,843	30,737
	Amplitude	0,0045	0,005	0,003	0,054	0,017	0,007	0,030	0,054	0,024	0,069	0,018	0,053	0,063	6,965
	Des. Padrão	0,0010	0,001	0,001	0,015	0,004	0,001	0,008	0,015	0,006	0,017	0,004	0,014	0,017	1,779
	CV (%)	13,42	6,50	5,96	4,56	4,79	5,89	0,87	4,69	0,73	2,73	0,48	2,12	2,13	6,49
23 anos	Mediana	0,0066	0,019	0,014	0,314	0,081	0,027	0,849	0,300	0,885	0,588	0,917	0,644	0,779	23,081
	Média	0,0067	0,018	0,014	0,311	0,081	0,027	0,846	0,297	0,886	0,585	0,915	0,642	0,775	22,387
	Mínima	0,0055	0,010	0,013	0,281	0,071	0,023	0,815	0,268	0,876	0,526	0,906	0,608	0,638	10,273
	Máxima	0,0078	0,021	0,015	0,345	0,095	0,035	0,861	0,331	0,910	0,629	0,924	0,679	0,814	25,292
	Amplitude	0,0023	0,011	0,002	0,063	0,023	0,012	0,046	0,060	0,034	0,010	0,016	0,070	0,076	15,019
	Des. Padrão	0,0006	0,002	0,001	0,015	0,006	0,003	0,010	0,015	0,008	0,027	0,005	0,018	0,019	2,733
	CV (%)	9,10	11,29	3,94	4,89	7,24	10,85	1,19	5,13	0,87	4,66	0,57	2,83	2,52	12,20

Amplitude = Máxima – Mínima;
CV%= Coeficiente de variação.

Dentre os dados espectrais, a maior variação aos 4 e 18 anos foi observada pela banda do azul (B2), a qual apresentou um coeficiente de variação (CV) no valor de 18,73% e 13,42%, respectivamente. Aos 23 anos a banda do verde (B3) demonstrou conter maior variação nos dados, expondo um CV de 11,29%. Segundo Chander et al. (2004), a região do visível, especialmente a banda do azul, caracteriza-se por apresentar baixo sinal para a vegetação, desse modo estão frequentemente associadas a ruídos na imagem.

De modo geral, os índices de vegetação obtidos a partir de dados do sensor OLI exibiram menor variabilidade que as bandas multiespectrais, quando analisado povoamentos florestais de *E. grandis*. Entretanto, o índice SR demonstrou maior CV% que os demais em todas as idades estudadas, sendo de 10,52%, 6,49% e 12,20% aos 4, 18 e 23 anos.

Contudo, observou-se que a idade apresenta relação inversa a variação dos dados, de maneira que com o aumento do volume e conseqüentemente da idade,

ocorreu a diminuição do coeficiente de variação. Assim, aos 4 anos a maior variação foi de 18,73%, aos 18 anos reduziu para 13,42% e aos 23 anos foi de 12,20%. Esse comportamento pode ser atribuído a maior interferência das sombras na resposta espectral dos povoamentos mais jovens decorrentes do maior adensamento dos indivíduos. Segundo Ardö (1992), as sombras apresentam grande relevância no sinal refletido pelo dossel, influenciando em todas as bandas espectrais.

Ao relacionar a variável florestal com as bandas multiespectrais e índices de vegetação, elaborou-se a Tabela 9, a qual evidencia os coeficientes de correlação linear de Pearson para cada variável. As variáveis espectrais B5, ARVI, DVI, NDVI, SAVI_{L=0,25}, SAVI_{L=0,50} e SR apresentaram correlação significativa em todas as idades.

Tabela 9 – Análise de correlação linear de Pearson entre o volume e a reflectância das bandas espectrais e índices de vegetação dos povoamentos de *E. grandis*

Variável	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. grandis</i>
	(4 anos)	(18 anos)	(23 anos)
V (m ³ /ha)			
B2	0,3360**	-0,1949	0,2786
B3	-0,1062	-0,1918	-0,1694
B4	0,0686	-0,1160	-0,2937
B5	-0,7774**	-0,8294**	0,6802**
B6	-0,3547	-0,0878	-0,1723
B7	-0,5242**	0,2202	-0,4426*
ARVI	-0,5157**	-0,4789**	0,6837**
DVI	-0,7741**	-0,8325**	0,6892**
GNDVI	-0,2330	-0,3875*	0,4364*
MVI	-0,3378	-0,6167**	0,5606**
NDVI	-0,4024*	-0,4804**	0,7047**
SAVI _{L=0,25}	-0,7895**	-0,8330**	0,2152*
SAVI _{L=0,50}	-0,7895**	-0,8331**	0,7063**
SR	-0,5102**	-0,5041**	0,3993*

**Correlação significativa ao nível de confiança de 99%;

* Correlação significativa ao nível de confiança de 95%.

A variável florestal apresentou melhor correlação com o índice SAVI_{L=0,50} em todas as idades, expressando um coeficiente (r) aos 4, 18 e 23 anos de -0,7895, -0,8331 e 0,7063, respectivamente. Esse índice ao considerar a influência do solo na resposta espectral apresenta-se em diversos estudos como a variável de melhor correlação com os parâmetros florestais (CASSOL, 2013; COSTA et al., 2015; XAVIER, 1998).

Em estudos desenvolvidos por Berra (2013), o índice SAVI exibiu forte correlação com o volume de madeira utilizando dados Landsat 5/TM e ResourceSat-1/LISS3 em povoamentos de *P. elliotii*. Do mesmo modo, essa variável demonstrou melhor correlação com o IAF em povoamentos de eucalipto ao utilizar dados Landsat 5/TM, conforme resultados apresentados por Xavier (1998).

O índice ARVI correlacionou-se com o volume florestal em todas as idades dos povoamentos de *E. grandis*. Com o intuito de minimizar os efeitos atmosféricos para o produto MODIS, esse índice apresenta-se favorável ao estudo de superfícies totalmente cobertas por vegetação, nas quais, a influência dos efeitos atmosféricos é maior que em solo descoberto (PONZONI et al., 2012).

Do mesmo modo, o índice DVI demonstrou forte correlação com o volume nos povoamentos inventariados. Obtido a partir da diferença da banda B5 e B4, o índice DVI compõe estudos de modelagem em função sua capacidade de expressar a quantidade de vegetação verde na superfície. Huete et al. (2002) ao relacionar o índice SR com a biomassa e o IAF, comprovou que esse índice apresenta maior sensibilidade as variações de vegetação densa, tais como florestas. Assim, no presente estudo, o índice SR apresentou correlação significativa em todas as idades.

O índice GNDVI apresentou correlação significativa apenas aos 18 e 23 anos, relacionando-se com os fatores inerentes ao aumento da idade dos povoamentos. Obtido pela relação da banda B5 e da banda B3, o GNDVI é influenciado pelos pigmentos fotossintetizante presentes na folha. Assim, a vegetação jovem apresenta altas taxas metabólicas, absorvendo grande parte da energia na região do visível, necessária ao seu crescimento, o que pode ter interferido negativamente na descrição da variação do volume aos 4 anos de idade.

Desse modo, aos 4 anos de idade, o índice GNDVI apresentou coeficiente de correlação no valor de -0,2330, elevando-se para -0,3875 aos 18 anos, e pôr fim a análise de correlação exibiu valor de 0,4364 aos 23 anos. Diante desse comportamento, o índice GNDVI demonstrou maior sensibilidade com o aumento da reflectância na banda do verde, o que proporcionou maior correlação com a variável biofísica a campo em povoamentos com 18 e 23 anos.

O índice MVI é composto pela banda B5 e B6, as quais são influenciadas pela umidade contida nos alvos (BERRA, 2013; JENSEN, 2009). Assim, o índice MVI demonstrou maior sensibilidade ao volume obtido em povoamentos com 18 e 23 anos, apresentando correlação significativa no valor de -0,6167 e 0,5606, respectivamente.

Esses povoamentos apresentavam umidade no interior do dossel o que favoreceu a detecção da variação do volume florestal em decorrência da sensibilidade desse índice.

Ao analisar as bandas espectrais, observou-se que a banda B5 melhor se correlacionou com a variável florestal em ambas as idades de análise, apresentando r no valor de -0,7774, -0,8294 e 0,6802 aos 4, 18 e 23 anos, respectivamente. Esses resultados são consistentes com os encontrados por Goergen (2014), Berra (2013), Pacheco et al. (2012) e Orué (2002). A faixa espectral compreendida pela banda B5 apresenta alta reflectância para a vegetação, o que proporciona maior sensibilidade às mudanças ocorridas na cobertura florestal, exibindo maior relação com as variáveis biofísicas.

A região do visível, representada pelas bandas B2, B3 e B4, de modo geral, apresentaram baixa correlação com o volume florestal estocado a campo nas idades de análise. Essas bandas são mais propensas aos efeitos atmosféricos, sendo comum conter ruídos nos valores de radiância (CHANDER, 2004).

Para os povoamentos com idade de 4 e 18 anos, a banda B5 apresentou relação inversa, desse modo o aumento do volume propiciou a diminuição da reflectância nessa faixa espectral. No entanto, aos 23 anos grande parte das variáveis espectrais demonstraram relação direta, o que evidenciou uma associação variável, influenciada pela idade e características da cobertura do dossel.

Goergen (2014) ao estabelecer a relação da banda B5 com o volume proveniente de povoamentos de *E. dunnii* e *E. urograndis* constatou associação variável em função das espécies relacionadas. Assim, a região infravermelho próximo pode apresentar tanta relação inversa quanto direta, porém Pühr e Donoghue (2000) reportam a relação inversa à presença de sub-bosque e/ou sombreamento.

Com base na análise visual e nos dados mensurados a campo, observou-se que aos 4 anos, os povoamentos apresentam grande densidade populacional, sendo de aproximadamente 1200 ind/ha. A inexistência de raleio ou tratamentos silviculturais desencadeou pontos de sombreamento nos estratos inferiores e por vezes, em indivíduos adjacentes. Nessas condições, observou-se que o aumento do volume propicia a diminuição da reflectância na faixa do infravermelho próximo. Esse comportamento pode estar associado às características de reflexão das folhas sombreadas, as quais segundo Ponzoni (2002), possuem menores espaços de ar na estrutura interna, o que reduz a reflectância da REM nessa faixa espectral.

Aos 18 anos, os dados de campo exibiram crescimento dissimilar (diferenças significativas na altura dos indivíduos dentro das UAs) em função da heterogeneidade dos sítios, assim como a presença de pontos de alagamento temporário. Desse modo, mesmo em relevo plano, esses povoamentos apresentaram pontos de sombreamento decorrentes de diferentes estratos.

A partir da existência de diferentes estratos horizontais, os indivíduos dominantes projetam suas copas acima de uma cota média do dossel, acarretando sombreamento daquelas posicionadas a baixo (PONZONI, 2002). As diferenças no crescimento dos indivíduos podem ser observadas na Figura 13.

Figura 13 – Representação do interior dos talhões de *E. grandis* com crescimento dissimilar dos indivíduos amostrados



Fonte: Autora.

No entanto, aos 23 anos, os povoamentos apresentaram comportamento distinto dos anteriores, sendo parte atribuída às práticas de manejo realizadas e parte aos fenômenos naturais ocorridos ao longo do tempo. Desse modo, esses

povoamentos caracterizam-se por maior espaçamento entre as copas e pela presença de falhas no dossel, o que permitiu maior influência do plano de fundo na resposta espectral. Essas características podem ser observadas na Figura 14, a qual demonstra um dossel com a presença de lacunas.

Figura 14 – Ilustração do dossel dos povoamentos de *E. grandis*



Fonte: Autora.

A incidência de ventos fortes na região, associado a raízes pouco profundas e porte elevado, desencadeou na área de estudo tombamentos de indivíduos no interior dos talhões (Figura 15). Outro fator contributivo para a existência de espaços no

dossel é a presença de alagamentos temporários, afetando o desenvolvimento dos indivíduos nessas áreas, e por vezes, ocasionando a mortalidade dos mesmos.

Figura 15 – Exemplar de *E. grandis* aos 23 anos tombado em função dos ventos fortes



Fonte: Autora.

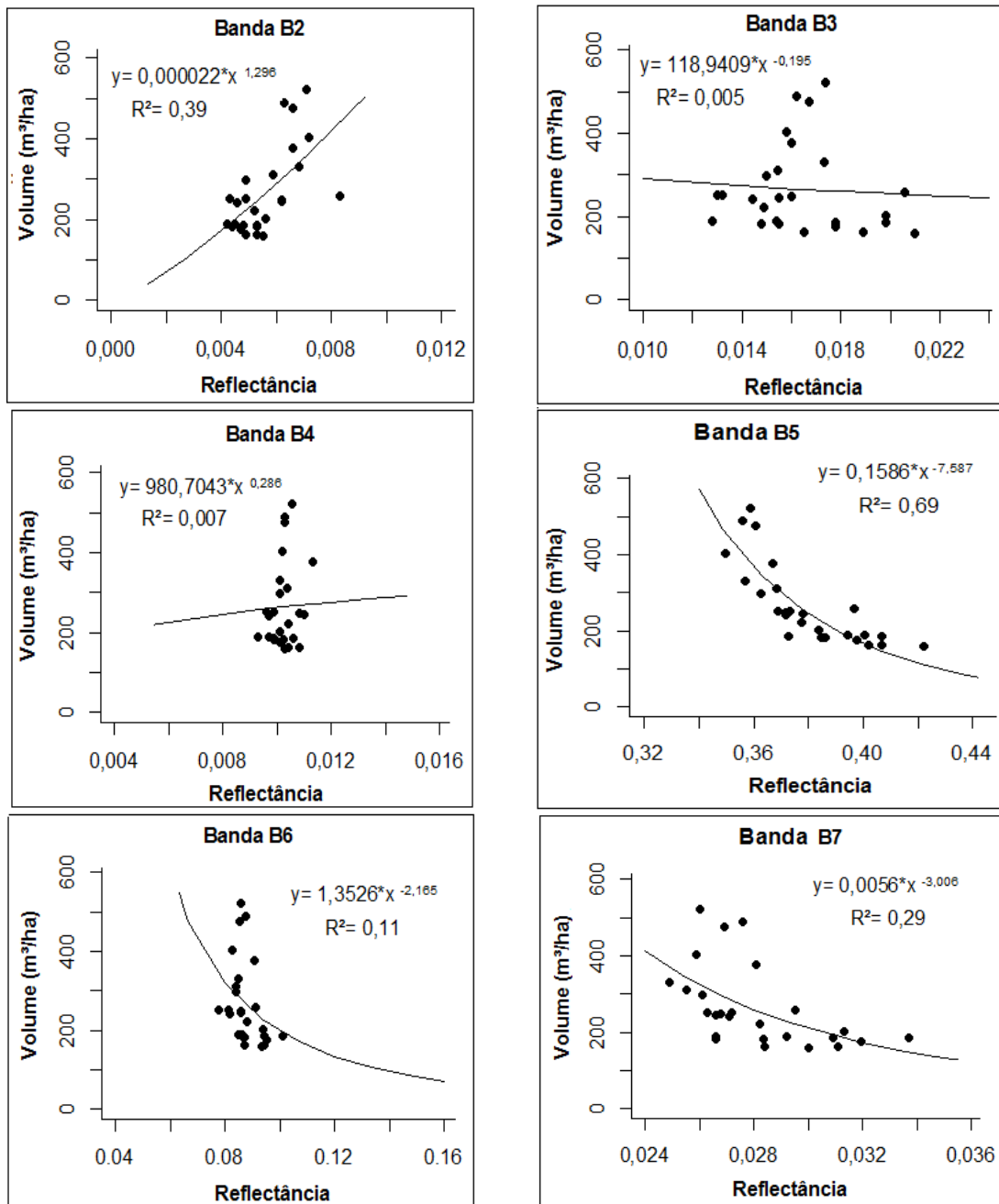
Observou-se que aos 23 anos, os povoamentos apresentaram menor correlação, quando comparada às demais idades, podendo ser atribuído ao estado fisiológico que os povoamentos se encontram. Assim, os valores de r referente às bandas e índices de vegetação a partir deste estágio fisiológico decresceram, sendo que uma explicação plausível é a saturação do sinal na reflectância armazenada pelo sensor, assim como observado por Povh et al. (2008). Isso mostra a presença de

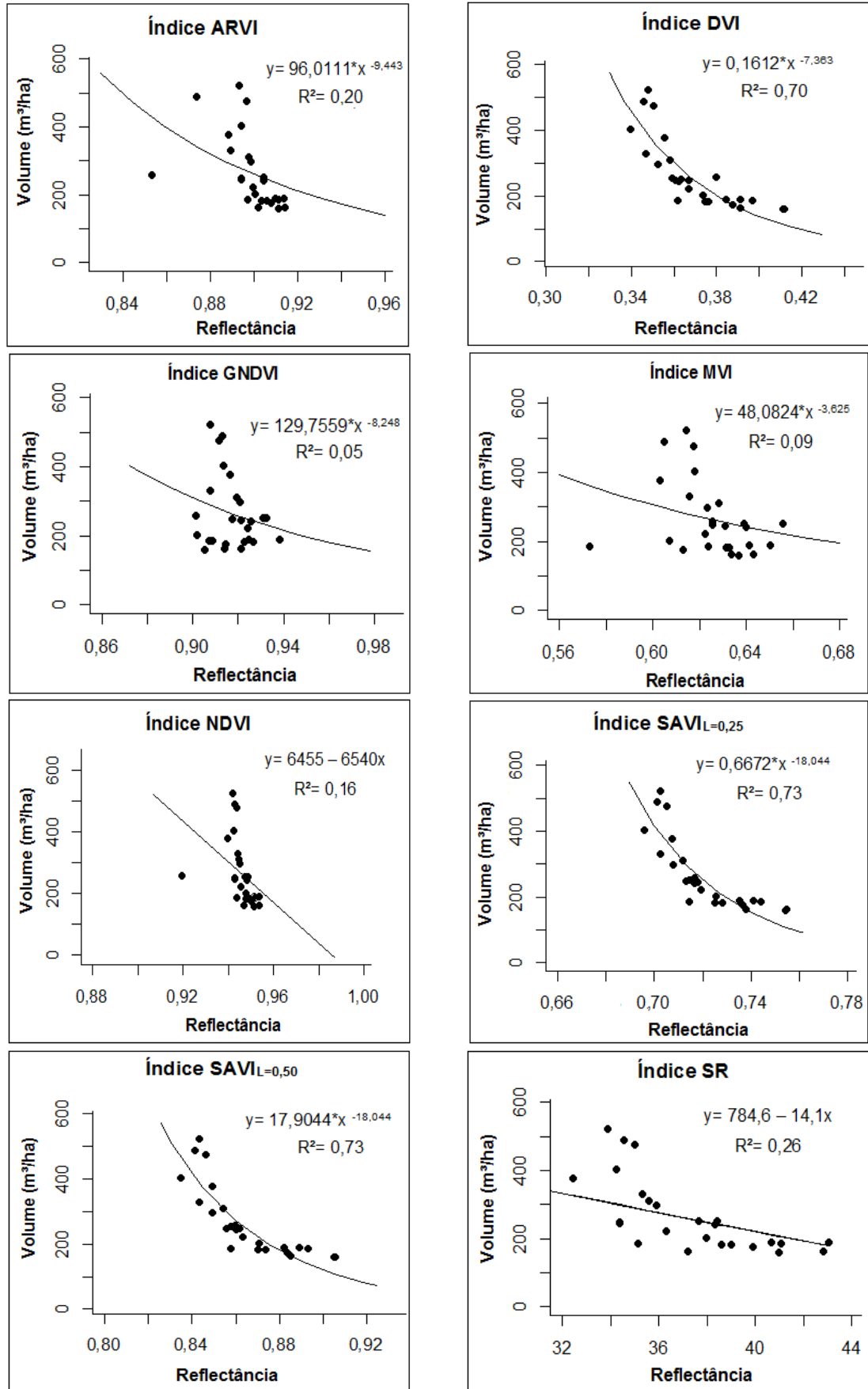
maiores erros na identificação das modificações do volume florestal sob esse tratamento e estágio fisiológico.

Os povoamentos adultos de *E. grandis* na área de estudo, de modo geral, apresentam uma estrutura de copa com menor concentração de folhas verdes, quando comparado aos indivíduos jovens com alta atividade fotossintética (PONZONI et al., 2015), uma vez que há um grande incremento em altura e posteriormente em diâmetro. Entretanto, à medida que se aproxima da fase de estagnação ou estabilidade do crescimento, a demanda de nutrientes dos povoamentos, assim como a assimilação de CO² reduz consideravelmente, sendo apenas o necessário à manutenção de sua estrutura. Desse modo, esse processo, interfere na quantidade de folhas presentes no dossel e, conseqüentemente na interação com a REM incidente sobre o dossel.

As variáveis espectrais foram modeladas a partir de equações de regressão simples, a fim de estabelecer o grau de ajuste entre os dados oriundos da imagem e os obtidos a campo, elaborando-se gráficos de dispersão. Em povoamentos com 4 anos de idade, apenas as variáveis B2, B5, B7, DVI, SAVI e SR ajustaram-se as funções testadas, demonstrando significância. A Figura 16 demonstra relação das bandas e índices de vegetação com o volume florestal.

Figura 16 – Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e as variáveis espectrais de *E. grandis* aos 4 anos de idade





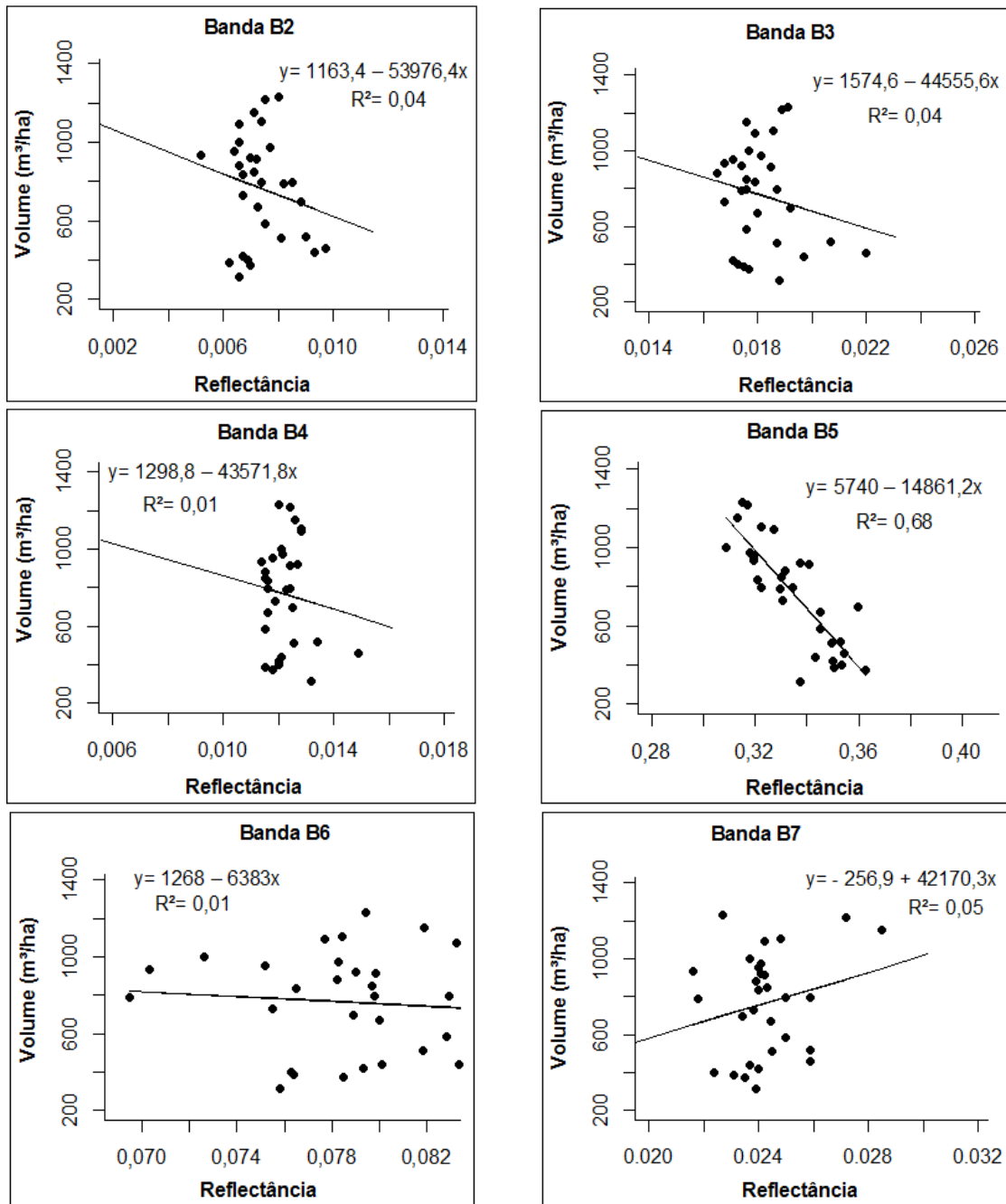
Embora estar associado à alta densidade, conforme enfatizado anteriormente, nota-se que nesses povoamentos, há a influência do solo na resposta espectral, sendo essa relação comprovada pelo ajuste do índice SAVI na equação entre os pares de dados. Huete et al. (1985) avaliou a influência do solo na resposta espectral em relação a diferentes graus de cobertura, constatando que esse fator interfere não apenas em dosséis pouco densos, como também em dosséis com cobertura vegetal densa. Desse modo, o SAVI apresentou o maior R^2 , expressando um ajuste na equação exponencial de 0,73, sendo esse, indiferentemente do grau de cobertura florestal ajustado a constante L incluída em sua formulação.

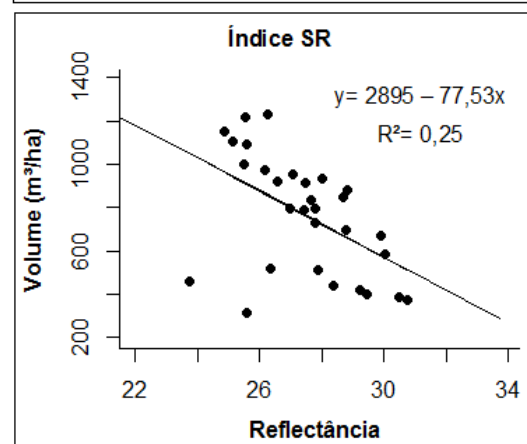
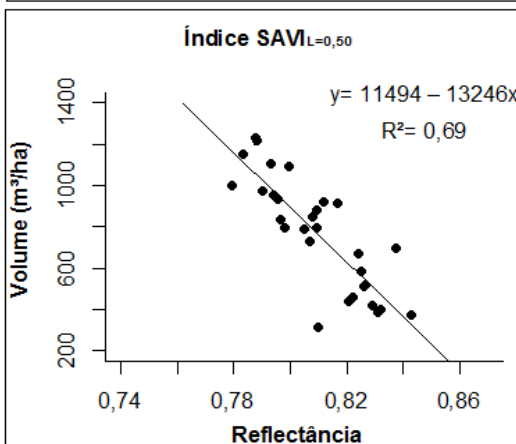
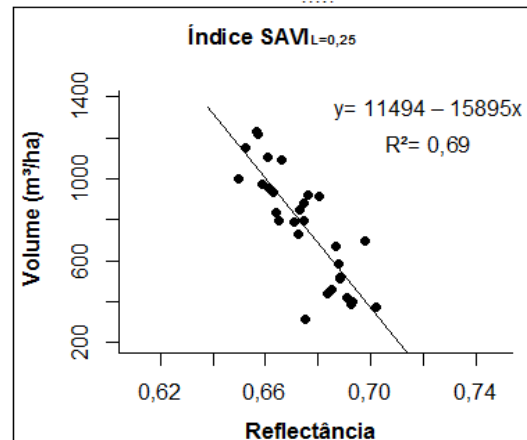
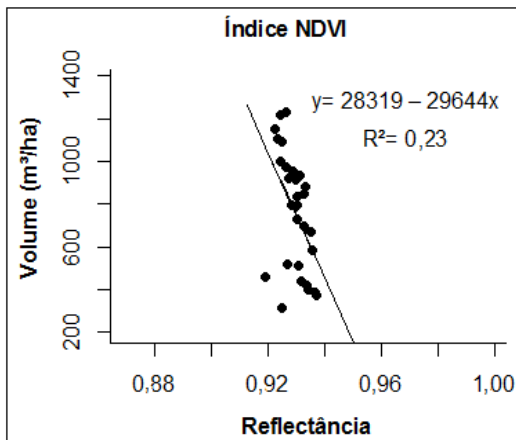
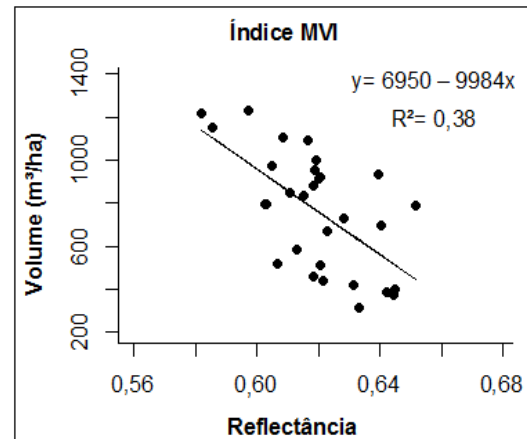
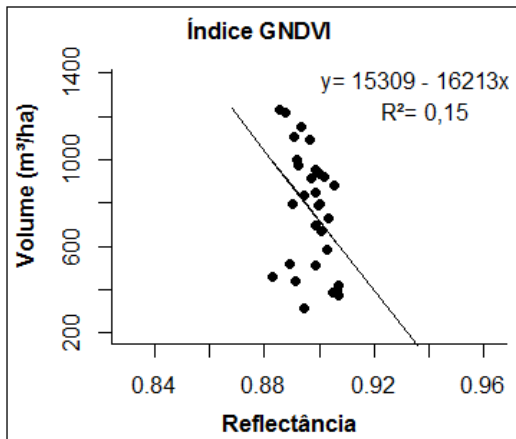
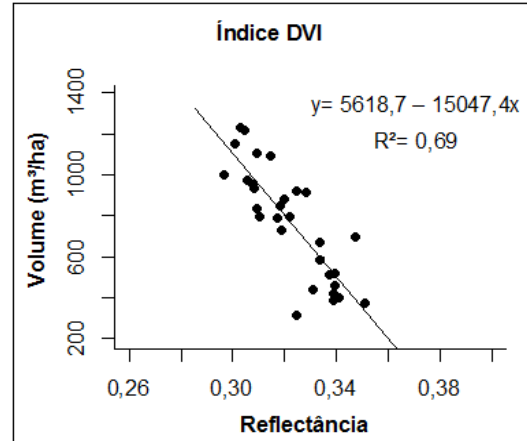
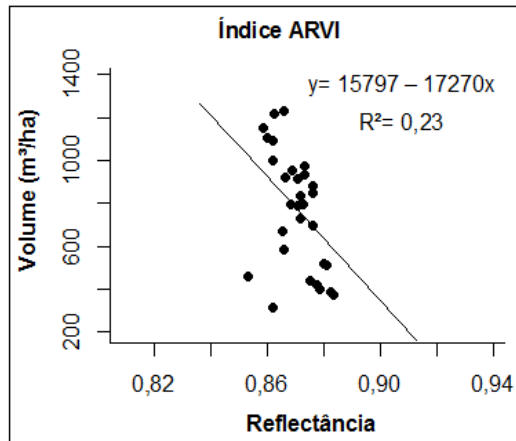
Do mesmo, em estudos desenvolvidos por Cassol (2013), Maciel (2002) e Bernardes (1998), o índice SAVI destacou-se das demais variáveis espectrais quando estabelecido a relação com a biomassa florestal de uma Floresta Ombrófila Mista, a qual apresenta grande densidade populacional. Esses autores, juntamente com o presente estudo, reforçam a influência do brilho do solo na resposta espectral, mesmo em dosséis fechados e com grande densidade de indivíduos.

O índice DVI mostrou ajustar-se à variável florestal, explicando 70% da variabilidade do volume para essa idade, seguido da banda B5 com R^2 de 0,69. No entanto, a banda B2 e o índice SR englobaram as maiores dispersões, demonstrando que para esses povoamentos, essas variáveis isoladas não conseguem descrever, satisfatoriamente, a variabilidade dos dados.

Para os povoamentos aos 18 anos, os gráficos de dispersão estão expostos na Figura 17, de modo que as bandas B2, B3, B4 e B6 não apresentaram relação significativa ao nível de confiança de 99%. Já dentre os índices de vegetação, com exceção do GNDVI, os demais apresentaram relação significativa com o volume florestal. O índice ARVI e o NDVI exibiram relação significativa, porém não se ajustaram as funções testadas.

Figura 17 - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e as bandas multiespectrais de *E. grandis* aos 18 anos de idade





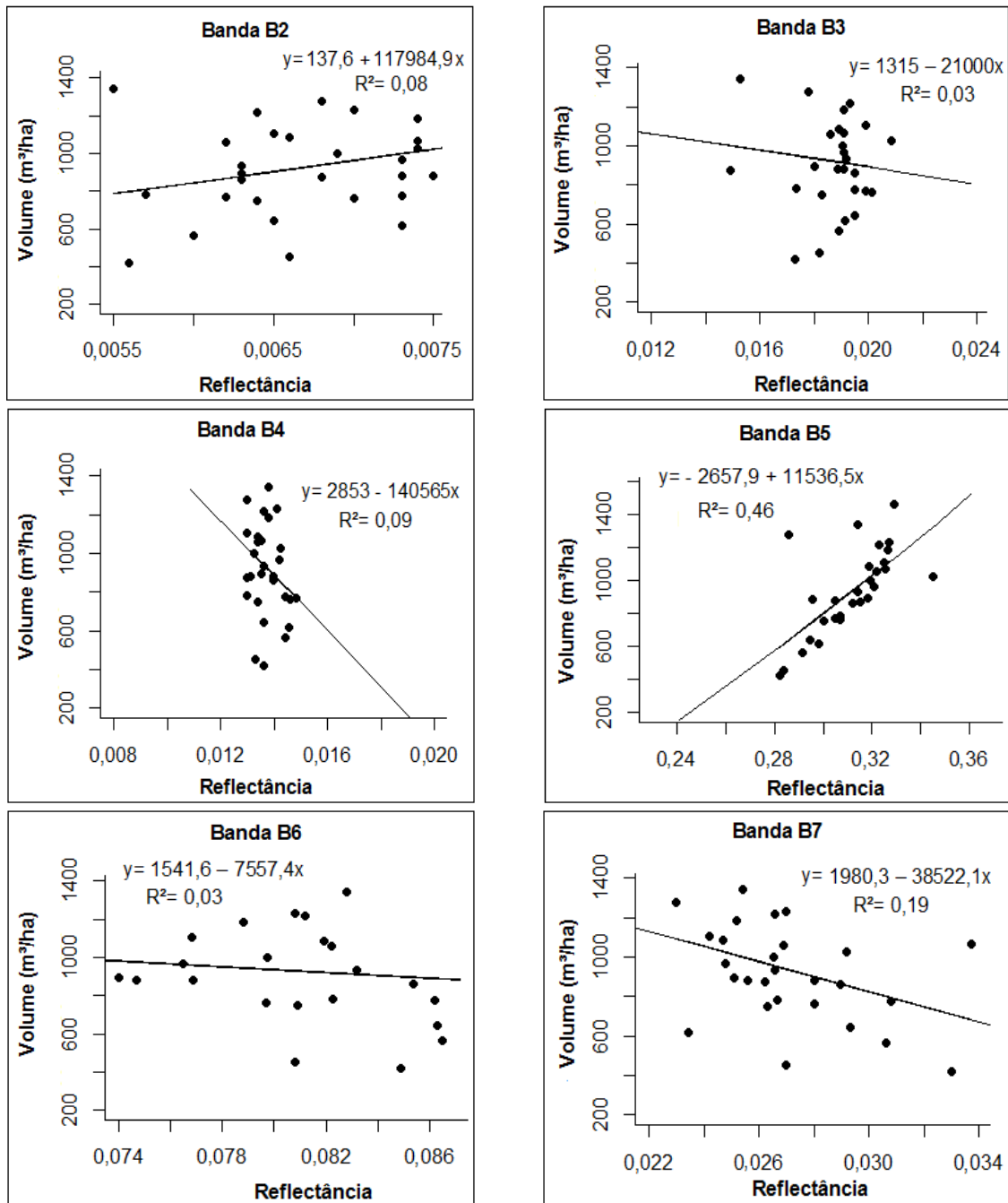
Observou-se que os pontos mais dispersos nos gráficos correspondem a UA's localizadas próximas as bordas dos talhões. Os indivíduos dessas posições apresentam características diferenciadas e com isso gerou maior dispersão nos valores de reflectância, sendo esses efeitos mais influentes nos índices SAVI e SR.

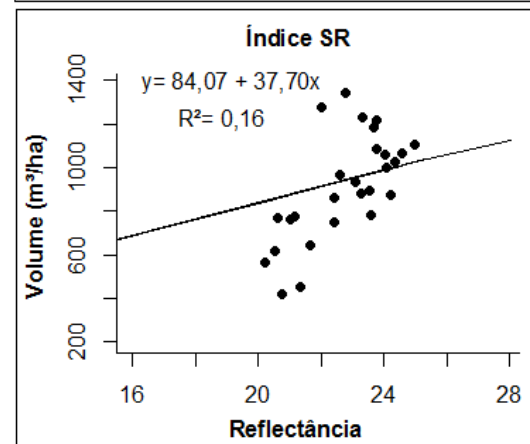
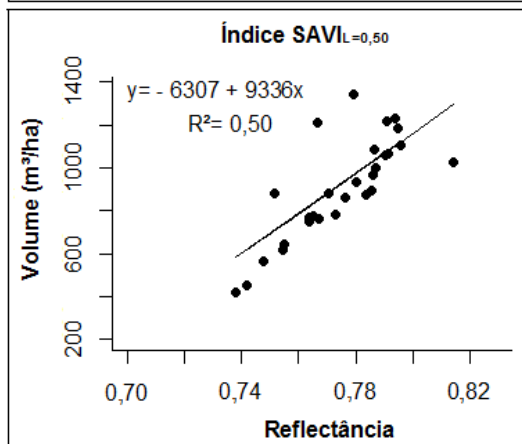
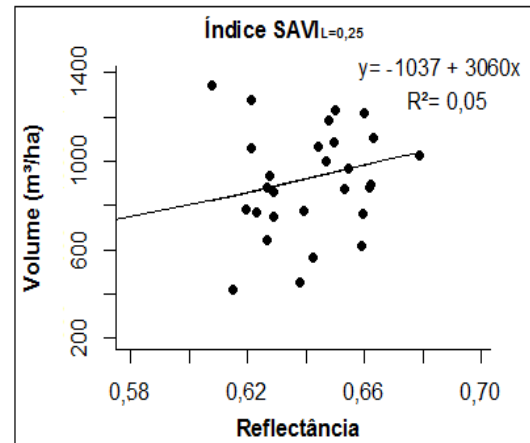
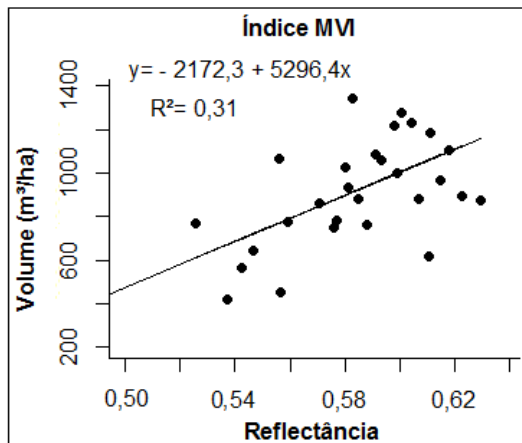
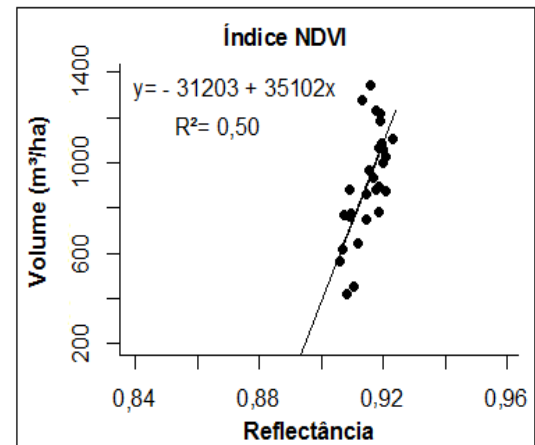
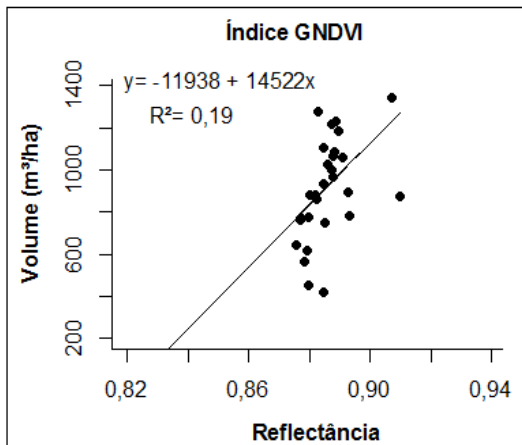
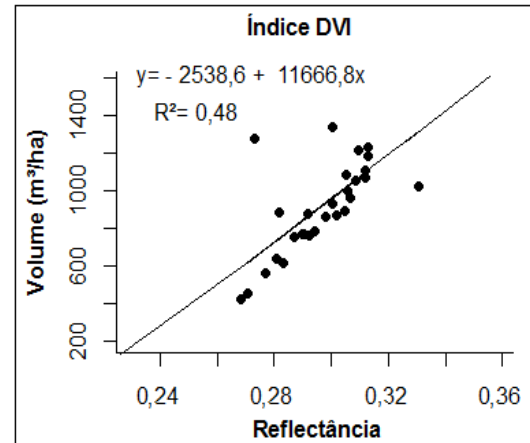
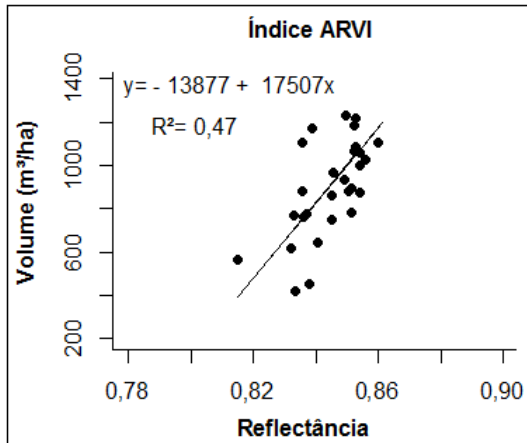
As menores dispersões entre os dados espectrais foram encontradas nos índices DVI e SAVI, os quais apresentaram um ajuste do modelo linear de $R^2= 0,69$, seguido da banda B5 com um ajuste de $R^2= 0,68$. A transformação radiométrica compreendido pelo DVI demonstrou englobar um pequeno acréscimo no ajuste, quando comparado à banda B5 isolada. O índice SAVI ao relacionar a banda B5 e B4, incluindo uma constante que visa minimizar os efeitos do solo na radiância, apresentou resultados igualmente elevados.

A relação positiva ou negativa apresentada pelos índices de vegetação nas diferentes fases fisiológicas reporta ao comportamento da banda B5, uma vez que em suas formulações, essa é a variável de maior importância (valores superiores de reflectância). Assim, os índices tendem a seguir o padrão estabelecido pela mesma.

A Figura 18 demonstra os gráficos de dispersão resultante da relação entre o volume e as variáveis espectrais quando realizado o ajuste da equação linear aos dados obtidos de povoamentos de *E. grandis* aos 23 anos. Entretanto, as bandas que compõem a região do visível e a banda do IVM não apresentam relação significativa ao nível de confiança de 99%. Quanto aos índices de vegetação, o SR foi a variável espectral que não apresentou significância com o volume de madeira nesta faixa etária ao nível de confiança de 99%.

Figura 18 - Gráficos de dispersão entre o volume de madeira e as bandas multiespectrais de *E. grandis* aos 23 anos de idade





Os índices NDVI e $SAVI_{L=0,50}$ demonstraram resultados superiores com R^2 de 0,50, seguidos dos índices DVI e ARVI, os quais apresentaram R^2 no valor de 0,48 e 0,47, respectivamente. A resposta espectral da banda B5 demonstrou um ajuste regular, respondendo isoladamente a 46% da variabilidade do volume aos 23 anos.

Estudos desenvolvidos por Xavier (1998) e Watzlawick et al. (2009) relacionaram a resposta dos índices NDVI e SAVI na estimativa dos parâmetros biofísicos IAF e biomassa. Para os autores, o índice SAVI exibiu melhores correlações em ambos os estudos, evidenciando melhor relação com as variáveis florestais a campo.

Pacheco et al. (2013) relacionaram as bandas espectrais do satélite Landsat 5/TM com as variáveis dendrométricas de *Eucalyptus* sp. e obtiveram modelos de estimativas da altura, DAP e densidade, sendo esses compostos apenas pela banda B5, a qual respondeu satisfatoriamente a variabilidade dos dados. Do mesmo modo, em estudo desenvolvido por Cassol (2013), a banda B5 apresentou resultados superiores na estimativa da biomassa e carbono florestal a partir de dados do sensor LISS III ($R^2= 0,51$).

4.2.2 Povoamentos de *P. elliottii*

O comportamento das variáveis espectrais dos povoamentos de *P. elliottii* foi conhecida por meio da análise exploratória dos dados, desse modo a maior amplitude entre as bandas espectrais considerando a idade de 9 e 10 anos está associada as bandas B5 e B6. Dentre os índices de vegetação os dados oriundos do índice SR, demonstram incluir maior variação que os demais. A Tabela 10 demonstra a análise descritiva dos dados apresentados pelas bandas individuais e índices de vegetação referentes à *P. elliottii*.

Tabela 10 - Análise descritiva da resposta espectral das bandas e índices de vegetação em povoamentos de *P. elliotii*

	B2	B3	B4	B5	B6	B7	ARVI	DVI	GNDVI	MVI	NDVI	SAVI ₂₅	SAVI ₅₀	SR	
9 anos	Mediana	0,0058	0,023	0,011	0,269	0,062	0,024	0,860	0,258	0,844	0,627	0,922	0,608	0,730	24,487
	Média	0,0060	0,023	0,011	0,268	0,062	0,024	0,857	0,257	0,843	0,623	0,920	0,607	0,729	24,230
	Mínima	0,0040	0,021	0,010	0,259	0,056	0,021	0,806	0,244	0,830	0,555	0,889	0,581	0,698	17,201
	Máxima	0,0079	0,025	0,015	0,277	0,074	0,031	0,873	0,266	0,861	0,654	0,929	0,620	0,744	27,323
	Amplitude	0,0039	0,004	0,005	0,018	0,018	0,010	0,067	0,022	0,031	0,099	0,040	0,038	0,046	10,122
	Des. Padrão	0,0008	0,001	0,001	0,005	0,004	0,002	0,015	0,005	0,008	0,022	0,009	0,009	0,011	2,418
	CV (%)	13,79	4,89	10,73	1,73	6,22	9,48	1,79	2,10	0,97	3,55	1,00	1,44	1,44	9,98
10 anos	Mediana	0,0056	0,021	0,009	0,282	0,056	0,021	0,884	0,273	0,859	0,665	0,934	0,631	0,758	30,660
	Média	0,0055	0,021	0,009	0,283	0,057	0,021	0,884	0,273	0,860	0,663	0,936	0,630	0,756	30,609
	Mínima	0,0036	0,017	0,001	0,269	0,053	0,019	0,871	0,260	0,846	0,606	0,927	0,614	0,737	26,533
	Máxima	0,0071	0,023	0,011	0,293	0,068	0,025	0,898	0,283	0,878	0,686	0,946	0,643	0,772	35,772
	Amplitude	0,0035	0,006	0,009	0,023	0,015	0,006	0,027	0,023	0,032	0,080	0,018	0,029	0,034	9,239
	Des. Padrão	0,0008	0,001	0,002	0,005	0,004	0,002	0,007	0,006	0,008	0,018	0,005	0,007	0,009	2,537
	CV (%)	15,08	6,27	19,04	1,77	6,32	8,03	0,78	2,11	0,99	2,78	0,54	1,15	1,15	8,29

Amplitude = máxima – mínima;
CV% = coeficiente de variação.

A banda do azul (B2) apresentou a menor amplitude dentre as bandas multiespectrais do sensor OLI. Orué (2002) ao relacionar as bandas do sensor ETM+ obteve resultados similares, demonstrando que as bandas do azul e verde concentram as menores amplitudes. Quanto aos índices de vegetação, o DVI apresentou o menor intervalo entre os dados para povoamentos aos 9 e 10 anos. No entanto, a maior dispersão aos 9 anos foi encontrada na B2, uma vez que possui o maior coeficiente de coeficiente de variação (CV%= 13,79). Já aos 10 anos, a banda B4 englobou maior variação nos dados, apresentando 19,04% de CV.

A Tabela 11 demonstra a correlação do volume florestal com a resposta espectral obtida pelas bandas e índices de vegetação do sensor OLI. Percebe-se que para povoamentos de *P. elliotii* em ambas as idades, as variáveis espectrais referentes a banda B5 e índices de vegetação exibiram relação direta com o volume. Berra (2013) e Orué (2002) encontraram resultados similares ao analisar a correlação de povoamentos de *Pinus* spp. com dados espectrais oriundos de sensores remotos multiespectrais.

Tabela 11 – Análise de correlação de Pearson entre o volume e a reflectância das bandas espectrais e índices de vegetação dos povoamentos de *P. elliottii*

Variável	<i>P. elliottii</i>	<i>P. elliottii</i>
	(9 anos)	(10 anos)
V (m ³ /ha)		
B2	-0,1329	0,0077
B3	-0,4000	-0,1318
B4	-0,3167	0,1958
B5	0,7768**	0,7809**
B6	-0,3991*	0,1486
B7	-0,3740	-0,0558
ARVI	0,3492	0,1318
DVI	0,7400**	0,8234**
GNDVI	0,5791**	0,3724
MVI	0,5261**	0,1091
NDVI	0,3979*	0,2446
SAVI ₂₅	0,6555**	0,7580**
SAVI ₅₀	0,6555**	0,7581**
SR	0,4215*	0,2474

**Correlação significativa ao nível de confiança de 99%;

* Correlação significativa ao nível de confiança de 95%.

O volume florestal nos povoamentos com 9 anos apresentou maior correlação com a banda B5, exibindo um coeficiente de 0,7768. Do mesmo modo, essa faixa espectral apresentou forte correlação com parâmetros florestais em associações realizadas por Pacheco et al. (2012), Orué (2002) e Trotter et al. (1997).

Aos 10 anos o maior valor absoluto de correlação foi obtido pelo índice DVI, sendo esse de 0,8234. Do mesmo modo, esse índice mostrou forte correlação com o volume de *E. grandis*, conforme enunciado anteriormente, demonstrando forte sensibilidade as variações da cobertura florestal para ambas as espécies.

A relação estabelecida entre a banda B5 e o volume florestal foi positiva para ambas as idades. Esse comportamento pode estar atrelado ao fato desses povoamentos apresentarem um dossel semiaberto, o que reduz o sombreamento dos indivíduos. Outro fator contributivo consiste na existência da camada de serapilheira, além dos resíduos da desrama e raleio nas entrelinhas, o que permitiu um contraste entre a classe de fundo e a resposta espectral do dossel.

Assim, o aumento do volume propicia um aumento no valor de reflectância, uma vez que reduz os efeitos do plano de fundo na resposta espectral em decorrência da maior cobertura do dossel, aliado a maior concentração de folhas jovens no dossel (PONZONI et al., 2015). Nesse contexto, Berra (2013) enuncia que para povoamentos

de pinus a ausência de sub-bosque, pouco sombreamento, camada de serapilheira constante e um dossel semiaberto, possibilita que a reflectância na banda B5 aumente de acordo com o aumento do volume.

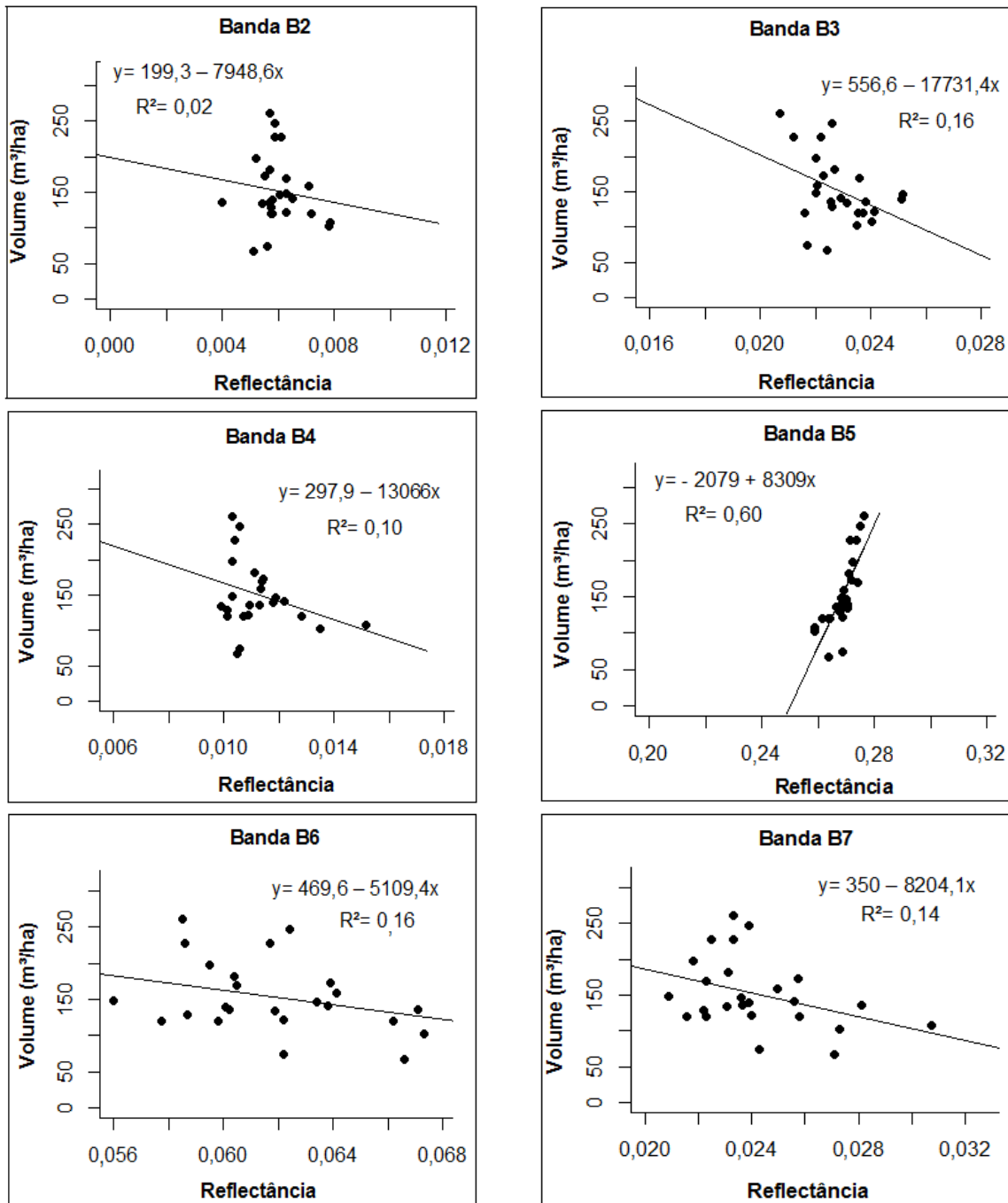
Ao analisar as idades, observou-se que os dados espectrais apresentaram correlação superior com o volume de madeira aos 10 anos de idade, expondo um valor de r referente a 0,8234, já a maior correlação aos 9 anos foi de 0,7768. Os povoamentos aos 9 anos caracterizam-se por apresentar maior disparidade no crescimento dos indivíduos em decorrência das variações na qualidade do sítio e maior incidência de áreas com alagamento temporário, o que propiciou menor fechamento do dossel, assim como falhas nos povoamentos.

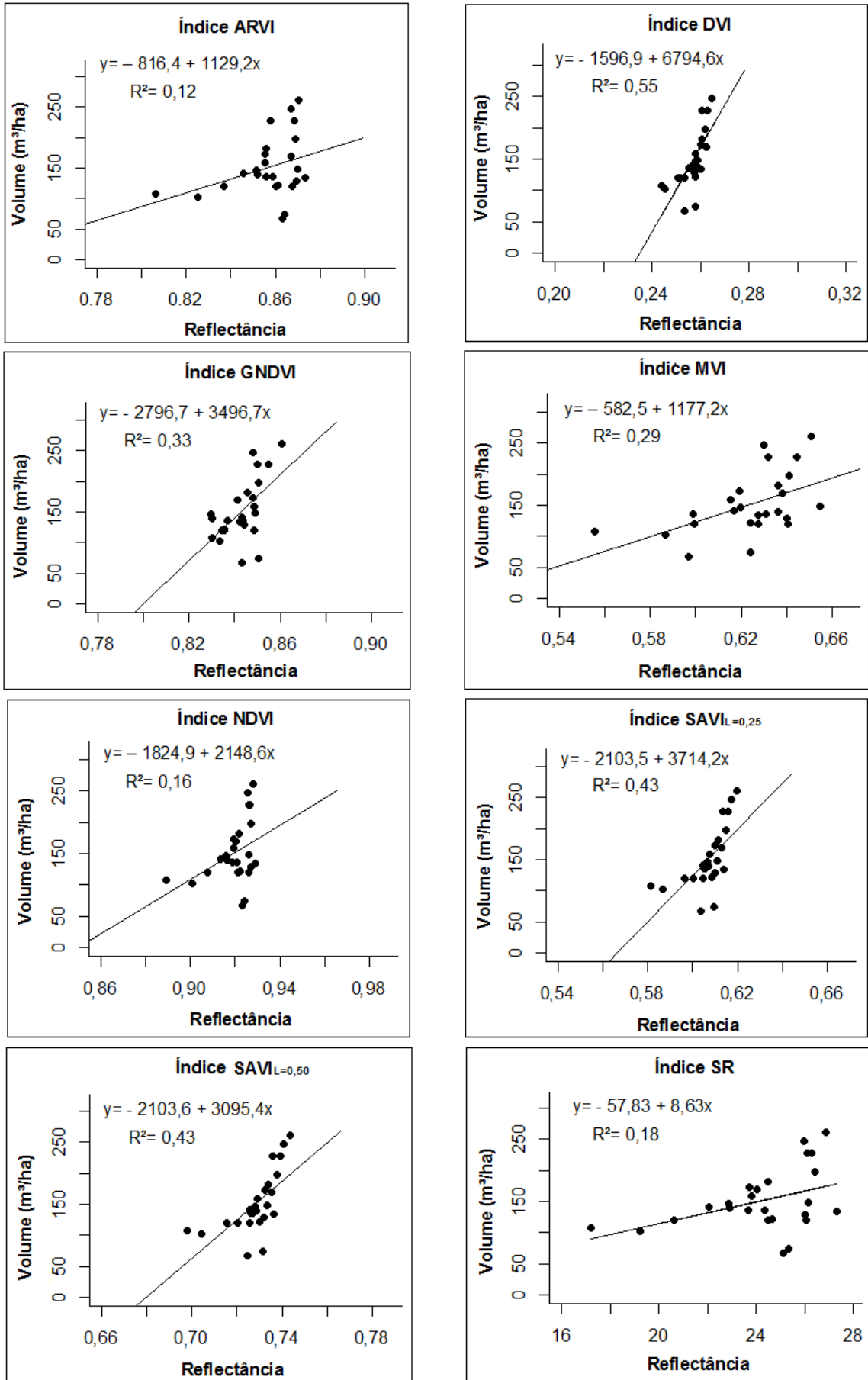
A maior interação da serapilheira e resíduos florestais contendo umidade na resposta espectral dos povoamentos aos 9 anos, gerou correlação significativa do índice MVI com o volume florestal, uma vez essa variável é sensível a umidade, detectando diferenças no comportamento da vegetação em função desta. A amostragem de UAs em locais com influência da umidade no crescimento dos indivíduos foi detectado pelo MVI, interferindo na relação desse índice com a variável de campo, o qual apresentou correlação significativa no valor de 0,5261. O imageamento e a coleta dos dados ocorreram na estação chuvosa (inverno), o que propiciou maior acúmulo de umidade no plano de fundo nas áreas predispostas.

Ao exemplo do MVI, os índices GNDVI, NDVI e SR exibiram relação significativa apenas aos 9 anos. Assim, as condições específicas desses povoamentos favoreceram a correlação desses índices de vegetação, os quais se mostram sensíveis às variações do volume em função da qualidade do sítio e/ou umidade.

A relação entre os dados espectrais e a variável florestal dos povoamentos aos 9 anos foi conhecida com base na regressão simples, de modo que os resultados estão expostos na Figura 19. Dentre as variáveis espectrais que apresentaram relação significativa ao nível de confiança de 99% com o volume está a banda B5 e os índices DVI, GNDVI, $SAVI_{L=0,25}$, $SAVI_{L=0,50}$ e SR.

Figura 19 – Gráficos de dispersão no ajuste da equação linear em povoamentos de *P. elliotii* aos 9 anos





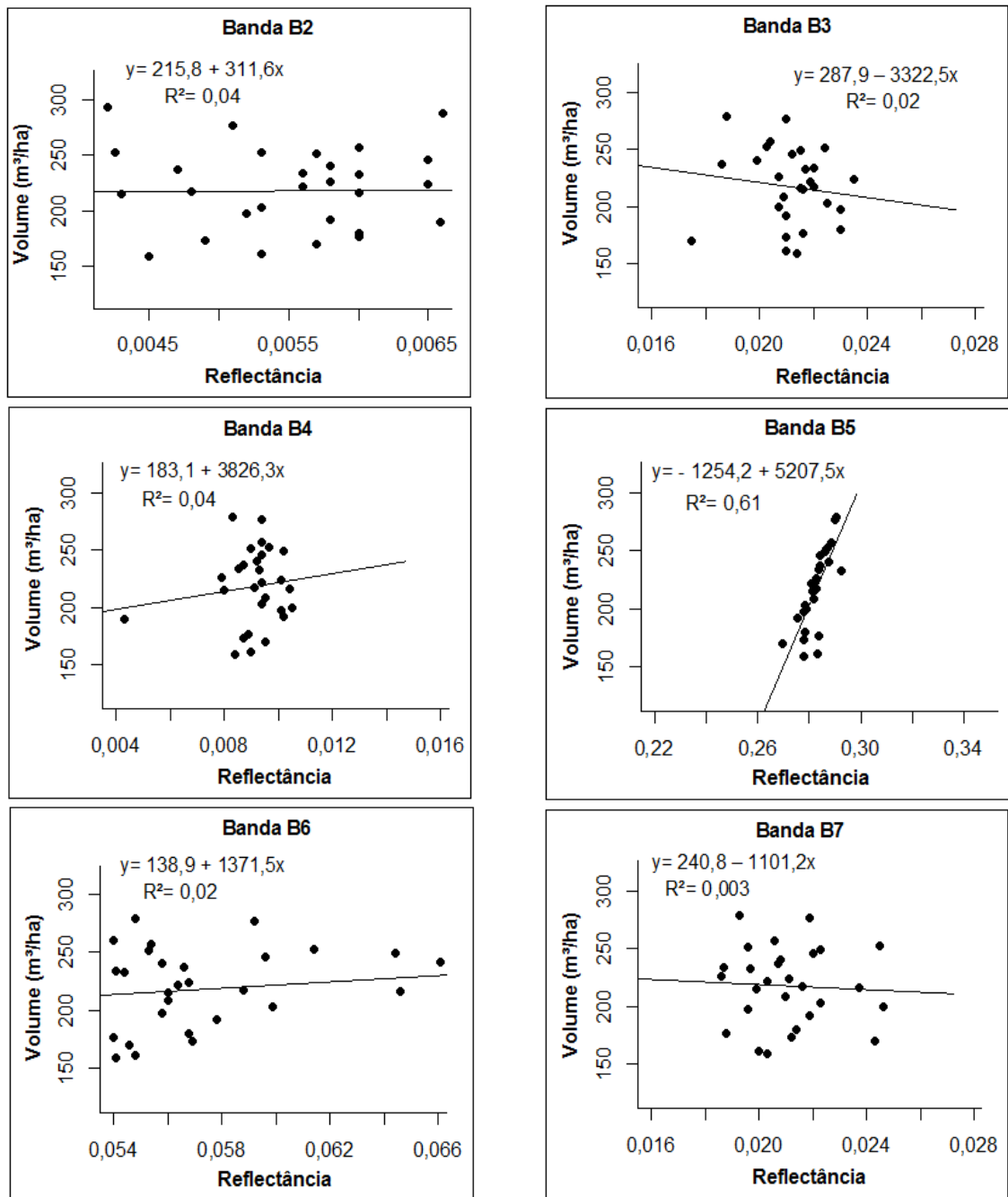
Fonte: Autora.

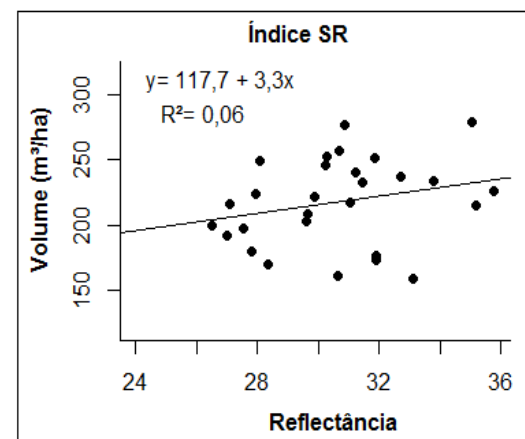
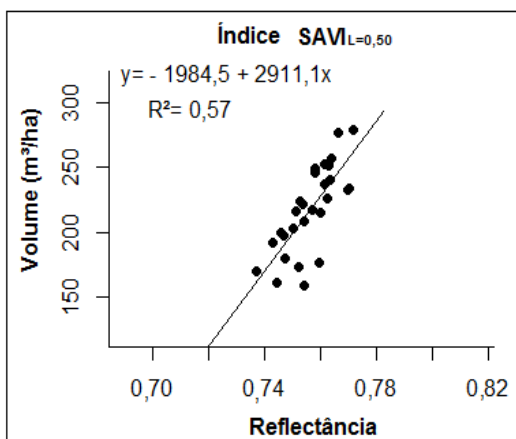
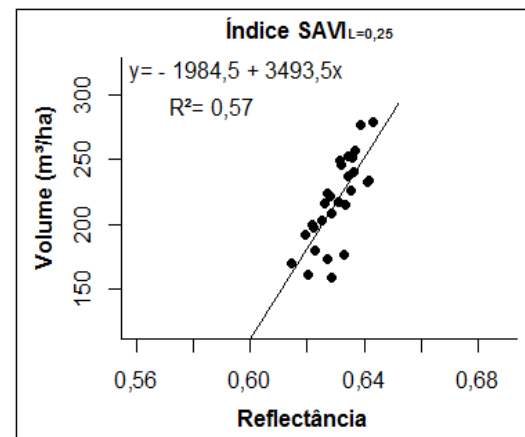
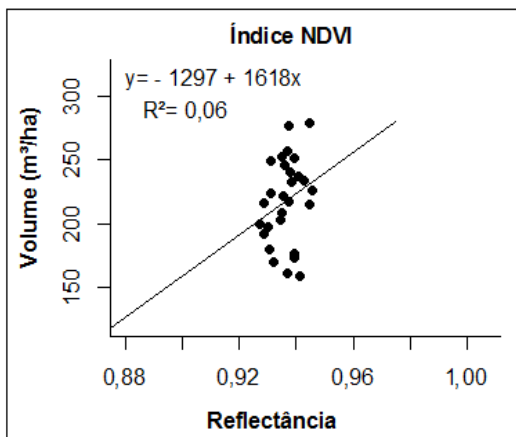
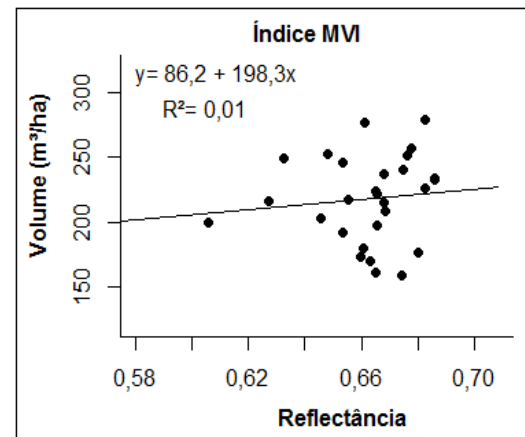
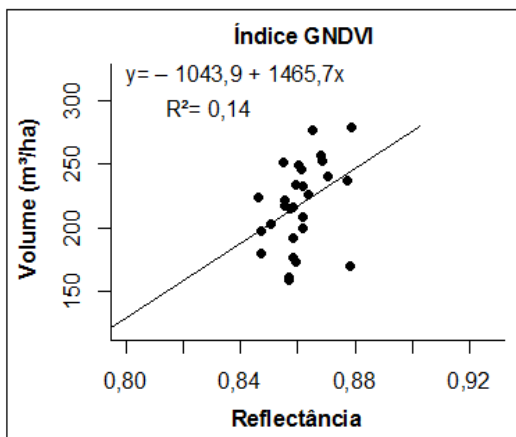
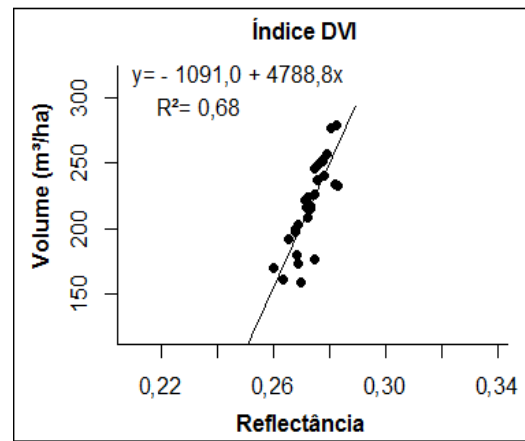
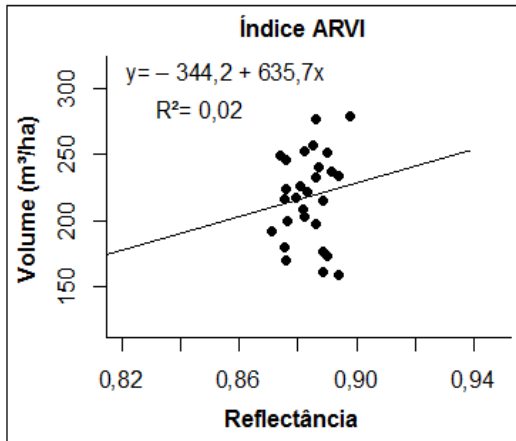
Com base na análise gráfica e no valor do R^2 , observa-se que o comprimento de onda referente a banda B5 apresentou melhor relação linear com o volume ($R^2=0,60$). Esse resultado condiz com os expostos na Tabela 11, a qual demonstra forte correlação com a variável de estudo.

O volume de madeira estocado aos 9 anos variou de 50 a 250 m^3/ha . Nesses povoamentos aos 6 anos de idade, Berra (2013) estabeleceu a relação do volume com dados dos sensores LISS-III e TM, o qual obteve melhores associações com a banda B6, apresentando R^2 de 0,64 e 0,62, respectivamente.

A Figura 20 demonstra o ajuste da reta de regressão das variáveis espectrais na caracterização do volume em povoamentos aos 10 anos de idade. Para esses povoamentos, as variáveis espectrais que apresentaram correlação significativa com o volume foram: a banda B5 e os índices DVI, $SAVI_{L=0,25}$ e $SAVI_{L=0,50}$.

Figura 20 – Gráficos de dispersão no ajuste da equação linear em povoamentos de *P. elliotii* aos 10 anos





O índice DVI apresentou o melhor ajuste da regressão linear, explicando 68% da variabilidade dos dados, seguido da banda B5, a qual demonstrou englobar um R^2 de 0,61. Observa-se por meio dos gráficos de dispersão que os valores de reflectância apresentaram um acréscimo em relação ao aumento do volume, exibindo uma relação direta, reportando a análise da reflectância aditiva em função do aumento de estratos e com isso maior reflexão nessa faixa espectral.

A interferência do solo ou da vegetação do plano de fundo na caracterização das propriedades biofísicas e dada como positiva por diversos estudos (ARDÖ, 1992; BERRA, 2013; CARREIRAS et al., 2006;). Nos valores de radiância armazenados pelos sensores orbitais, o solo proporciona um contraste com o dossel da vegetação, o que permite a diferenciação das características por meio de dados espectrais. Outro fator relevante na análise da resposta espectral do dossel é a presença de sombreamento, sendo que esse, atua de forma negativa, mascarando o sinal lido pelos sistemas orbitais (ARDÖ, 1992).

Todavia, quando comparado os povoamentos de 9 e 10 anos, observa-se que com o aumento da idade e, conseqüentemente desenvolvimento do dossel, os dados espectrais melhor representam a variabilidade do volume florestal estocado a campo. Os povoamentos de *P. elliotii* estão em pleno desenvolvimento e agregação de valor comercial, uma vez que, comumente, a idade de rotação dessa espécie é a partir dos 20 anos. Assim, com o crescimento dos povoamentos e aumento da concentração de folhas no dossel, comprovou-se o melhor ajuste da reta de regressão. Esses resultados contradizem estudos realizados por Wink et al. (2012), os quais afirmam que os dados espectrais não apresentam relação com o aumento da cobertura de copa e com o crescimento em volume.

Essa espécie foi implantada nessa região destinando-se a contenção do avanço das áreas de arenização, além de caracterizar uma opção para agregar valor em solos rasos e com formação quartzarênica. Devido as características, especialmente edáficas, o crescimento dessa cultura é inferior quando comparada a indivíduos implantados em condições ideais de desenvolvimento.

4.3 ANÁLISE DE REGRESSÃO

4.3.1 Povoamentos de *E. grandis*

Para a análise de regressão linear múltipla foram incluídas como variáveis independentes as bandas espectrais e índices de vegetação na forma original e transformada. As variáveis selecionadas pelo método *Stepwise* no processo de modelagem do volume para povoamentos de *E. grandis* estão expostas na Tabela 12.

Tabela 12 – Modelos de melhor ajuste para povoamentos de *E. grandis* aos 4, 18 e 23 anos

Idade	Nº	Equação	S _{yx}	R ² _{aj}	IF	F
4 anos	1	V= - 183685 – 164767*ln(SAVI _{L=0,50}) + 221988* (SAVI _{L=0,25})	52,00	0,76	69,83	41,43**
	2	V= 3264,4 – 5596,4*ln(SAVI _{L=0,25}) + 70212,9*B2 + 17,5*SR	53,00	0,75	65,50	26,61**
	3	V= - 285,16 – 3795,8*ln(SAVI _{L=0,50})	66,38	0,62	105,31	40,95**
18 anos	4	V= 11494 – 15895*SAVI _{L=0,50}	154,1	0,68	244,11	63,48**
	5	V= - 4696,9 – 4986,6*ln(B5)	155,1	0,68	247,33	62,28**
	6	V= 27730 – 4960*ln(B3) – 52236*GNDVI	157,8	0,67	247,48	30,07**
23 anos	7	V= - 45337+ 8582*ln(SAVI _{L=0,50}) - 10528*ln(B7) - 2712*ln(SAVI _{L=0,25}) + 340196*(B7)	147,6	0,67	174,17	15,41**
	8	ln(V)= -0,7849 + 13,59*ln(DVI) – 0,98*ln(B7)	-	0,62	204,16	23,89
	9	ln(V)= -31,86 + 42,2*NDVI	-	0,50	304,88	28,84

**Significativo a um nível de confiança de 99%;

V = volume de madeira (m³/ha);

ln = logaritmo neperiano;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

R²_{aj} = coeficiente de determinação ajustado;

IF= Índice de Furnival;

F= valor de significância;

B2 = reflectância da banda do azul;

B3 = reflectância da banda do verde;

B5 = reflectância da banda do IVP;

B7 = reflectância da banda do IVM 2;

DVI = reflectância do índice DVI;

GNDVI = reflectância do índice GNDVI;

SAVI_{L=0,25} = reflectância do índice SAVI_{L=0,25};

SAVI_{L=0,50} = reflectância do índice SAVI_{L=0,50}.

Em relação ao ajuste das equações, as variáveis espectrais incluídas nos modelos de regressão apresentaram relação significativa ao nível de probabilidade de 99%. Observou-se que aos 4 anos de idade, o modelo (Nº1) tendo como variáveis independentes o índice $SAVI_{L=0,50}$ e $SAVI_{L=0,25}$ melhor respondem a variabilidade do volume de madeira estocado, apresentando ajuste na reta de regressão de 0,76. Para esse mesmo modelo, os parâmetros estatísticos compostos pelo erro padrão da estimativa (S_{yx}) e Índice de Furnival (IF) demonstraram um valor de 52,00 m³/ha e 69,83 m³/ha, respectivamente. Goergen (2014) ao modelar o volume com imagens TM obteve R² de 0,48 para povoamentos de *E. dunnii* aos 5 anos, já para *E. urograndis* aos 2,2 anos obteve um R² de 0,57 e 0,45 aos 4,2 anos.

O índice $SAVI_{L=0,50}$ e a banda B5 demonstram grande resposta as variações do volume florestal aos 18 anos, desse modo, os modelos 4 e 5 apresentam um R²_{aj} equivalente no valor de 0,68. Entretanto, o modelo de estimativa contendo o índice $SAVI_{L=0,50}$ englobou menores erros (S_{yx} = 154,1 m³/ha e IF= 244,11 m³/ha) e maior valor de F (63,48), apresentando-se como a melhor variável para estimativa do volume para os povoamentos amostrados aos 18 anos.

As estatísticas de ajuste do volume aos 23 anos indicaram o parâmetro R²_{aj} variando entre 0,50 a 0,67. O modelo selecionado pela *Stepwise* para descrever o volume é composto pelas variáveis $SAVI_{L=0,50}$, $SAVI_{L=0,25}$ e B7, as quais explicaram 67% da variabilidade dos dados com S_{yx} de 147,6m³/ha e IF de 174,17 m³/ha.

Comparando as faixas etárias, observou-se que as estimativas com maior precisão se encontram associadas aos povoamentos de 4 anos, uma vez que o modelo selecionado apresentou menor erro (S_{yx} e IF) e melhor ajuste aos dados de campo (R²_{aj}). Esse resultado corrobora com estudos de diversos autores (BERRA, 2013; GOERGEN, 2014), os quais enfatizam que povoamentos de menor volume, proporcionam melhores estimativas, quando se utilizam dados espectrais como variáveis explicativas. No entanto, esses resultados demonstram que povoamentos desenvolvidos, também permitem a realização da modelagem do volume a partir de dados Landsat 8/OLI.

Mohammadi et al. (2010) correlacionaram dados Landsat 5/TM em florestas nativas situadas no nordeste do Irã, compostas especialmente por carvalhos. O modelo contendo as variáveis *Greenness* e o índice DVI demonstrou englobar um erro de 97,49 m³/ha, R²_{aj} de 0,43 e BIAS de 28,08 m³/ha, sendo o mesmo superior aos demais modelos testados para a estimativa do volume em escala espacial.

Os dados Landsat 5/TM serviram de base para estudos desenvolvidos por Pacheco et al. (2012) na caracterização do dossel de *Eucalyptus spp.* Assim, a banda B5 compôs o modelo de estimativa do DAP, altura total e densidade de plantas, sendo que esses modelos explicaram 61%, 50% e 68% da variabilidade dos dados, respectivamente.

Canavesi et al. (2010) constataram a influência da geometria de iluminação na estimativa do volume para povoamentos de *Eucalyptus spp.* empregando dados hiperespectrais provenientes do sensor Hyperion. Os autores concluíram que a classe pouco iluminada exibiu melhores resultados, sendo que o R^2_{aj} para os modelos em tais condições variou de 0,589 a 0,704.

Hall et al. (2006) ao estimar o volume para povoamentos de coníferas baseando-se em modelos de altura e fechamento de copa, obtiveram R^2_{aj} de 0,65 a partir das bandas 3, 4 e 5 do Landsat 7/ETM+. Esse modelo demonstrou um erro na estimativa do volume para a floresta temperada de 70,3 m³/ha ao utilizar dados espectrais. Thenkabail et al. (2004) utilizando dados do sensor IKONOS e Landsat 7/ETM+ para estimar o volume, encontraram valores de R^2_{aj} que variaram de 0,34 a 0,69.

Leal et al. (2013) estabeleceu a relação entre o volume de *E. urophylla* aos 6,5 anos de idade com os índices de vegetação, sendo esses aplicados aos principais modelos matemáticos disponíveis na literatura. O modelo de melhor ajuste foi o de Dissescu-Meyer, o qual apresentou como variável independente o índice NDVI, englobando $R^2_{aj} = 0,94$. Todavia, os autores ressaltam que esse valor pode ter sido influenciado pela ausência da constante angular, conforme mencionado por Gujarati (2011), o R^2 tende a apresentar valores elevados quando da ausência da constante angular no modelo.

Watzlawick et al. (2009) obtiveram melhores resultados na estimativa do carbono arbóreo do que para a biomassa de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista a partir de imagens IKONOS II. Dessa forma, o modelo ajustado para a biomassa florestal apresentou um R^2_{aj} de 0,73 e 98,43 de S_{yx} , contendo os índices MS-4, NDVI e SAVI como variáveis explicativas. Para estimar o carbono arbóreo as mesmas variáveis foram selecionadas, demonstrando um $R^2_{aj} = 0,75$ e $S_{yx} = 33,21$ m³/ha.

Cassol (2013) ao relacionar os dados provenientes dos sensores TM, ASTER e LISS-III com a biomassa e carbono em florestas de araucária, obteve resultados

satisfatório para ambas as variáveis florestais. Assim, para os sensores ASTER e LISS-III as variáveis biofísicas foram descritas pela banda B5, já para o sensor TM, o índice NDVI foi utilizado como variável preditora.

A verificação das condicionantes de regressão para os povoamentos de *E. grandis* está exposta na Tabela 13, sendo os valores avaliados ao nível de significância de 0,01. Os modelos apresentam resíduos independentes e distribuição normal, atendendo a condição de homogeneidade.

Tabela 13 – Análise das condicionantes de regressão para *E. grandis* aos 4, 18 e 23 anos

Idade	Modelo selecionado	Probabilidade		
		B	SW	DW
4 anos	$V = -183685 - 164767 \cdot \ln(\text{SAVI}_{L=0,50}) + 221988 \cdot (\text{SAVI}_{L=0,25})$	0,050 ^{ns}	0,131 ^{ns}	0,423 ^{ns}
18 anos	$V = 11494 - 15895 \cdot \text{SAVI}_{L=0,50}$	0,814 ^{ns}	0,332 ^{ns}	0,076 ^{ns}
23 anos	$V = -45337 + 8582 \cdot \ln(\text{SAVI}_{L=0,50}) - 10528 \cdot \ln(B7) - 2712 \cdot \ln(\text{SAVI}_{L=0,25}) + 340196 \cdot (B7)$	0,114 ^{ns}	0,381 ^{ns}	0,092 ^{ns}

ns = não significativo ao nível de confiança de 99%;

B = teste de Bartlett;

SW = teste de Shapiro-Wilk;

DW = teste de Durbin-Watson;

B7 = reflectância na banda do IVM 2;

SAVI_{L=0,25} = reflectância do índice SAVI_{L=0,25};

SAVI_{L=0,50} = reflectância do índice SAVI_{L=0,50}.

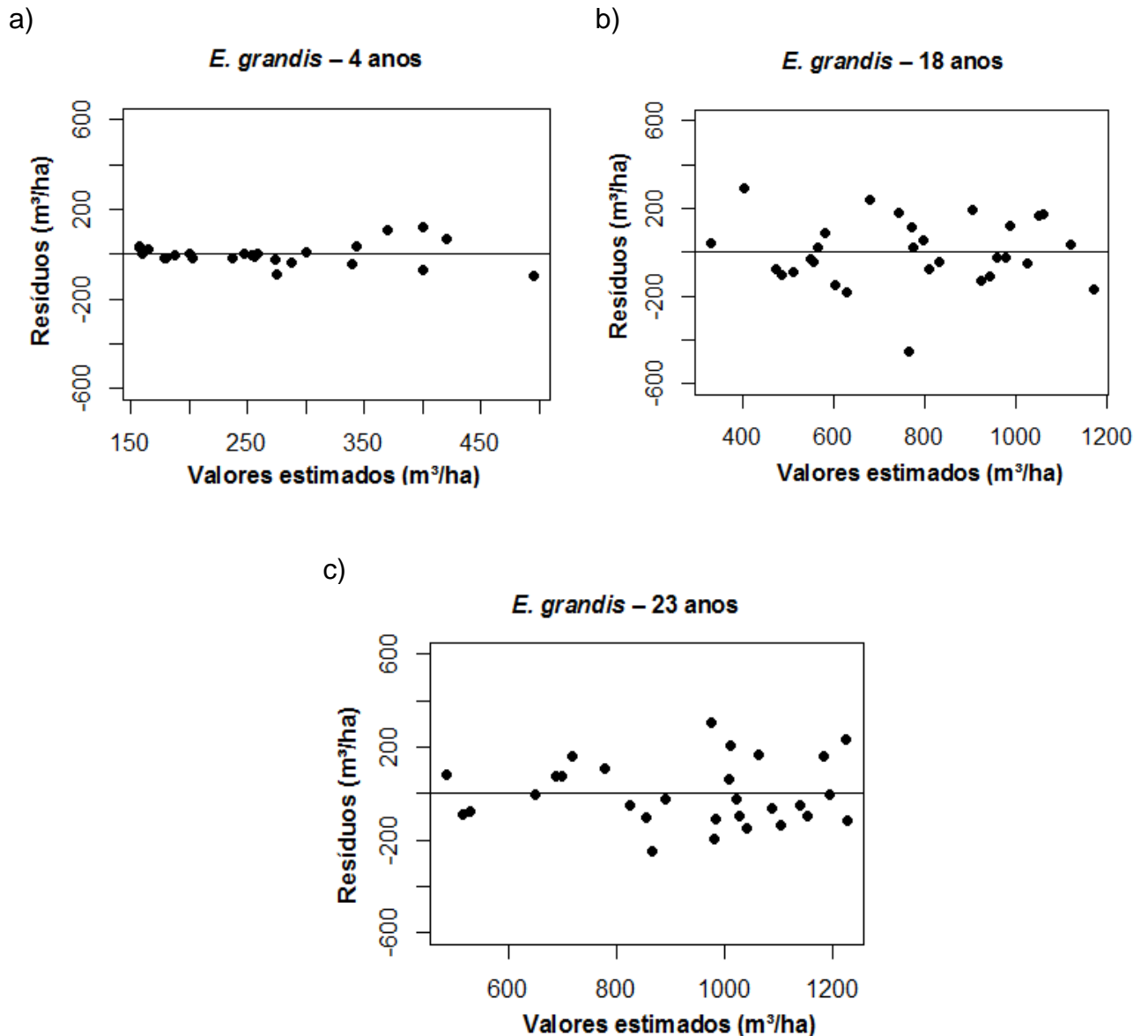
Aos 4 anos, a homogeneidade de variância foi provada por meio do teste de Bartlett, o qual apresentou probabilidade de 0,050, sendo não significativo ao nível de confiança de 99%. O pressuposto de normalidade foi comprovado pelo teste de Shapiro-Wilk, o qual aceitou a hipótese de nulidade (pr = 0,131^{ns}). Os resíduos gerados pelo modelo de melhor ajuste nessa idade expressaram um comportamento independente, não existindo correlação em série (pr = 0,423).

Na análise das condicionantes, os povoamentos aos 18 anos demonstraram homogeneidade de variância (pr = 0,8140), assim como a normalidade (pr = 0,3320) e a independência dos resíduos (pr = 0,0760). Para esses povoamentos, baseando-se na variável florestal e nas variáveis espectrais que compuseram o modelo de estimativa, é possível aferir que os mesmos atendem ao pressuposto estabelecido pelas condicionantes da análise de regressão.

Do mesmo modo, as variáveis espectrais quando relacionadas com o volume florestal aos 23 anos atenderam aos requisitos da homogeneidade de variância, da normalidade e independência dos resíduos, aceitando a hipótese de nulidade. Dessa forma, o modelo exibiu no teste de Bartlett probabilidade de 0,1138, para o teste de Shapiro-Wilk o valor foi de 0,38140 e 0,0915 para o teste de Durbin-Watson.

Embora a estatística apresente bons resultados quanto a precisão do ajuste do modelo de regressão, a dispersão dos resíduos e o enviesamento das estimativas permanecem indefinidos. Neste contexto, realizou-se a análise gráfica dos resíduos para os modelos de melhor ajuste apresentados na Tabela 9 (Nº 1, 4 e 7), levando em consideração a faixa etária dos povoamentos, conforme demonstrado na Figura 21.

Figura 21 – Distribuição dos resíduos referentes aos modelos de regressão linear selecionados na modelagem para povoamentos de *E. grandis* aos 4 (a), 18 (b) e 23 anos (c)



Fonte: Autora.

A amplitude residual descrita pelo modelo selecionado para prever o volume aos 4 anos foi de aproximadamente 100 m³/ha (Figura 21a), de modo que os valores estimados variam de 150 a 450 m³/ha. Para esses povoamentos, o modelo de regressão demonstrou englobar desvios menores em volume de até 200 m³/ha, elevando-se para o volume superior a 350 m³/ha.

Esses resultados foram similares àqueles encontrados por Mohammadi et al. (2010) ao utilizar dados ETM+ para modelar o volume de plantios homogêneos de

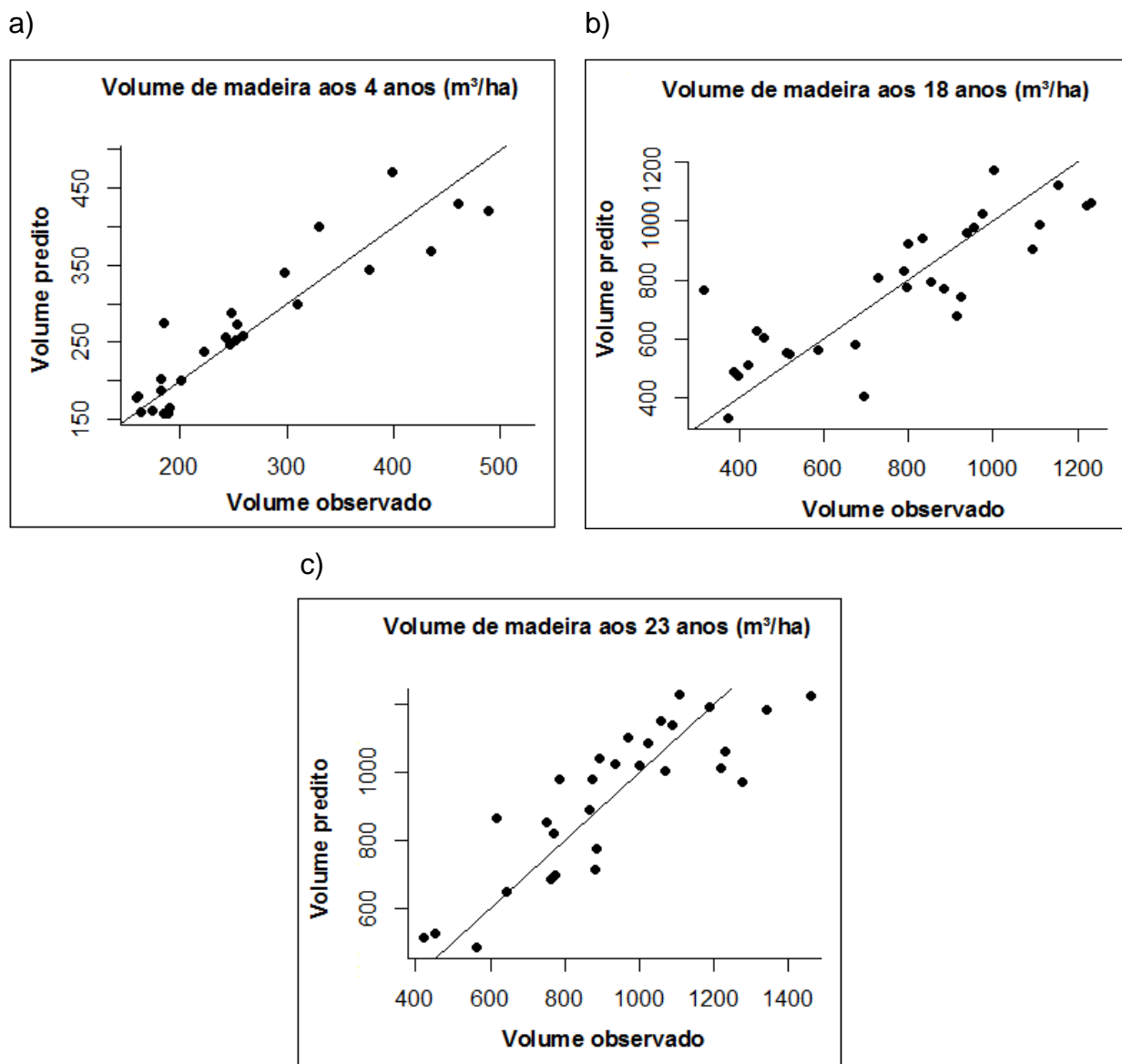
álamo-branco e carvalho, os quais apresentaram valor residual de 100 m³/ha com o volume entre 150 e 350 m³/ha. Goergen (2014) obteve desvios de 5 m³/ha ao estabelecer relação de dados espectrais com volume de *E. urograndis* com 2,2 anos. Já para povoamentos de *E. urograndis* de 4,2 anos e *E. dunnii* de 5 anos, o valor residual foi superior, permeando os 50 m³/ha.

No entanto, os povoamentos mais desenvolvidos, com idades entre 18 e 23 anos, a amplitude residual foi superior, chegando a 400 m³/ha (Figura 21c, b). Observou-se que aos 18 anos, os maiores desvios concentram-se na faixa de volume de 600 a 800 m³/ha. Entretanto, aos 23 anos, o volume compreendido entre 900 e 1000 m³/ha demonstram abranger valor residual superior.

Embora os povoamentos de 18 e 23 apresentem diferenças significativas na idade, os modelos utilizados para descrevê-los demonstraram abranger amplitude volumétrica semelhante, sendo de aproximadamente 400 a 1200 m³/ha. Assim, o aumento da idade não está provendo um incremento significativo em volume, evidenciando que a postergação da idade de rotação está acarretando perdas econômicas, uma vez que a permanência desses povoamentos, causa retardo na implantação de um novo ciclo produtivo.

O ajuste dos modelos de estimativa foi validado a partir do volume observado a campo e do volume predito pelas variáveis espectrais (Figura 22). A variável florestal estimada pelos modelos de regressão selecionados para cada idade demonstrou ajuste satisfatório, situando-se próximos à reta dos valores observados.

Figura 22 - Relação entre o volume de madeira estimado e o volume de madeira observado aos 4, 18 e 23 anos



Fonte: Autora.

Observa-se aos 4 anos de idade a oscilação dos valores, a qual evidencia a subestimativa do volume para valores inferiores a 200 m³/ha e superestimativa para volume entre 200 a 300 m³/ha (Figura 22a). Maiores discrepâncias entre o volume observado a campo e aquele estimado pelo modelo de regressão foram encontradas em volume superior à 400 m³/ha, sendo essa condição, comprovada também, pela análise dos resíduos exposta na Figura 21.

Aos 18 anos, a validação do modelo expôs a ocorrência de superestimativas para a menor classe de volume, seguindo a tendência dos maiores erros no valor predito estar relacionado a classe superior do volume para a idade de análise (Figura 22b). O modelo para prever o volume de madeira em povoamentos de 23 anos demonstrou maior dispersão dos valores, quando comparado aos demais povoamentos amostrados (Figura 22c). Para essa idade, a relação estabelecida entre os valores preditos e observados evidenciou que para as maiores classes de volume, o uso de variáveis espectrais no modelo gera subestimativa da variável florestal.

Canavesi et al. (2010) obtiveram um erro mediano de 200m³/ha ao estimar o volume de madeira estocado. Os autores atribuíram esse erro a escala do trabalho, uma vez que cada talhão foi considerado como uma UA, desse modo, realizou a média dos valores de reflectância das bandas e índices para grandes áreas. Esse fator possivelmente propiciou englobar diferentes condições de iluminação e geometria, reduzindo assim a acurácia das estimativas.

Estudos demonstram a influência de fatores intrínsecos da área de estudo, como a qualidade do sítio, clima e solo na acurácia das estimativas, quando utilizado dados espectrais para a modelagem dos parâmetros biofísicos (MENG et al., 2007; HOLMGREN et al., 2000). Neste contexto, Lu et al. (2004) enfatizam que é adequado para cada área de estudo e para cada sensor, ajustar um modelo de estimativa, desse modo consideram-se as limitações ocasionadas pela dependência da cena e sítio.

No presente estudo, os erros contidos nos modelos de estimativa de volume de *E. grandis*, tendem a ser decorrentes do modo com que as UAs foram identificadas a campo. A partir do conhecimento prévio de seu posicionamento, as UAs foram localizadas utilizando GPS modelo Garmin Etrex Legend®, o qual apresenta erro de aproximadamente 10 m, sendo essa precisão, influenciada pelo fechamento do dossel florestal.

Schmidt et al. (2013) afirmam que os receptores GPS, quando utilizados em floresta densa, ocorre a atenuação da intensidade do sinal, e conseqüentemente a diminuição na precisão do receptor. Desse modo, quanto maior a cobertura do dossel florestal, menor será a intensidade do sinal, acarretando maiores erros.

4.3.2 Povoamentos de *P. elliotii*

A análise de regressão aplicada aos povoamentos de *P. elliotii* está demonstrada na Tabela 14, a qual inclui os dados espectrais como variáveis explicativas do volume de madeira estocado aos 9 e 10 anos. Estes povoamentos foram modelados de acordo com a idade, sendo as variáveis selecionadas pelo método *Stepwise*.

Tabela 14 - Modelos de melhor ajuste para povoamentos de *P. elliotii* aos 9 e 10 anos

Idade	Nº	Equação	S _{yx}	R ² _{aj}	IF	F
9 anos	1	$V = -251000 + 409853*(B5) - 107301*\ln(B5)$	25,85	0,73	40,11	33,14**
	2	$V = -1106,9 + 10282,4*(DVI) - 1618,7*(ARVI)$	30,46	0,62	47,29	20,18**
	3	$V = -6656 + 18093*(DVI) - 4310*\ln(SAVI_{L=0,25})$	31,28	0,60	48,57	19,16**
10 anos	4	$V = -779,8 + 5452,8*DVI + 127,6*\ln(B7)$	17,19	0,74	26,86	38,64**
	5	$\ln(V) = -11,3 + 20,6*SAVI_{L=0,50} - 16,5*\ln(NDVI)$	-	0,70	28,89	32,77**
	6	$V = -1254,5 + 5207,5*B5$	21,30	0,60	33,88	40,64**

**Significativo a um nível de confiança de 99%;

V= volume de madeira (m³/ha);

ln= logaritmo neperiano;

S_{yx}= erro padrão da estimativa;

R²_{aj}= coeficiente de determinação ajustado;

IF= índice de Furnival;

F= valor de significância;

B5= reflectância da banda do IVP;

B7= reflectância da banda do IVM 2;

ARVI= reflectância do índice ARVI;

DVI= reflectância do índice DVI;

NDVI= reflectância do índice NDVI;

SAVI_{L=0,25}= reflectância do índice SAVI_{L=0,25};

SAVI_{L=0,50}= reflectância do índice SAVI_{L=0,50}.

O R²_{aj} apresentado pelos modelos de estimativa do volume aos 9 anos de idade, está entre 0,60 e 0,73, incluindo um S_{yx} de 25,85 a 31,28 m³/ha. O primeiro modelo (Nº1) apresentou maior precisão que os demais, tendo como variável independente a banda B5 na forma original e em logaritmo natural. Esse modelo de regressão apresentou R²_{aj} de 0,73, englobando um erro de estimativa de 25,85 m³/ha e IF de 40,11 m³/ha. Aos 10 anos, o modelo com maior R²_{aj} aliado ao menor S_{yx} e IF constituiu-se pelo índice DVI e a banda B7 transformada para logaritmo natural. Assim o modelo 4, respondeu à 74% da variabilidade do volume de madeira, exibindo S_{yx} de 17,19 m³/ha e IF de 26,86 m³/ha.

Embora o ajuste dos modelos para ambas as idades tenha expressado valores próximos, observou-se que as variáveis espectrais demonstraram melhores resultados para os povoamentos aos 10 anos de idade. Em estudo realizado por Berra (2013), constatou-se que o aumento da idade acarretou aumento dos desvios dos resíduos, sendo esse fator, atribuído ao aumento da cobertura do dossel. Entretanto, os resultados obtidos no presente estudo são divergentes, uma vez que a menor cobertura do dossel aliada a maior variação no crescimento, apresentou-se como fator negativo no processo de modelagem.

Os plantios de *P. elliotii* estão implantados ao norte da área de estudo, de modo que os povoamentos aos 9 anos englobam grandes variações de sítio e a presença de áreas alagadas. Esses fatores influenciaram diretamente no fechamento do dossel, contribuindo ainda, para a maior interferência da serapilheira na resposta espectral armazenada pelo sensor OLI.

Nesses povoamentos, Berra (2013) desenvolveu estudos de estimativa do volume quando os mesmos apresentavam 6 e 7 anos, baseando-se em dados espectrais Landsat 5/TM e Resourcesat-1/LISS-III. A variável biofísica foi explicada pelas bandas B3 e B5 para o sensor LISS-III, apresentando R^2_{aj} de 0,72 e S_{yx} igual a 24,60 m³/ha. Para o sensor TM, as variáveis selecionadas na modelagem foram as bandas B3, B5 e B6, compreendendo 70% da variabilidade dos dados com S_{yx} de 25,24 m³/ha.

Orué (2002) utilizando-se da análise de regressão simples, estimou o volume de *Pinus* spp. com Landsat 7/ETM+, tendo como variável explicativa a banda B5, encontrando R^2 de 0,43 e S_{yx} de 59,7m³/ha. Esse erro de estimativa é considerado elevado, quando aplicado o parâmetro de precisão estabelecido para florestas da Suécia em estimativas de variáveis biofísicas, o qual é de aproximadamente 50 m³/ha (Ardö, 1992). Sousa e Ponzoni (1998) efetuaram estimativas para o volume de madeira de *Pinus* spp. a partir de dados Landsat 5/TM, demonstrando que a variável dependente é explicada pelos índices GNDVI e MVI.

A verificação das condicionantes de regressão para os povoamentos de *P. elliotii* está descrita na Tabela 15, sendo o ajuste avaliado ao nível de significância de 0,01. O pressuposto estabelecido pela análise das condicionantes foi alcançado para ambos os povoamentos, os quais apresentaram homogeneidade de variância, de modo que os resíduos foram independentes, seguindo assim a distribuição normal.

Tabela 15 – Análise das condicionantes de regressão para *P. elliottii* aos 9 e 10 anos

Idade	Modelo selecionado	Probabilidade		
		B	SW	DW
9 anos	$V = - 251000 + 409853*(B5) - 107301*\ln(B5)$	0,770 ^{ns}	0,106 ^{ns}	0,025 ^{ns}
10 anos	$V = - 779,8 + 5452,8*DVI + 127,6*\ln(B7)$	0,199 ^{ns}	0,904 ^{ns}	0,267 ^{ns}

ns = não significativo a nível de confiança de 99%;

B = teste de Bartlett;

SW = teste de Shapiro-Wilk;

DW = teste de Durbin-Watson;

B5= reflectância na banda do IVP;

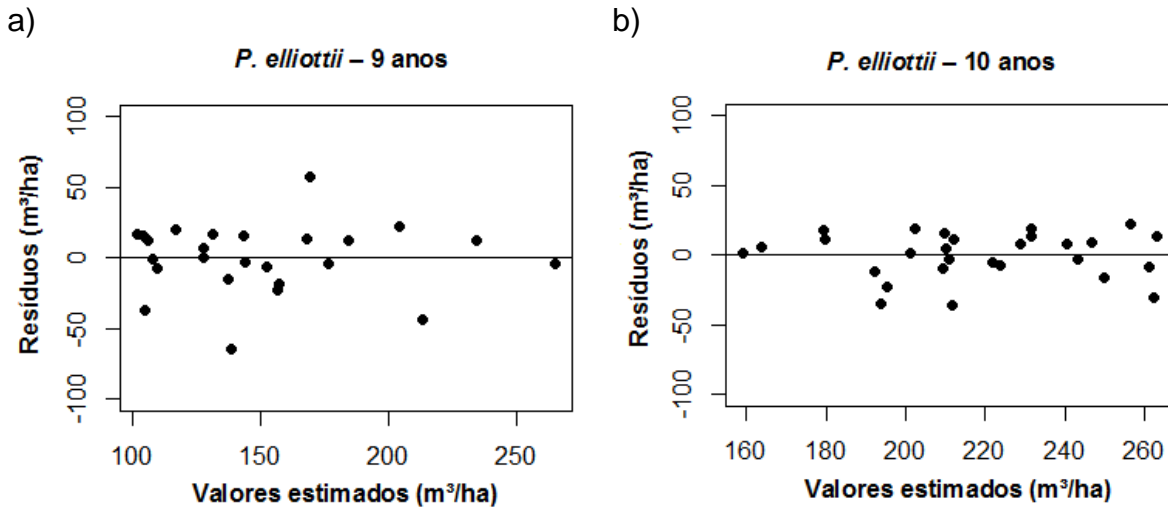
B7= reflectância na banda do IVM 2;

DVI= reflectância do índice DVI.

Aos 9 anos, verificou-se que os dados apresentam homogeneidade de variância, demonstrando relação não significativa ($pr = 0,770$). A hipótese de nulidade foi aceita na prova de normalidade ($pr = 0,106$) e na independência dos resíduos ($pr = 0,0250$). Esse mesmo comportamento foi observado para povoamentos aos 10 anos, os quais atenderam ao pressuposto das condicionantes de regressão, apresentando uma probabilidade de 0,1991 para a homogeneidade, 0,9043 para independência e 0,2671 para a normalidade dos resíduos.

Realizou-se a análise gráfica dos resíduos para os modelos de melhor ajuste, conforme ilustrado na Figura 23. A amplitude residual compreendida pelo modelo selecionado para prever o volume aos 9 anos foi de aproximadamente 75 m³/ha (Figura 23a), de modo que os valores estimados variam entre 100 a 250 m³/ha. O modelo de estimativa do volume aos 10 anos expôs desvios inferiores, de aproximadamente 40 m³/ha, com volume estimado na área de estudo variando de 160 a 260 m³/ha (Figura 23b).

Figura 23 – Distribuição dos resíduos referentes aos modelos de regressão linear selecionados na modelagem para povoamentos de *P. elliptii* aos 9 (a) e 10 anos (b)

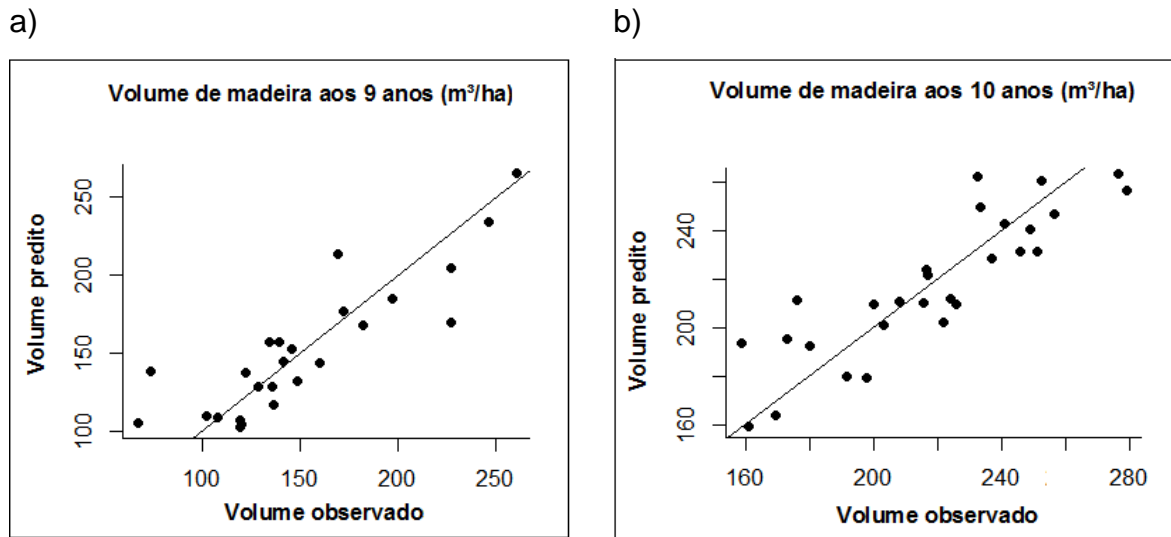


Fonte: Autora.

Esse estudo demonstrou menor amplitude residual do que os resultados expostos por Berra (2013), obtendo desvios iguais ou superiores à 75 m³/ha nos modelos que apresentaram resíduos independentes. A resolução radiométrica dos sensores destaca-se devido a sua sensibilidade em detectar a intensidade da radiação, interferindo na escala de distribuição dos níveis de cinza. As imagens obtidas pelo sensor OLI possuem uma resolução radiométrica de 16 bits (2¹⁶), registrando as diferenças apresentadas pela vegetação para uma escala de níveis de cinza variando entre 0 e 65535, enquanto que o sensor TM registra diferenças no intervalo de 0 a 256 níveis de cinza (2⁸).

A validação para os modelos de regressão foi realizada a partir do volume observado a campo e aquele estimado pelo modelo selecionado para cada idade (Figura 24). Os dados espectrais demonstraram ajuste satisfatório na estimativa da variável biofísica para ambas as idades analisadas. Entretanto, a validação do modelo de estimativa aos 9 anos, expôs a ocorrência de superestimativas para volume inferior a 100 m³/ha.

Figura 24 - Relação entre o volume de madeira estimado e o volume de madeira observado aos 9 (a) e 10 anos (b)

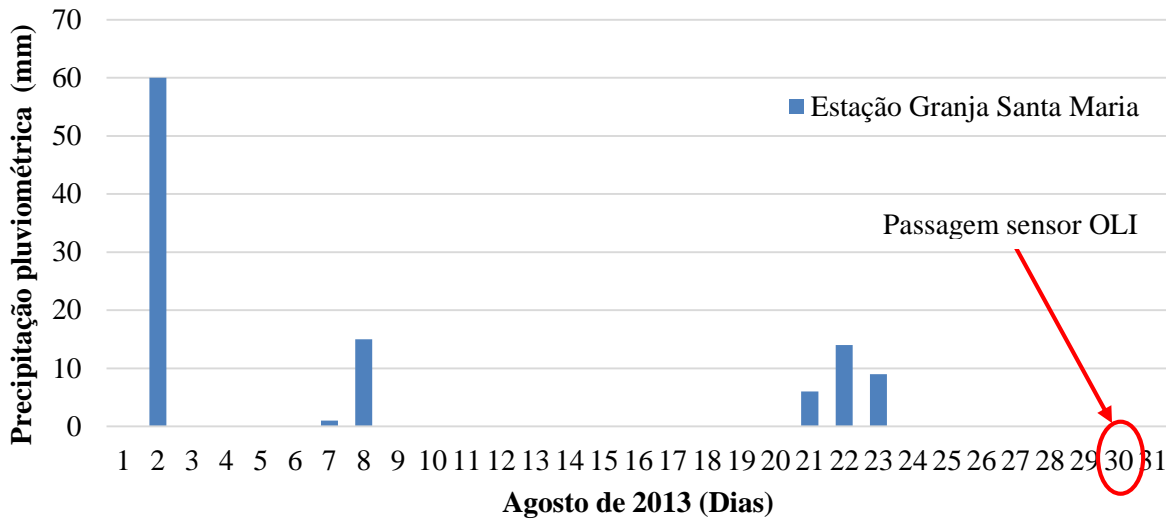


Fonte: Autora.

Embora os dados espectrais do satélite Landsat 8/OLI ajustar-se à variável florestal, as estimativas para as espécies de *E. grandis* e *P. elliottii*, demonstraram englobar desvios elevados, sendo esses, relevantes na análise de regressão. Alguns fatores influenciam diretamente na resposta espectral da vegetação, especialmente aqueles que controlam o microclima dentro das florestas, como o vento, a umidade e a temperatura, os quais interferem na capacidade fotossintética e consequentemente na porção de REM absorvida e refletida pelo dossel (BERRA, 2013). Assim, a interação das folhas com a energia é definida com maior precisão quando realizada *in loco*.

Outro fator relevante no estudo do comportamento da vegetação é a concentração de água no interior dos tecidos celulares. Em vista disto, foi analisada a ocorrência de chuvas na área estudada, por meio de informações disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas – ANA (www.ana.gov.br). A Estação Granja de Santa Maria situada aproximadamente a 25 km dos povoadamentos, armazenou registros de precipitação pluviométrica para o mês de agosto de 2013, os quais estão demonstrados na Figura 25.

Figura 25 – Precipitação pluvial registrada diariamente na estação de monitoramento Granja Santa Maria, localizada no município de Rio Grande



Fonte: Adaptação de ANA (2015).

A estação de monitoramento registrou um grande volume de precipitação (60 mm) no início do mês de agosto, e posteriormente, entre os dias 7 e 8 foram registradas baixas taxas de precipitações, chegando ao total de 16 mm. Outro período de instabilidade foi registrado entre os dias 21 e 23, totalizando 29 mm para esse período. O sensor OLI fez sua passagem no dia 30, transcorrido sete dias sem chuva.

Embora tenha registrado um período de ausência de precipitação até a passagem do sensor, a área de estudo situa-se em solos caracterizados pela difícil infiltração e, em determinadas áreas, essa restrição acentua-se, acumulando umidade na classe de fundo, especialmente no período do ano com altas taxa de precipitação (inverno), vindo a interferir na resposta espectral dos povoamentos situados nessas condições. Outro fator contributivo para o acúmulo de água, consiste na área de estudo apresentar predominância de relevo plano, elevando-se apenas alguns metros do nível do mar (10-15m).

4.4 ESPACIALIZAÇÃO DA VARIÁVEL BIOFÍSICA

Foi realizado a espacialização e quantificação do volume de madeira a partir dos modelos matemáticos ajustados para cada espécie e idade dos povoamentos. Os

modelos de melhor ajuste utilizando como variáveis explicativas as bandas espectrais e os índices de vegetação estão reescritos na Tabela 16.

Tabela 16 - Modelos selecionados para estimativa do volume de madeira de *E. grandis* e *P. elliotii*

Espécie	Idade	Equação	S _{yx}	R ² _{aj}	IF	F
E. grandis	4 anos	$V = -183685 - 164767 \cdot \ln(\text{SAVI}_{L=0,50}) + 221988 \cdot (\text{SAVI}_{L=0,25})$	52,0	0,76	69,83	41,43**
	18 anos	$V = 11494 - 15895 \cdot \text{SAVI}_{L=0,50}$	154,1	0,68	244,11	63,48**
	23 anos	$V = -45337 + 8582 \cdot \ln(\text{SAVI}_{L=0,50}) - 10528 \cdot \ln(B7) - 2712 \cdot \ln(\text{SAVI}_{L=0,25}) + 340196 \cdot (B7)$	147,6	0,67	174,17	15,41**
P. elliottii	9 anos	$V = -251000 + 409853 \cdot (B5) - 107301 \cdot \ln(B5)$	25,85	0,73	40,11	33,14**
	10 anos	$V = -779,8 + 5452,8 \cdot \text{DVI} + 127,6 \cdot \ln(B7)$	17,19	0,74	26,86	38,64**

**Significativo a um nível de confiança de 99%;

V = volume de madeira (m³/ha);

ln = logaritmo neperiano;

S_{yx} = erro padrão da estimativa;

R²_{aj} = coeficiente de determinação ajustado;

IF = Índice de Furnival;

F = valor de significância;

B5 = reflectância da banda do IVP;

B7 = reflectância da banda do IVM 2;

DVI = reflectância do índice DVI;

SAVI_{L=0,25} = reflectância do índice SAVI_{L=0,25};

SAVI_{L=0,50} = reflectância do índice SAVI_{L=0,50}.

Destaca-se que as estimativas da variável florestal foram realizadas apenas para os povoamentos incluídos no inventário florestal, desse modo o modelo de regressão foi definido baseando-se nas condições específicas apresentadas por esses. A Figura 26 e 27 demonstram o volume de madeira distribuído na área de estudo a partir dos dados espectrais do satélite Landsat 8 para os povoamentos de *E. grandis* e *P. elliotii*, respectivamente.

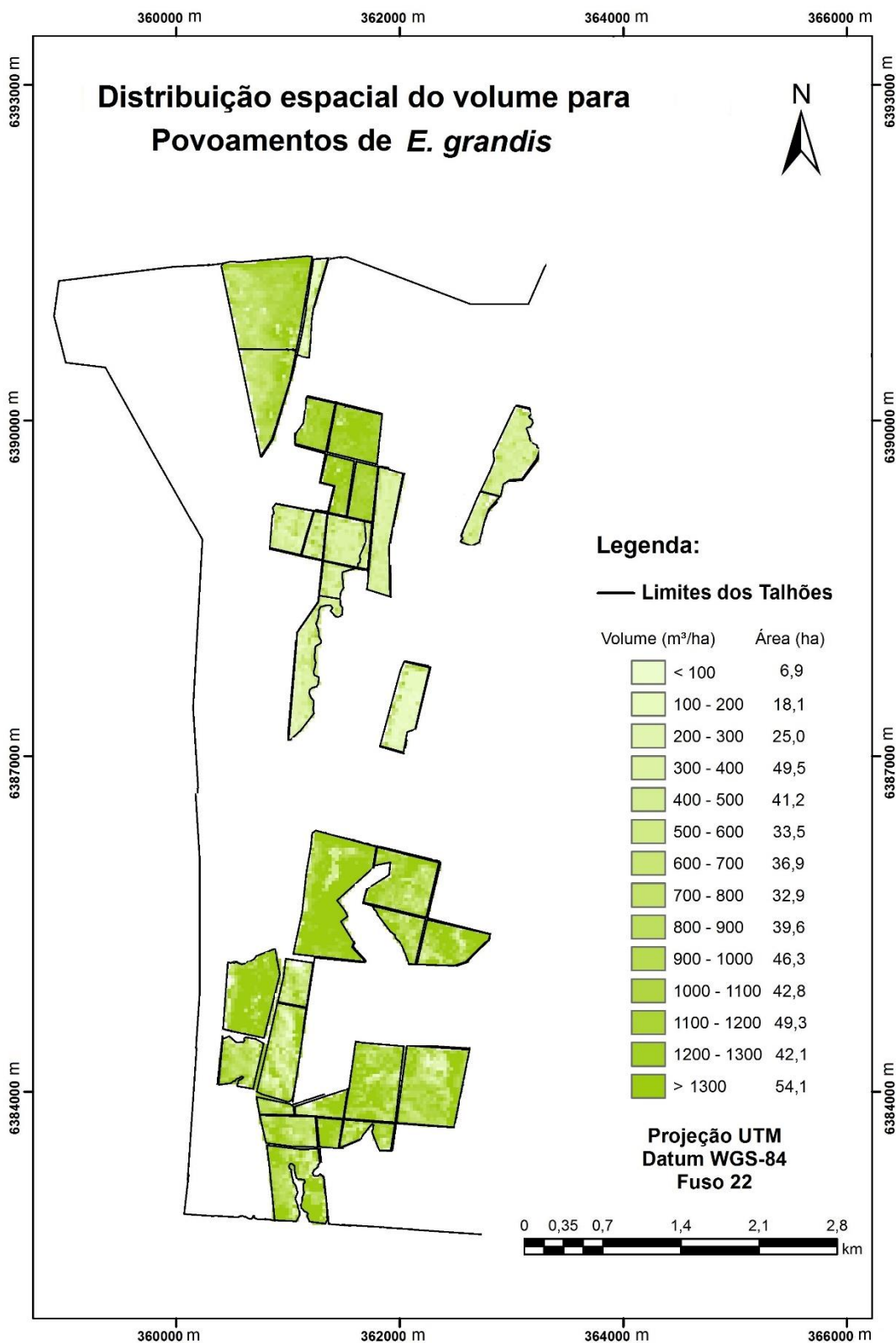
Com a espacialização da variável, cada pixel passou a representar o valor de volume de madeira (m³/ha), possibilitando a quantificação do mesmo na área de estudo. Visando melhor análise, o volume dos povoamentos de *E. grandis* foi separado em classes considerando um intervalo de 100 m³/ha, já os povoamentos de *P. elliotii*, em classes de 50 m³/ha. Essa informação, gerenciada por um SIG

compõem uma das principais ferramentas de interesse no processo de gestão florestal visando à otimização da produtividade.

Procedendo com a análise qualitativa, os mapas ilustram a variação do volume de madeira pela alteração das cores associadas, inferindo na detecção de áreas homogêneas ou heterogêneas no interior dos talhões (BERRA, 2013). Essa análise fornece maior embasamento para o manejo da cultura, assim como informações sobre a qualidade do sítio.

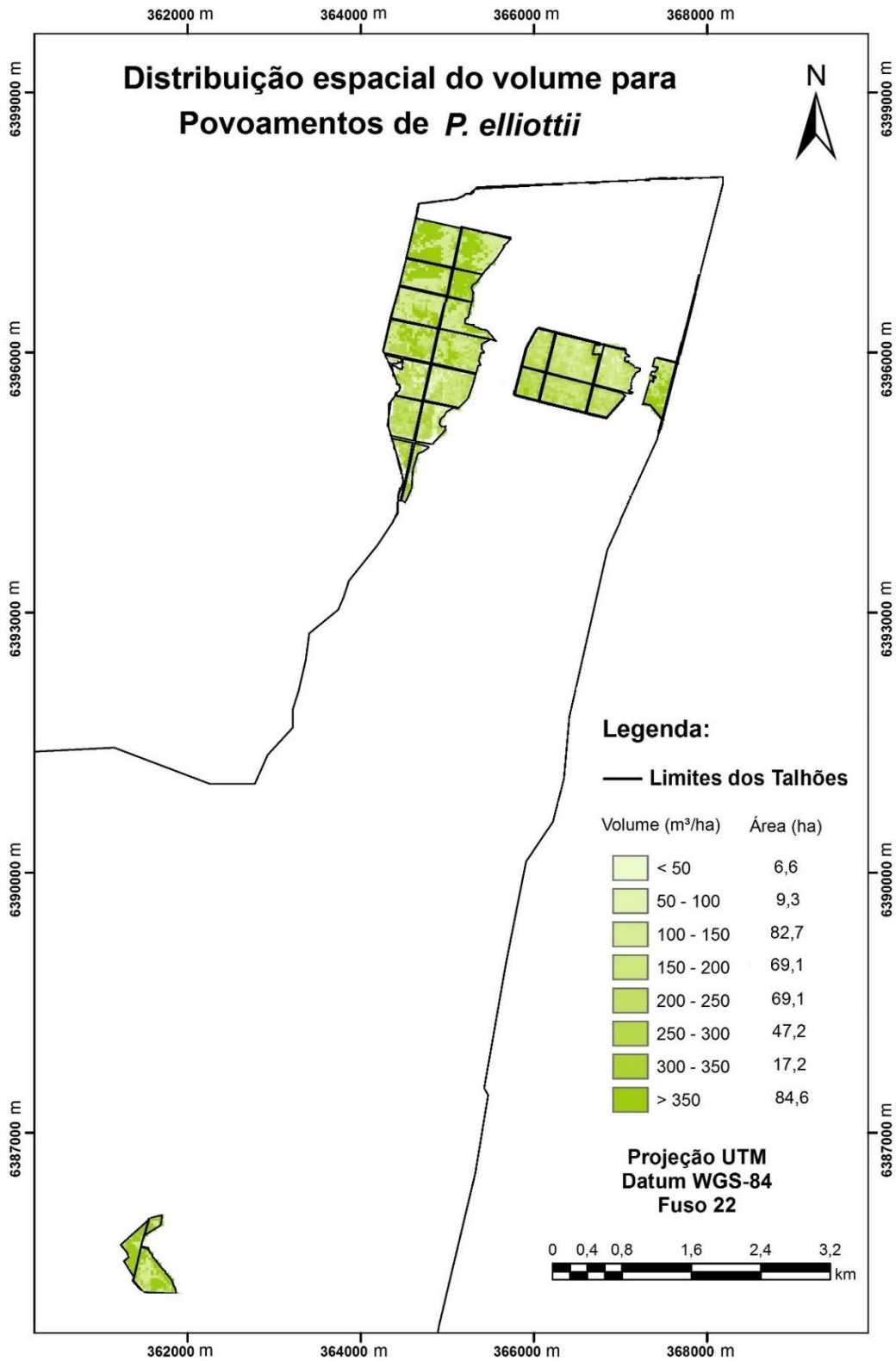
Observa-se que o mapa temático de volume florestal de *E. grandis* representado pela Figura 26, apresenta boa correspondência com os valores de volume mensurados a campo, visto que os talhões de menor volume correspondem aos povoamentos com 4 anos de idade, localizados na região central da área de estudo (Ver Figura 9). Do mesmo modo, há similaridade entre as informações quanto a variação das classes de volume em povoamentos aos 18 anos, sendo esses localizados ao sul do mapa temático.

Figura 26 – Distribuição espacial do volume de madeira estocado em povoamentos de *E. grandis* gerado a partir da análise de regressão linear



Fonte: Autora.

Figura 27 – Distribuição espacial do volume de madeira estocado em povoamentos de *P. elliottii*



Fonte: Autora.

É interessante ressaltar que as regiões úmidas no interior dos talhões interferiram negativamente, as quais ocuparam a classe de maior volume, acarretando em superestimativa nesses locais. Esse mesmo comportamento foi observado em algumas regiões referentes à borda dos talhões.

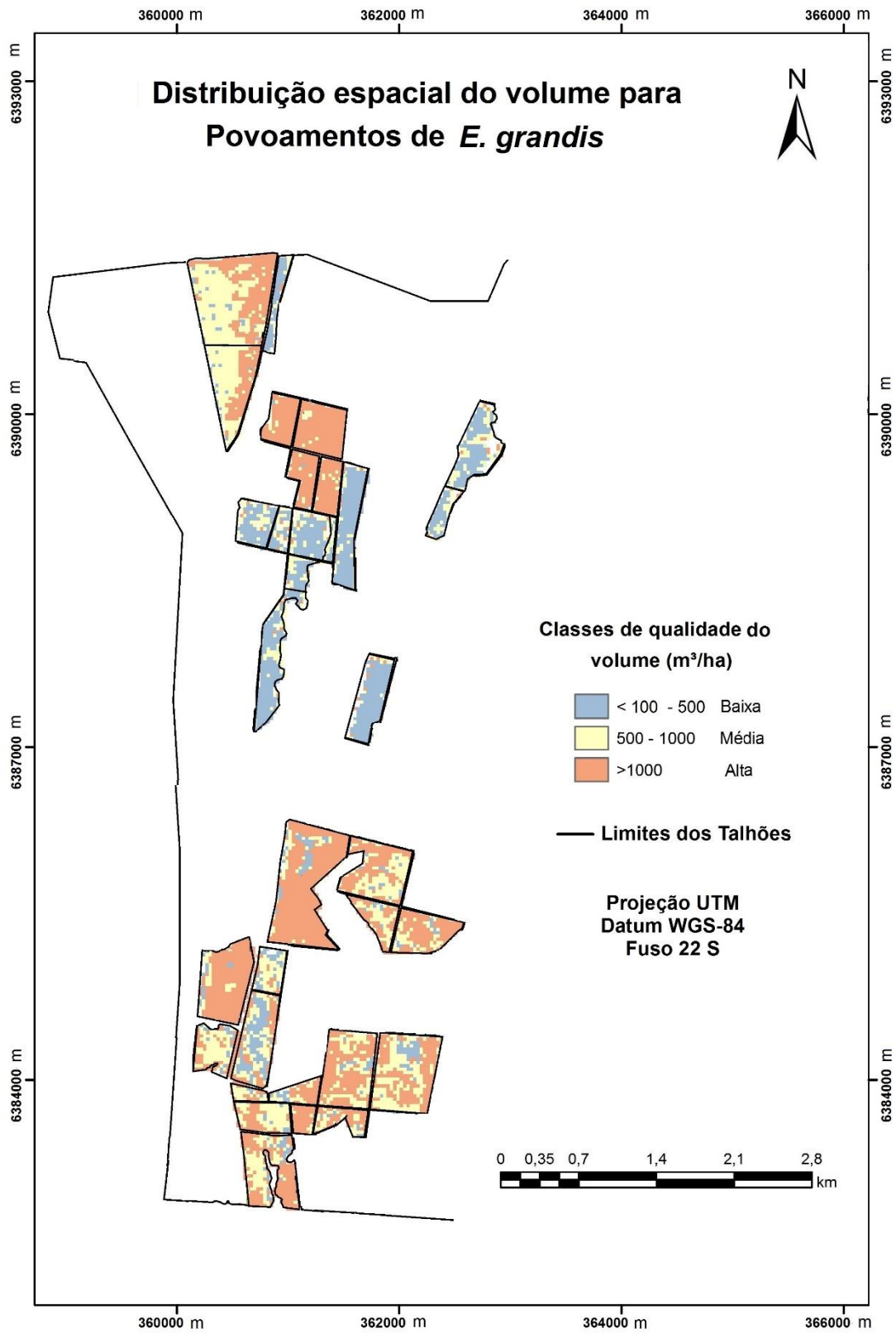
A Figura 27 demonstra o mapa temático referente a espacialização do volume de madeira estocado em povoamentos de *P. elliotii* aos 9 e 10 anos de idade. O volume apresentou similaridade com os valores mensurados a campo, porém é possível observar que as áreas de maior umidade, localizadas na região noroeste dos povoamentos de pinus, apresentaram superestimativa dessa variável biofísica, ao exemplo do comportamento exibido pelos povoamentos de *E. grandis*.

Esses locais, conforme ilustrados na Figura 9 correspondem, especialmente, aos povoamentos com 9 anos de idade, os quais na modelagem do volume apresentaram os maiores desvios nas estimativas. Esse comportamento permitiu identificar a influência da umidade acumulada no plano de fundo na precisão do ajuste dos modelos, uma vez que alterou a resposta espectral ao longo das faixas espectrais estudadas.

A espacialização do volume utilizando o intervalo de 50 m³/ha compreendeu oito classes de volume, dentre as quais observou-se a predominância das classes >350 m³/ha e 100-150 m³/ha, correspondendo a 84,6 ha e 82,7 ha, respectivamente. As classes de menor volume, representadas pelos intervalos <50 m³/ha e 50-100 m³/ha, englobam apenas 6,6 e 9,3 m³/ha, respectivamente.

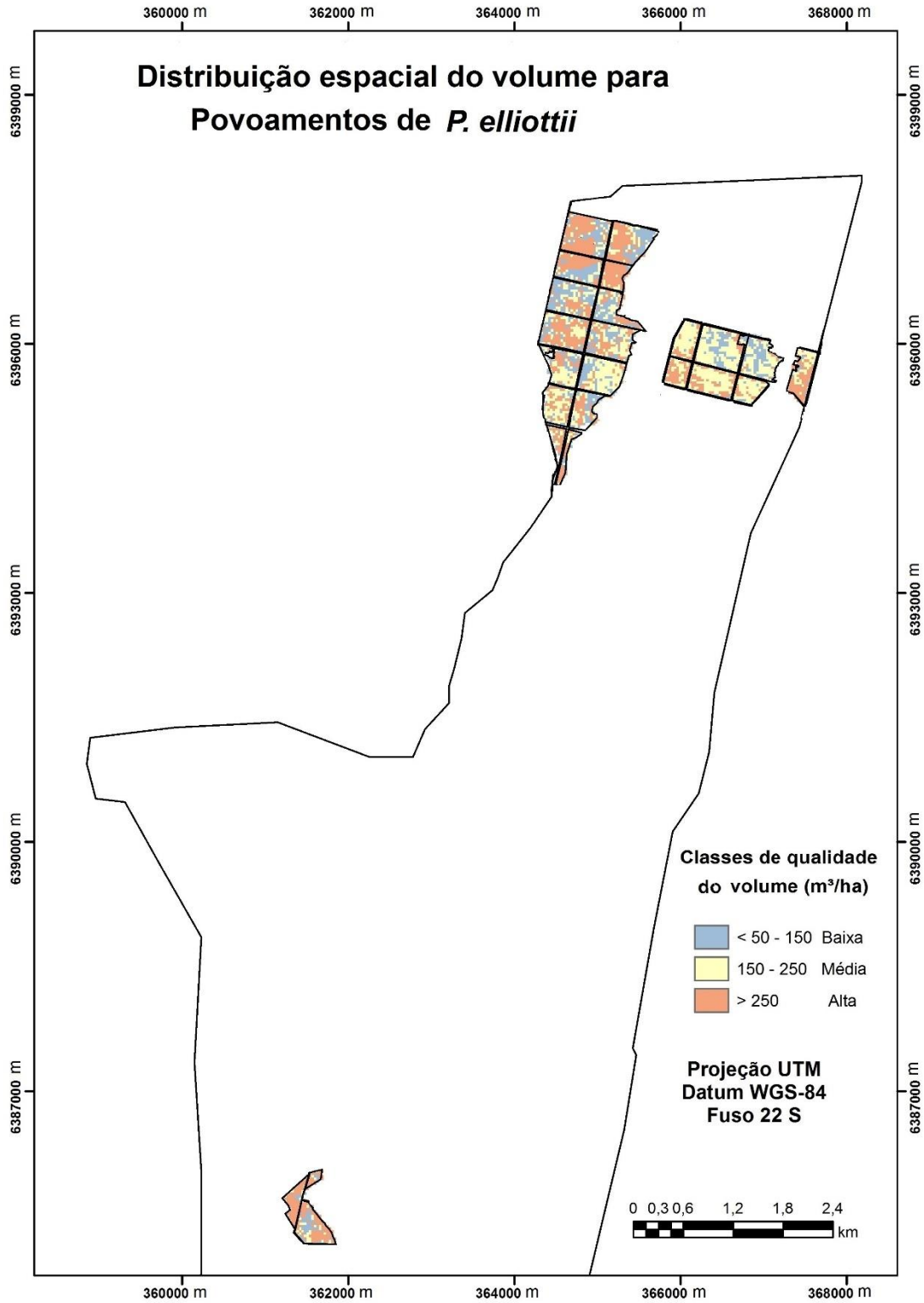
No entanto, para melhor visualizar as transições do volume florestal ao longo dos talhões amostrados, elaborou-se mapas de qualidade, separando o volume florestal em classes de qualidade. Desse modo, as Figuras 28 e 29 demonstram o volume de madeira estocado distribuídos em classes, sendo essas designadas como alta, média e baixa.

Figura 28 – Distribuição espacial do volume de madeira em classes de qualidade para povoamentos de *E. grandis*



Fonte: Autora.

Figura 29 - Distribuição espacial do volume de madeira em classes de qualidade para *P. elliottii*



Fonte: Autora.

Assim, para *E. grandis* o volume de madeira <100 a 500 m³/ha pertenceu a classe de qualidade baixa, volume entre 500 a 1000 m³/ha foi considerado de qualidade mediana e acima de 1000 m³/ha pertenceu a classe de qualidade alta. Para *P. elliptii* o volume florestal foi separado nos seguintes intervalos: <50 a 150 m³/ha, 150 a 250 m³/ha e acima de 250 m³/ha, referente as classes de qualidade baixa, média e alta, respectivamente.

Para os povoamentos de *E. grandis*, a classe de qualidade designada como baixa, englobou um volume total de 140,7 m³/ha, compreendendo, especialmente, os povoamentos aos 4 anos de idade. A classe de qualidade média compreendeu 189,2 m³/ha e por fim, a classe de qualidade alta representa na área estudo um volume de 188,3 m³/ha.

Os povoamentos de *P. elliptii* demonstraram um volume de 98,6 m³/ha, 138,2 m³/ha e 149 m³/ha nas classes de qualidade baixa, média e alta, respectivamente. Ao exemplo da representação espacial da variável biofísica exposta na Figura 27, a classe de maior volume refere-se, principalmente, aos locais com maior umidade no interior dos povoamentos, o que gerou superestimativa do volume florestal.

5. CONCLUSÃO

Os dados do satélite Landsat 8/OLI mostraram-se eficientes na caracterização espectral dos dosséis das espécies de *E. grandis* e *P. elliottii*, os quais permitiram a diferenciação dos estágios de crescimento. Desse modo, comprovando-se que a idade dos povoamentos influencia diretamente no comportamento da REM refletida, especialmente, nas bandas B4 e B5, permitindo a identificação de diferentes fases fisiológicas dos povoamentos florestais.

Os povoamentos jovens de *E. grandis* presentes na área de estudo caracterizam-se pela alta reflectância na banda B5 e alta absorção na banda B4. Entretanto, em dosséis desenvolvidos, com idades de 18 e 23 anos, identificou-se à diminuição da reflectância na banda B5 e menor absorção na banda B4 com o aumento da idade, sendo esse comportamento atribuído a redução de folhas jovens no dossel e o aumento da influência de galhos secos. Constatando-se ainda, que com o aumento da idade e redução do crescimento dos indivíduos, o processo de diferenciação das idades é dificultado.

As imagens Landsat 8/OLI detectaram as variações apresentadas pelos povoamentos de *P. elliottii*, permitindo reconhecer por meio do comportamento espectral, que os mesmos se encontram em fase de crescimento, ocorrendo incremento em volume e estrutura de copa. Desse modo, aos 10 anos de idade, os povoamentos apresentaram maior reflectância na banda B5 e maior absorção da banda B4 que povoamentos aos 9 anos de idade.

A resposta espectral dos povoamentos de *E. grandis* e *P. elliottii* exibiu maior dissimilaridade na faixa espectral do infravermelho próximo. Assim, essa região proporciona a distinção dessas espécies florestais, apresentando maior sensibilidade às variações dos estágios de crescimento dos indivíduos inseridos no presente estudo.

As variáveis espectrais do sensor OLI mostraram-se sensíveis as variações do volume de madeira estocado na área de estudo. O volume florestal em povoamentos de *E. grandis* apresentou melhor correlação com o índice $SAVI_{L=0,50}$ em ambas as idades, retornando um coeficiente de correlação de 0,7895, 0,8330 e 0,7063, respectivamente.

Para a espécie de *P. elliottii*, os dados espectrais de melhor relação com o volume florestal foi a banda B5 e o índice DVI. Assim, o volume de madeira estocado

aos 9 anos de idade apresentou melhor correlação com a banda B5, exibindo um valor de $r = 0,7768$. Já aos 10 anos de idade, o índice DVI melhor se correlacionou com o volume estocado, apresentando r de 0,8234.

A análise de regressão retornou os modelos de melhor ajuste ao volume florestal para cada espécie e idade. Assim, o modelo de estimativa para os povoamentos de *E. grandis* aos 4 anos foi composto pelas variáveis espectrais $SAVI_{L=0,50}$ e $SAVI_{L=0,25}$, o qual explicou 76% da variabilidade do volume, expondo um S_{yx} de 52,00 m³/ha.

O modelo apresentando como variável independente o índice $SAVI_{L=0,50}$, compôs a estimativa do volume aos 18 anos, o qual englobou R^2_{aj} de 0,68 e S_{yx} de 154,1 m³/ha. Quanto à estimativa do volume florestal aos 23 anos, as variáveis independentes incluídas no modelo foram o índice $SAVI_{L=0,50}$, $SAVI_{L=0,25}$ e B7, representando 67% da variabilidade dos dados, associado a um S_{yx} de 147,6 m³/ha.

A modelagem do volume para a espécies de *P. Elliottii* aos 9 anos de idade foi constituído pela banda B5, a qual representou R^2_{aj} 0,73 e S_{yx} 25,85 m³/ha. Os povoamentos aos 10 anos tiveram o volume de madeira estimado por meio das variáveis espectrais DVI e B7, explicando 74% da variabilidade dos dados, associado a um S_{yx} de 17,19 m³/ha.

Os dados Landsat 8/OLI demonstraram ser úteis para estimativa do volume estocado a campo, assim como na obtenção das características estruturais dos povoamentos florestais para as duas espécies em questão. A relação significativa ao nível de probabilidade, o S_{yx} , o R^2 , os gráficos de resíduos e a validação demonstraram a aplicabilidade do método para a estimativa do volume de madeira estocado a campo.

A área de estudo caracteriza-se por apresentar um relevo plano, variando de 5 a 15 metros acima do nível do mar. Esse fator pode ter contribuído positivamente para o ajuste dos modelos de estimativas, uma vez que isolou a interferência da geometria de iluminação nos valores de radiância armazenados pelo sensor.

Esses resultados são válidos para os povoamentos de *E. grandis* e *P. Elliottii* nas condições especificadas da área de estudo. A precisão das estimativas pode apresentar variações quanto ao tipo de vegetação e/ou métodos de mensuração da variável florestal a campo.

RECOMENDAÇÕES FINAIS

Em estudos posteriores, é interessante o uso de UA's com dimensões superiores a área mínima detectada pelo sensor (pixel), desse modo, facilita a identificação da área contendo a informação espectral registrado a campo, reduzindo a influência de outras formas de vegetação na resposta espectral englobada pelo pixel, que não é representada pela amostragem. Outro fator a ser considerado para o aumento da precisão consiste na redução da variabilidade nos dados de campo, uma vez que os povoamentos englobados nesse estudo exibiram grande variação de qualidade do sítio dentro dos talhões.

Esse estudo expôs a influência da umidade na resposta espectral da vegetação, interferindo na precisão da modelagem da variável biofísica dos povoamentos estudados. Desse modo, recomenda-se que esse tipo de análise seja realizado em estações com menor incidência de chuvas, propiciando menor concentração de umidade no dossel e no subsolo dos plantios florestais.

Devido a disponibilidade de cenas na área de estudo no período da coleta dos dados a campo, esse estudo contou apenas com uma cena (221/083). No entanto, é necessário estudo que relacione essa variável biofísica com outras cenas e demais períodos do ano, contemplando a variação nas condições ambientais permitindo maior representatividade da qualidade desses dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARYA, P. K. et al. **MODTRAN4**: multiple scattering and bi-directional reflectance distribution function (BRDF) upgrades to MODTRAN. SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III, 1999. Disponível em: <www.spectral.com/sr115.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **HidroWeb**: Sistemas de Informações hidrológicas. 2015. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 26 mar. 2015.

ARDÖ, J. Volume quantification of coniferous forest compartments using spectral radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n. 9, p. 1779-1786, 1992. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169208904227>. Acesso em: 10 jan. 2015. DOI: 10.1080/01431169208904227.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Relatório estatístico**. São Paulo, 2013. Disponível em < <http://bracelpa.org.br/bra2/index.php>>. Acesso em: 08 jan. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico da ABRAF 2013** - Ano base 2012. Brasília, 2013. 142 p.

BARBOSA, K. M. N.; PIEDADE, M. T. F.; KIRCHNER, F. F. Estudo temporal da vegetação herbácea da várzea da Amazônia central. **Revista Floresta**, v. 38, n. 1, Jan./Mar., 2008. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/floresta/article/view/11029/7486>>. Acesso em: 08 jan. 2015.

BARROS, B. S. X. **Estimativa de parâmetros estruturais de áreas de produção de eucalipto através de imagens de satélite na Região de Botucatu-SP**. 2013. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus Botucatu, Botucatu, SP, 2013.

BERNARDES, S. **Índices de vegetação e valores de proporção na caracterização de floresta tropical primária e estádios sucessionais na área de influência da Floresta Nacional de Tapajós** – Estado do Pará. 1998. 86 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional e Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1998.

BERNDT, R. A; MOREIRA, M. F. **Sub-bosque de eucalipto**. Área técnica, Ano I, n. 12, Porto Alegre, 2005.

BERRA, E. F. **Avaliação e comparação de imagens LISS-III/ResourceSAT-1 e TM/LANDSAT 5 para estimar volume de madeira de um plantio de *Pinus elliottii***. 2013. 127 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

BERRA, E. F. et al. Estimativa de volume florestal com imagem Landsat 5. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, 2011, Curitiba. **Anais...Curitiba:** INPE, 2011. Disponível em <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0325.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

CAMPOS, J. C. C. Análise de crescimento e produção em plantações desbastadas. **Revista Árvore**, v. 4, n. 2, p. 157-169, 1980.

CANAVESI, V.; PONZONI, F. J.; VALERIANO, M. M. Estimativa de volume de madeira em Plantios de *Eucalyptus spp.* utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. **Revista Árvore**, v. 34, n. 3, p. 539-549, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v34n3/a18v34n3.pdf>. Acesso em: 11 out. 2014.

CARREIRAS, J. M. B.; PEREIRA, J. M. C.; PEREIRA, J. S. Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. **Forest Ecology and Management**, v. 223, n. 1-3, p. 45–53, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112705006808>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

CASSOL, H. L. G. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila mista com uso de dados ópticos de sensores remotos**. 2013. 143 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2013.

CHANDER, G.; MEYER, D. J.; HELDER, D. L. Cross calibration of the Landsat-7 ETM+ and EO-1 ALI sensor. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 12, p. 2821–2831, 2004. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1369378&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A29970%29>. Acesso em: 10 jun. 2015.

CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 34, p. 59-479, 1988. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425788900193>>. Acesso em: 15 jan. 2015. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90019-3.

CHUVIECO, E. **Fundamentos de teledetección espacial**. Madrid, Rialp, 1990. 453 p.

CLEVERS, J. G. P. W. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 1, p. 53–70, 1988. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425788900417>>. Acesso em: 25 ago. 2015. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90041-7.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n.261, de 30 de junho de 1999. Aprova como parâmetro básico para análise dos estágios sucessionais de vegetação de restinga para o estado de Santa Catarina previsto na lei 6.938 de 31 de agosto de 1981. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2 ago. de 1999. Seção 1, p. 29-31.

COSTA, L. F. et al. Estimativa do volume e densidade de árvores em povoamentos de *Eucalyptus grandis* a partir de dados espectrais. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE MANEJO FLORESTAL, 6., 2015, Santa Maria/RS. **Anais...** Santa Maria/RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2015, p. 210-217.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J.; SEVERO, C. R. S. **Estudos dos solos do município de Rio Grande**. Pelotas: Universidade/UFPel, Embrapa/CPACT, p.74, 1996. Disponível em: <
<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/737762/6/RioGrande.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2015.

CURRAN, P.J.; DUNGAN, J.L.; GHOLZ, H.L. Seasonal LAI in Slash Pine estimated with Landsat TM. **Remote Sensing of Environment**, v. 39, n. 1, p. 3-13, 1993. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425792901368>>. Acesso em: 04 jan. 2014. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90136-8.

DOSSA, D. et al. **Produção e Rentabilidade de Pinus em Empresas Florestais**. Comunicado técnico. Colombo – PR, dezembro de 2002. Disponível em: <
http://www.cnpf.embrapa.br/publica/comuntec/edicoes/com_tec82.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado de Santa Catarina**. Brasília, 1988. 113p. Disponível em: <
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/294054/zoneamento-ecologico-para-plantios-florestais-no-estado-de-santa-catarina>>. Acesso em: 07 nov. 2014.

EPIPHANIO, J. C. N. et al. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996. Disponível em: <
<http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/4503/1789>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

FERRAZ, A. S. et al. Estimativa de estoque de biomassa em um fragmento florestal usando imagens orbitais. **Floresta e ambiente**, v. 21, n. 3, p. 286-296, Jun/Set, 2014. Disponível em: <
http://www.scielo.br/pdf/floram/v21n3/aop_floram_052213.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015. DOI: 10.1590/2179-8087.052213.

FERREIRA, M. P. **Análise da dinâmica da cobertura florestal no oeste do estado de São Paulo utilizando imagens de satélite**. 2012. 105 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2012.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: CEPEF/FATEC/UFSM, 269 p, 1992.

FLORIANO, E. P. et al. Análise econômica da produção de *Pinus elliottii* na serra do Sudeste, rio grande do sul. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 4, p. 393-406, dez. 2009. Disponível em: <
<http://coral.ufsm.br/cienciaflorestal/artigos/v19n4/A6V19N4.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2015.

FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A.; TOLEDO, G. L. **Estatística aplicada**. São Paulo, Ed. Atlas, p.11-140, 2008.

FREESE, F. Linear regression methods for forest research. **Forest Service Research Paper**, FPL-17, 1964. 137 p.

GOERGEN, L. C. de G. **Uso da reflectância de imagens Landsat 5 TM na identificação de plantios de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus urograndis* e sua correlação com o volume de madeira**. 2014. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

GUJARATI, D. N; PORTER, D.C. **Econometria Básica**. 5. ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

GUYOT, G.; GUYON, D.; RIOM, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v. 4, n. 3, p. 3-18, 1989. Disponível em: < <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10106048909354217>>. Acesso em: 10 set. 2015. DOI: 10.1080/10106048909354217.

HAIR, J. F. Jr. et al. **Multivariate Data Analysis**. 6 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006.

HALL, R. J. et al. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume. **Forest Ecology and Management**, v. 225, n. 1-3, p. 378-390, apr., 2006. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112706000235>>. Acesso em: 11 set. 2015. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.01.014.

HARRIS, R. J. **A primer of multivariate statistics**. 3. ed. Mahwah: Lawrence Erlbaum, 2001.

HASSE, G. **Eucalipto: história de um imigrante vegetal**. Porto Alegre: JA Editores, 2006. 127 p.

HOFFER, R. M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data. In: Swain P. H.; Davis S. M. ed. **Remote sensing: the quantitative approach**, McGraw-Hill. p. 227-290, 1978.

HOLMGREN, J. et al. Estimating Stem Volume and Basal Area in Forest Compartments by Combining Satellite Image Data with Field Data. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 15, n. 1, p. 103–111, nov., 2000. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02827580050160538#.VpEH5vkrLIU>>. Acesso em: 18 out. 2015. DOI: 10.1080/02827580050160538.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, Mar. 2002. Disponível em: < https://cimss.ssec.wisc.edu/dbs/China2011/Day2/Lectures/MODIS_MOD13_NDVI_referenc.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2014.

HUETE, A.; JACKSON, R. D.; POST, D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil background. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, n. 1, p. 37–53, Feb., 1985. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0034425785901117>>. Acesso em: 10 fev. 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Iba 2015**. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://iba.org/pt/biblioteca-iba/publicacoes>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.

JORDAN, C. F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663-666, 1969.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**. Eschborn: Instituto de Silvicultura da Universidade de Gottinger, 1990. 343p.

LATORRE, M. et al. Correção Atmosférica: Conceitos e Fundamentos. **Espaço e Geografia**, v. 5, n. 1, p. 153-178, 2002. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10659/1/ARTIGO_CorrecaoAtmosfericaConceitos.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2015.

LATORRE, Marcelo Lopes. **Utilização de um método de correção atmosférica para o processamento de dados hiperespectrais do sensor AVIRIS em regiões tropicais**. 1998. 195 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1998.

LEAL, F. A. et al. Índice de vegetação na estimativa do volume em um povoamento de eucalipto. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1638-1646, set./dez., 2013. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/indice%20de%20vegetacao.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2015.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. **Remote sensing and interpretation**. 6. ed. New York: John Wiley, 2007. 804 p.

LIOU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. New York: Academic Press, 1980. 392p.

KAUFMAN, J. Y.; TANRE, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. **Transactions on Geoscience Remote Sensing**, v. 30, n. 2, p. 262-270, 1992.

KAUFMAN, J. Y. The atmospheric effect on remote sensing and its correction, In: Asrar, G. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: Willey, 1989. p. 336-428.

KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 1, n. 3, p. 155-159, 1970. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425770800219>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

KOUKAL, T. **Nonparametric Assessment of Forest Attributes by Combination of Field Data of the Austrian Forest Inventory and Remote Sensing Data**. 2004. 115 f. Master Thesis – Universität für Bodenkultur Wien, Wien, Disponível em: <http://www.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H85000/H85700/diss/Koukal_Dissertation.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

KRONKA, F. J. N. et al. **Inventário florestal da vegetação natural do estado do São Paulo**. São Paulo: Páginas e Letras, 2005. 200 p. Disponível em: <<http://iflorestal.sp.gov.br/2005/03/01/inventario-florestal-da-vegetacao-natural-do-estado-de-sao-paulo/>>. Acesso em: 17 nov. 2014.

MACIEL, M. N. M. **Estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária na Amazônia Oriental através de dados orbitais**. 2002. 144 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das angiospermas: myrtales**. Santa Maria: UFSM, 1997. 304 p.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. New York: John Wiley & Sons, 1999. 292 p.

MAZOROTTO, E. B. **Modelos matemáticos para estimar o volume em metros cúbicos com casca de Bracatinga (Mimosa scabrella Benth) em diferentes idades**. 1989. 103 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 1989.

MEDEL, H. B. et al. Determinación del Turno de Corta para Pinus caribaea var. caribaea en la Empresa Forestal Integral “Macurije”. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n.1, p. 109-116, jan/mar. 2011. Disponível em: <<http://www.floram.org/files/v18n1/v18n1a12.pdf>>. Acesso em: 04 fev. 2015. DOI: 10.4322/floram.2011.028.

MENG, Q. et al. A linear mixed-effects model of biomass and volume of trees using Landsat ETM+ images. **Forest Ecology and Management**, v. 244, n. 1-3, p. 93–101, jun., 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112707002915>>. Acesso em: 15 out. 2015.

MOHAMMADI, J. et al. Modeling forest stand volume and density using Landsat ETM+ data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 11, p. 2959-2975, 2010. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431160903140811>>. Acesso em: 01 ago 2015. DOI: 10.1080/01431160903140811.

MORAIS, E. C. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. In: RUDORFF, B. F. T.; MORAES, E. C.; PONZONI, F. J.; CAMARGO JÚNIOR, H.; CONFORTE, J. C.; MOREIRA, J. C.; EPIPHANIO, J. C. N.; MOREIRA, M. A.; KAMPEL, M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. de; MARTINI, P. R.; FERREIRA, S. H.; TAVARES JÚNIOR, S. S.; SANTOS, V. M. N. dos (Ed.). **Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente**. São José dos Campos: INPE, 2002. cap 1, p. 22. Disponível: http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf. Acesso em: 27 jan. 2015.

MOREIRA, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicações. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2007. 320 p.

NAHUZ, M. A. **Informações técnicas**. São Paulo. SP: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1998.

NASCIMENTO, C. R. **Correção atmosférica de imagens do sensor AVHRR/NOAA utilizando produtos atmosféricos do sensor MODIS/TERRA**. 2006. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)–Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. 2013. Disponível em: <http://www.nasa.gov/>. Acesso em: 19 jan. 2015.

NOVO, E. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 388 p.

ORUÉ, N. E. **Estimativa de volume de povoamentos de Pinus spp. Utilizando dados do satélite Landsat 7**. 2002. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

PACHECO, L. R. F. et al. Structural characterization of canopies of *Eucalyptus* spp. using radiometric data from TM/Landsat 5. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 105 – 116, jan. /mar., 2012. Disponível em: <http://www.producao.usp.br/bitstream/handle/BDPI/42531/wos2012-5422.pdf?sequence=1>. Acesso em 09 jun. 2015.

PANDYA, M. R. et al. Bandpass solar exoatmospheric irradiance and Rayleigh optical thickness of sensors on board Indian Remote Sensing Satellites-1B,-1C,-1D, and P4. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.40, n. 3, p. 714–718, 2002. Disponível em: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1000331&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A21604%29. DOI: 10.1109/TGRS.2002.1000331.

PARDI LACRUZ, M. S. **Sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica como subsídio para levantamentos fisiográficos** – estruturais em floresta tropical úmida – estudo de caso: estação científica Ferreira Penna, PA. 1996. 133 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)–Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1996.

PONZONI, F. J. et al. Caracterização espectro-temporal de dosséis de *Eucalyptus spp.* mediante dados radiométricos TM/Landsat5. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 2, p. 267-275, jan. 2015. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602015000200267&script=sci_arttext>. Acesso em: 09 jan. 2016.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação**. 2. ed. São José Dos Campos: Saraiva, 2012. 160 p.

PONZONI, F. J.; ZULLO JUNIOR, J; LAMPARELLI, R. A. C. **Calibração absoluta de sensores orbitais: conceituação, principais procedimentos e aplicação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 72 p.

PONZONI, F. J. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a mata atlântica. In: RUDORFF, B. F. T.; MORAES, E. C.; PONZONI, F. J.; CAMARGO JÚNIOR, H.; CONFORTE, J. C.; MOREIRA, J. C.; EIPHANIO, J. C. N.; MOREIRA, M. A.; KAMPEL, M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. de; MARTINI, P. R.; FERREIRA, S. H.; TAVARES JÚNIOR, S. S.; SANTOS, V. M. N. dos (Ed.). **Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente**. São José dos Campos: INPE, 2002. cap. 1, 22 p. Disponível: < http://ecologia.ib.usp.br/lepac/bie5759/CAP8_FJPonzoni.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2015.

PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação**. In: MENESES, P. R., NETTO, J. S. M. (Org) Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UNB, Embrapa Cerrados, p. 157-199, 2001.

POVH, F. P. et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1075-1083, ago., 2002. Disponível em: < <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/194>>. Acesso em: 09 ago. 2015.

PUHR, G. B.; DONOGHUE, D. N. M. Remote sensing of upland conifer plantations using Landsat TM data: a case study from Galloway, south-west Scotland. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 4, 633–646, nov., 2000. Disponível em: < <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014311600210470>>. Acesso em: 15 jul. 2015. DOI: 10.1080/014311600210470.

RADAMBRASIL. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: DNPM, 1986. 790 p.

RIZZINI, C. T. **Árvores e madeiras úteis no Brasil**: manual de dendrologia. 2. ed. São Paulo: Edgard Bruncher, 1981. 294 p.

ROBINOVE, C. J. Computation with physical values from Landsat digital data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 48, n. 5, p. 781-784, Mai. 1982. Disponível em: < <http://www.asprs.org/Photogrammetric-Engineering-and-Remote-Sensing/PE-RS-Archive-Search-2009-and-earlier.html>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3., 1974, Washington. **Anais...** Washington: NASA, 1974. p. 309-317.

ROCHA, M. P. ***Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria-prima para serrarias.** 2000. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento:** Tecnologia Transdisciplinar. Juiz de Fora: Ed. do Autor, 2000. 220 p. Disponível em: <<http://www.bdigital.unal.edu.co/41440/1/12534-32572-1-PB.doc>>. Acesso em: 10 jan. 2015.

SALLES, V. (Coord.). **Guia do meio ambiente:** Litoral de Alagoas. 2. ed. Maceió, 1994.

SCHMIDT, A. B. et al. Análise do posicionamento obtido via Global Positioning System (GPS) em diferentes situações de obstrução. In: Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 8., 2013, Curitiba. **Anais...** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2013.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. de. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal.** 2. ed. Santa Maria: FACOS, 2009. 294 p.

SCHNEIDER, P. R. et al. Produção de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em diferentes intensidades de desbastes. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p.129-140, nov.1998. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/cienciaflorestal/artigos/v8n1/art12v8n1.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2015.

SHIMIZU, J. Y.; MEDRADO, M. J. S. **Cultivo de Pinus.** Embrapa Florestas: Sistemas de Produção, 2005. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/cultivosPinus/03_2_pinus_taeda.htm>. Acesso em: 15 nov. 2014.

SOUSA, C. L. **Uso de imagens-índice e de imagens-proporção para avaliar a quantidade de madeira em povoamentos de *Pinus spp.*** 1997. 111 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)–Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1997.

SOUSA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de *Pinus spp.* In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998, Santos. **Anais...** Santos: INPE, 1998. Disponível em: <http://mar.tecnico.unicamp.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.11.10.35/doc/2_03p.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2014.

SRIVASTAVA, V. K. et al. Preparation of volume table of SAL (*Shorea robusta*) - an approach using satellite data. **International Applied Earth Observation and**

Geoinformation, v. 1, n.3-4, p. 214-221, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243499850156>>. Acesso em: 04 set. 2015. DOI: 10.1016/S0303-2434(99)85015-6.

STAPE, J. L. **Teste de uso múltiplo de Eucalyptus**. Piracicaba: IPEF/ LCF/ ESQ/USP, 1998.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. M. **Principles and procedures of statistics**. New York: McGraw-Hill, 1960. 481 p.

SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw-Hill, 1978. 396 p.

TABACHNICK, B.; FIDELL, L. S. **Using multivariate statistics**. 3. ed. New York: Harper Collins, 1996.

THENKABAIL, P. S. et al. Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 1, p. 23-43, mar., 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425703003560>>. Acesso em: set. 2015.

TILLACK, A. et al. Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-resolution satellite-based vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 141, p. 52-64, Feb., 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425713003866>>. Acesso em: 4 set. 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.018.

TROTTER, C.; DYMOND, J.; GOULDING, C. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 10, p. 2209 – 2223, nov., 1997. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014311697217846>. Acesso em: 10 ago. 2015. DOI: 10.1080/014311697217846.

TSUCHIYA, I., **Regressão logística aplicada na análise espacial de dados arqueológicos**. 2002. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Presidente Prudente, 2002.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat missions**. 2013. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php>. Acesso em: 06 set. 2013.

XAVIER, A. C. **Estimativa de propriedades biofísicas de plantações de Eucalyptus a partir de dados Landsat/TM**. 1998. 116 p. Dissertação (Sensoriamento Remoto)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1998.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com Araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência**

Florestal, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, abr./jun., 2009. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/cienciaflorestal/artigos/v19n2/A6V19N2.pdf>>. Acesso em 09 ago. 2015.

WEBER, E. J.; HASENACK, H.; FERREIRA, C. J. S. **Adaptação do modelo digital de elevação do SRTM para o sistema de referência oficial brasileiro e recorte por unidade da federação**. Porto Alegre: UFRGS – IB - Centro de Ecologia, 2004.

WINK, C.; et al. Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 057-067, 2012. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr93/cap06.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2015.