

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**



RUTE BERGER

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR ESTIMADO POR FERRAMENTAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO PARA A OTIMIZAÇÃO DE INVENTÁRIOS
EM FLORESTAS PLANTADAS**

RECIFE – PE

2014

RUTE BERGER

ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR ESTIMADO POR FERRAMENTAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO PARA A OTIMIZAÇÃO DE INVENTÁRIOS
EM FLORESTAS PLANTADAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte das exigências à obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais.

Prof. PhD. José Antônio Aleixo da Silva
ORIENTADOR-UFRPE

Prof. Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira
COORDENADOR-UFRPE

Prof.^a Dr.^a Ana Lúcia Bezerra Candeias
COORDENADORA-UFPE

RECIFE – PE

2014

RUTE BERGER

**ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR ESTIMADO POR FERRAMENTAS DE
SENSORIAMENTO REMOTO PARA A OTIMIZAÇÃO DE INVENTÁRIOS
EM FLORESTAS PLANTADAS**

DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

Recife, 24 de outubro, 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Rafael Rubilar Pons
(Facultad de Ciencias Forestales/UDEC-Chile)

Prof. PhD. Sebastião do Amaral Machado
(Departamento de Ciências Florestais/UFPR)

Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger
(Departamento de Ciências Florestais/UFSM)

Prof. Dr. João Rodrigues Tavares Junior
(Departamento de Cartografia/UFPE)

Prof. PhD. José Antônio Aleixo da Silva
(Orientador – Presidente da Banca)

Para minha irmã Marta,
inspiradora e incentivadora,
por todo seu amor,
com todo meu amor.

*Für Großmutter,
zum Geburtstag.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCF) dessa Instituição, pela oportunidade de desenvolver este trabalho de tese.

Aos meus orientadores, Prof. José Antônio Aleixo da Silva, Prof. Rinaldo Caraciolo Ferreira e Prof.^a Ana Lúcia Bezerra Candeias, pelo apoio, colaboração, amizade e confiança durante a elaboração deste trabalho.

À empresa CMPC Celulose Riograndense, especialmente aos engenheiros Rodrigo Alarcón e Lucas Zancan Pissinin, pelo apoio ao desenvolvimento do projeto.

Ao Prof. Rafael Rubilar, da Forest Productivity Cooperative, pelo apoio na concepção e no desenvolvimento da tese.

Aos membros da banca, pelas contribuições e oportunidade de aprendizado.

Aos meus pais, Rosa e Bertholdo, que ao me propiciarem os estudos, abriram as portas do mundo para mim.

À minha família - meus queridos, mesmo distantes, tão perto.

Aos amigos de longe, sempre presentes em pensamento.

Aos novos amigos dessa nova terra, cuja paciência nesse período reforçou ainda mais os laços de amizade.

Ao Anderson Reis Soares, pelo companheirismo e pela fundamental ajuda no processamento das imagens.

Aos engenheiros Rodrigo Barneche, Juliana Gomes e Elias Araújo pela disposição em ajudar, e ao supervisor de campo Roginaldo, da empresa Sertef, pelo indispensável trabalho na coleta de dados.

À Ângela Maria Miranda de Freitas, pelo companheirismo e incentivo incansável durante a hora do café de rico.

À Isabelle Meunier e Anabel Mello, pela disposição em revisar o trabalho.

Aos colegas da Área de Manejo do Departamento de Ciência Florestal da UFRPE, pelo apoio durante o tempo que precisei dedicar à tese.

Aos que incentivaram e contribuíram para que eu pudesse avançar mais essa etapa. Sou feita de um pouco de cada um que ficou ou passou.

“Gracias a la vida que me ha dado tanto.”

(V. Parra)

*“Hay, recuerdos que no voy a borrar
personas que no voy a olvidar.
Hay, aromas que me quiero llevar
silencios que prefiero callar.”*

(Fito Páez)

RESUMO

Neste trabalho avaliou-se a estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) utilizando produtos de sensoriamento remoto (SR) como recurso auxiliar para aumentar a precisão de inventários florestais de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith. O IAF foi medido no campo (IAF_{campo}) utilizando o LAI-2000 e seu comportamento foi analisado em diferentes idades. Procurou-se estabelecer a relação entre o IAF_{campo} e o incremento periódico em volume (IP) em um período de seis meses, para avaliar a possibilidade de uso do IAF como um indicador de produtividade e consequentemente como ferramenta para o planejamento do IF. O IAF_{campo} também foi relacionado a três diferentes Índices de Vegetação (IV): Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice da Razão Simples (SRI) e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI), obtidos de uma imagem Landsat 8/OLI, com o objetivo de selecionar o melhor IV para estimar o IAF por SR (IAF_{SR}), obtendo assim a espacialização da informação nos talhões. Desta maneira, foram analisadas as possibilidades de uso desse produto como um inventário piloto, buscando estimar a intensidade ótima de amostragem pela estratificação da população (talhões individuais) em estratos homogêneos de IAF_{SR} . Quando a estratificação não foi possível, a intensidade ótima de amostragem foi obtida pela estimativa da variabilidade de IAF_{SR} entre pixels nos talhões. Quatro talhões foram utilizados para validar o método no campo (três talhões com estratos e um talhão sem estratos), para um limite de erro (LE) de 10% ou 15%. Os resultados mostraram que o IAF_{campo} apresentou um comportamento padrão para a espécie, com valor de máxima próximo aos 42 meses. A relação entre o IAF_{campo} e o IP permitiu a utilização do IAF como indicador espacial de produtividade ($r=0,64$). A equação com IAF estimado como função de SRI apresentou o maior melhor R^2 (67,8%) e menor S_{yx} (12,5%), e foi utilizada na imagem para a espacialização do IAF. Nos talhões em que foi possível a formação de estratos de IAF_{SR} (superiores a seis hectares), a análise de variância (ANOVA) indicou que a estratificação traria vantagens ao IF quando comparada ao processo inteiramente aleatório. Na validação de campo para os talhões com estratos, a ANOVA indicou diferença significativa entre estratos de IAF_{SR} e o erro de amostragem foi menor para a amostra estratificada quando comparada ao processo aleatório simples, com exceção de um talhão onde a estratificação não trouxe vantagens. O método também foi capaz de detectar estratos de IAF_{SR} não detectados na primeira amostragem e que foram estatisticamente significativos no campo. Para talhões com estratos ou sem estratos, a validação de campo mostrou que o IAF_{SR} pode ser utilizado como ferramenta auxiliar para o planejamento do inventário, apesar de mostrar tendências em superestimar a variação da população, pois os erros de amostragem foram consideravelmente mais baixos que os limites estabelecidos na estimativa da intensidade de amostragem.

Palavras-chave: Landsat 8/OLI. Índices de vegetação. Estratificação florestal. Intensidade de amostragem.

ABSTRACT

In this work it was suggested the Leaf Area Index (LAI) estimated by remote sensing products (RS) as an ancillary resource to increase the precision of the forest inventory of clonal plantations of *Eucalyptus saligna* Smith. LAI was measured in the field (LAI_{field}) using LAI-2000 and his behavior was examined at different ages. We sought to establish the relationship between the LAI_{field} and periodic increment in volume (IP) in a six months period, to assess the possibility to use LAI as an productivity indicator and consequently as a tool for the Forest Inventory (FI) planning. The LAI_{field} was also related to three different vegetation indices (VI): Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Simple Ratio Index (SRI) and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), obtained from a Landsat image 8/OLI. The goal was to select the best VI to estimate LAI using RS (LAI_{RS}) and to obtain the spatial distribution of LAI in the stands. Thus, the possibilities for use of this product as a preliminary inventory were analyzed, looking for estimate the optimal sampling rate for the population stratification (individual stands) in homogeneous LAI_{RS} strata. When stratification was not possible, the optimal sampling intensity was obtained by estimating the variability of LAI_{RS} between pixels in the stands. Four stands were tested to validate this tool in the field (three stands with strata and one without strata), for Limit Errors of 10% and 15%. The results indicate that the LAI_{field} showed a typical behavior for the specie, with a maximum value close to 42 months. The relationship between the IP and LAI_{field} was satisfactory ($r=0.64$) and allowed the use of LAI as a spatial productivity indicator. The equation with LAI estimated by SRI showed better R^2 (67.8%) and lower S_{yx} (12.5%), and was used to calculate the spatial distribution of the LAI_{RS} . In the stands with LAI_{RS} strata (bigger than six hectares), analysis of variance (ANOVA) indicated that stratification would bring benefits to the FI, when compared to the simple random sampling. In the field validation for the stands with strata, ANOVA indicated a significant difference between LAI_{RS} strata. The sampling error was lower for the stratified sample compared to simple random sampling, with the exception of one stand. The tool was also able to detect significant LAI_{RS} strata that were not included in the simple random sample occurred in the first inventory. For stands with or without strata, field validation showed that LAI_{RS} could be used as an ancillary tool for forest inventory planning. Despite showing tendencies to overestimate the population variance, sampling errors using LAI_{RS} were considerably lower than those established limits of sampling intensity.

Keywords: Landsat 8/OLI. Vegetation indices. Forest stratification. Sampling intensity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Seção transversal de uma folha e caracterização da sua estrutura celular (a) e (b) possíveis trajetórias da radiação eletromagnética incidente. _____	37
Figura 2 – Assinatura espectral típica das diferentes estruturas de uma folha. _____	38
Figura 3 – Dados de precipitação e temperatura da estação meteorológica do Horto Florestal Barba Negra durante o ano 2013. _____	44
Figura 4 – Talhões selecionados para avaliar a estimativa da intensidade de amostragem para o inventário florestal pelo uso de IAF_{SR} . _____	46
Figura 5 – Imagem-composição RGB obtida pelo sensor Operational Land Imager (OLI), a bordo do satélite Landsat 8, com identificação do local de estudo. _____	50
Figura 6 – Comportamento do IAF_{campo} de um clone de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith, em diferentes idades, tipos de solo e espaçamentos de plantio. _____	58
Figura 7 – Dados observados de IAF_{campo} e de um experimento de um clone de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith em diferentes idades, tipos de solo e espaçamentos de plantio. A linha sólida representa a equação de regressão. _____	62
Figura 8 – Dados observados de incremento periódico em volume total com casca (IP) em função da idade, para um clone de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith, em parcelas com diferentes idades, diferentes tipos de solo e espaçamentos. _____	65
Figura 9 – Dados observados e ajuste de incremento periódico em volume total com casca (IP) em função do IAF_{campo} para um clone de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith, em parcelas com diferentes idades, tipos de solo e espaçamentos. _____	66
Figura 10 – Imagem índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) obtida a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para o Horto Florestal Barba Negra (HFBN), em maio/2013. _____	70
Figura 11 – Imagem índice da razão simples (SRI) obtida a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para o Horto Florestal Barba Negra (HFBN), em maio/2013. _____	71
Figura 12 – Imagem índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI) obtida a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para o Horto Florestal Barba Negra (HFBN), em maio/2013. _____	72
Figura 13 – Mapa de uso do solo para o Horto Florestal Barba Negra (HFBN). _____	73
Figura 14 – Distribuição de pixels segundo a classe de uso do solo no horto florestal Barba Negra (HFBN). _____	74
Figura 15 – Relação entre o índice de área foliar observado no campo (IAF_{campo}) e o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), obtido a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para todas as idades avaliadas (a) e para três, cinco e seis-oito anos (c, e, g). Dados observados e estimados de IAF para todas as idades avaliadas (b) e para três, cinco e seis-oito anos (d, f, h). _____	78
Figura 16 – (a) Relação entre o índice de área foliar observado no campo (IAF_{campo}) e o índice da razão simples (SRI), obtido a partir de uma imagem	

Landsat 8/OLI, para todas as idades avaliadas (a) e para três, cinco e seis-oito anos (c, e, g). Dados observados e estimados de IAF para todas as idades avaliadas (b) e para três, cinco e seis-oito anos (d, f, h). _____	79
Figura 17 – (a) Relação entre o índice de área foliar observado no campo (IAF_{campo}) e o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI), obtido a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para todas as idades avaliadas (a) e para três, cinco e seis-oito anos (c, e, g). Dados observados e estimados de IAF para todas as idades avaliadas (b) e para três, cinco e seis-oito anos (d, f, h). _____	80
Figura 18 – Mapa da imagem índice de área foliar estimado (IAF_{SR}) pelo índice da razão simples (SRI), obtida a partir de uma imagem Landsat 8/OLI para o horto florestal Barba Negra (HFBN). _____	84
Figura 19 – Distribuição dos pixels por classe de IAF_{SR} para o horto florestal Barba Negra (HFBN). _____	85
Figura 20 – Classificação de pixels segundo a classe de IAF_{SR} e uso do solo no horto florestal Barba Negra (HFBN). _____	86
Figura 21 – Classificação de pixels segundo a classe de uso do solo e IAF_{SR} no horto florestal Barba Negra (HFBN).. _____	89
Figura 22 – Pixels com valores IAF_{SR} inferior a zero em talhão comercial no horto florestal Barba Negra (HFBN). _____	90
Figura 23 – Imagem IAF_{SR} do talhão 115B, com possibilidade de estratificação no campo. _____	94
Figura 24 – Intensidade de amostragem estimada para os processos de amostragem inteiramente aleatória (AIA) e amostragem estratificada (AE), a partir do IAF_{SR} , para os talhões com estratos do HFBN, para os LE% de 5%, 10% e 15%. Continua... _____	98
Figura 25 – Imagem IAF_{SR} de um talhão sem possibilidade de estratificação no campo. _____	100
Figura 26 – Mapa com a localização de unidades amostrais do inventário florestal do talhão 126A, baseado na estratificação por IAF_{SR} (validação de campo). _____	105
Figura 27 – Mapa com a localização de unidades amostrais do inventário florestal do talhão 401B, baseado na estratificação por IAF_{SR} (validação de campo). _____	107
Figura 28 – Mapa com a localização de unidades amostrais do inventário florestal do talhão 418B, baseado na estratificação por IAF_{SR} (validação de campo). _____	108
Figura 29 – Mapa com a localização de unidades amostrais do inventário florestal do talhão 406B, baseado no IAF_{SR} (validação de campo). Mapa para talhão sem estratos de IAF. _____	110
Figura 30 – Distribuição dos valores observados de VTCC por unidade amostral no inventário de validação para os talhões com estratos: 126A (a), 418B (b), 401B (c). A linha sólida representa uma equação de tendência. _____	111

Figura 31 – Comportamento do coeficiente de variação (CV%) para classes de IAF _{SR} , classes de IAF _{SR} agrupados e para o inventário de validação, para os talhões (a) 126A, (b) 401B e (c) 418B.	112
Figura 32 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 126A.	139
Figura 33 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 163B.	139
Figura 34 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 209D.	140
Figura 35 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 272C.	140
Figura 36 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 348A.	141
Figura 37 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 351A.	141
Figura 38 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 401B.	142
Figura 39 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 407D.	142
Figura 40 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 410A.	143
Figura 41 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 418B.	143
Figura 42 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 433B.	144
Figura 43 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 121A.	145
Figura 44 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 122A.	145
Figura 45 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 129A.	146
Figura 46 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 147A.	146
Figura 47 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 150A.	147
Figura 48 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 341A.	147
Figura 49 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 406B.	148
Figura 50 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 407C.	148
Figura 51 – Imagem IAF _{SR} para o talhão 413D.	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações da imagem do sensor OLI/Landsat 8 utilizada para a estimativa dos Índices de Vegetação dos plantios comerciais clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith do Horto Florestal Barba Negra, em maio/2013. _____	50
Tabela 2 – Classes de índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto (IAF_{SR}) para plantios comerciais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith no Horto Florestal Barba Negra, em maio/2013. _____	53
Tabela 3 - Análise de variância da efetividade teórica da estratificação para talhões com estratos de IAF_{SR} no Horto Florestal Barba Negra. _____	55
Tabela 4 – Estatística descritiva para IAF_{campo} de um clone de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith em diferentes idades. _____	57
Tabela 5 – Estatística descritiva (média e amplitude) e coeficiente de variação ($CV\%_{IAF}$) de IAF_{campo} de um clone de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith nas diferentes idades, tipos de solo e espaçamentos de plantio avaliados. _____	59
Tabela 6 – Coeficientes e estatísticas do modelo de regressão ajustado para estimar o índice de área foliar (IAF) em função da idade (t) de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith. _____	61
Tabela 7 – Estatística descritiva para incremento periódico em volume total com casca (IP) de um clone de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith nas diferentes idades de medição. _____	63
Tabela 8 – Coeficientes e estatísticas do modelo de regressão linear simples ajustado para estimar o incremento periódico em volume total com casca (IP) em função do IAF_{campo} de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith. _____	65
Tabela 9 - Estatísticas e parâmetros de regressão para estimar o índice de área foliar (IAF) em função de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice da Razão Simples (SRI) e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI). _____	74
Tabela 10 - Estatísticas e parâmetros de regressão para o índice de área foliar (IAF) em função de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice da Razão Simples (SRI) e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI), em diferentes idades. _____	77
Tabela 11 – Classificação de pixels e área correspondente (ha) segundo a classe de uso do solo e IAF_{SR} no horto florestal Barba Negra (HFBN). _____	85
Tabela 12 – Estimadores de inventário de campo para volume total com casca (VTCC) de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith do horto florestal Barba Negra (HFBN), em junho/2013. _____	92
Tabela 13 – Estimativa da intensidade de amostragem estratificada (AE) com alocação ótima para o inventário dos talhões com estratos de IAF_{SR} no horto florestal Barba Negra. _____	95

Tabela 14 – Estimativa da intensidade de amostragem para o inventário florestal de talhões com estratos de IAF_{SR} , para o processo de amostragem inteiramente aleatória.	97
Tabela 15 - Intensidade de amostragem calculada para o processo de amostragem inteiramente aleatória (AIA), a partir do IAF_{SR} , para os talhões sem estratos do HFBN, para os LE% de 5%, 10% e 15%.	101
Tabela 16 – Estimadores de inventário (volume total com casca, em $m^3 \cdot ha^{-1}$) para os talhões de validação de IAF_{SR} , pelo processo de amostragem aleatória simples (AIA) e amostragem estratificada (AE).	103
Tabela 17 - Análise de variância para o efeito de dois tipos de solo sobre o IAF_{campo} de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith, aos três anos de idade, em espaçamento 3 x 3m.	129
Tabela 18 - Análise de variância para o efeito de dois tipos de solo sobre o IAF_{campo} de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith, aos cinco anos de idade, em espaçamento 3,5 x 2,14 m.	129
Tabela 19 - Análise de variância para o efeito de dois espaçamentos (3,50 x 2,14m e 3,00 x 2,50m) sobre o IAF_{campo} de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith, aos cinco anos de idade, em solos do tipo AVADT.	129
Tabela 20 - Análise de variância para o efeito de dois espaçamentos (3,00 x 3,00m e 3,00 x 2,50m) sobre o índice de área foliar (IAF) de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith, aos seis anos de idade, em solos do tipo AVADT.	129
Tabela 21 – Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 115B.	135
Tabela 22 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 126A.	135
Tabela 23 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 132B.	135
Tabela 24 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 163B.	135
Tabela 25 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 209D.	135
Tabela 26 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 272C.	135
Tabela 27 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 401B.	135
Tabela 28 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 407D.	136
Tabela 29 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 410A.	136
Tabela 30 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 418B.	136
Tabela 31 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR} . para o talhão 433B.	136
Tabela 32 - Análise de variância da estratificação da validação de campo para o talhão 126A.	138
Tabela 33 - Análise de variância da estratificação da validação de campo para o talhão 401B.	138
Tabela 34 - Análise de variância da estratificação da validação de campo para o talhão 418B.	138

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 Inventário Florestal.....	21
2.1.1 Processos de Amostragem.....	23
2.1.2 Mapeamento e planejamento de inventários florestais.....	25
2.1.3 Precisão e intensidade de amostragem.....	26
2.2 Índice de Área Foliar	29
2.2.1 Potencial de uso do IAF em inventários florestais	33
2.3 Sensoriamento remoto da vegetação	35
2.3.1 Comportamento espectral da vegetação	36
2.3.2 Índices de vegetação de sensores remotos.....	40
3 MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1 Local de estudo.....	44
3.2 Características dos plantios selecionados	45
3.3 Medição de unidades amostrais de Inventário.....	45
3.3.1 Estimadores do inventário florestal de campo	47
3.4 Medição do Índice de Área Foliar no campo.....	47
3.5 Relação entre Incremento Periódico em volume e IAF_{campo}	48
3.6 Obtenção dos Índices de Vegetação	49
3.7 Relação IAF_{campo} e índices de vegetação	51
3.8 Planejamento do inventário florestal pelo uso de IAF_{SR}	52
3.8.1 Talhões com estratos de IAF_{SR}	54
3.8.2 Talhões sem estratos de IAF_{SR}	55
3.9 Validação da estimativa da intensidade de amostragem por IAF_{SR}	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 Caracterização do Índice de Área Foliar medido no campo.....	57
4.2 Relação do Índice de Área Foliar e incremento periódico em volume	63
4.3 Obtenção dos índices de vegetação a partir da imagem Landsat/OLI.....	68
4.4 Índice de Área Foliar em função dos índices de vegetação	74
4.5 Análise da imagem IAF	82

4.6 Caracterização dos talhões pelo inventário de campo.....	91
4.7 Intensidade de amostragem para talhões com estratos de IAF_{SR}	93
4.8 Intensidade de amostragem para talhões sem estratos de IAF_{SR}	100
4.9 Validação de campo.....	102
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	115
REFERÊNCIAS.....	119
APÊNDICE A – Análise de variância para o efeito de tipos de solo sobre o IAF_{campo} de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith	129
APÊNDICE B – Análise de variância para a relação entre o IAF_{campo} e a idade de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith.....	130
APÊNDICE C – Análise de variância para a relação entre o incremento periódico em volume (IP) e o IAF_{campo} de plantios clonais de <i>Eucalyptus saligna</i> Smith, em diferentes idades.....	130
APÊNDICE D – Estimadores de Inventário Florestal para o Horto Florestal Barba Negra em junho de 2013. (continua).....	131
APÊNDICE E – Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. (continua)	135
APÊNDICE F – Estimadores de inventário de validação de campo para os talhões com estratos de IAF_{SR}.	137
APÊNDICE G – Análise de variância da estratificação da validação de campo.	138
APÊNDICE H – Imagem IAF_{SR} dos talhões com possibilidade de estratificação no campo.	139
APÊNDICE I – Imagem IAF_{SR} dos talhões sem possibilidade de estratificação no campo.	145

1 INTRODUÇÃO

A percepção de que o inventário florestal (IF) é uma ferramenta fundamental para a gestão florestal já foi incorporada há algum tempo pelos principais produtores de florestas plantadas do Brasil. Empresas que buscam a excelência na gestão de seus recursos têm nos inventários florestais a base para o atendimento das mais variadas demandas dos seus setores internos, entre elas:

- a) estimativas de estoque madeira para o atendimento da demanda das unidades industriais;
- b) controle operacional de atividades florestais:
 - sobrevivência e sanidade de plantios, com a devida identificação das causas;
 - monitoramento das atividades silviculturais, por meio de resultados de desempenho;
 - planejamento de operações de colheita: dimensionamento de equipamentos, pessoal e logística;
 - controles de produção de madeira: corte, baldeio, transporte, logística de distribuição;
 - entrada de madeira e estoque nas unidades industriais;
- c) avaliação da produtividade de materiais genéticos e de sítios florestais;
- d) comparações dos valores potenciais esperados e valores reais produzidos;
- e) decisões de manejo florestal (desramas, desbastes): localização, oportunidade e quantidade;
- f) modelagem de crescimento e produção, para fins de estimativa de estoque futuro;
- g) planejamento de longo prazo, que pode incluir expansões de negócio, entre outros.

As demandas externas também influenciam na melhoria da gestão dos recursos florestais. As atuais exigências de mercado estão voltadas cada vez mais para produtos oriundos de uma produção comprovadamente sustentável, fundamentada pelos seus três pilares: socialmente justos, ambientalmente corretos e economicamente viáveis.

Neste sentido, o inventário florestal, amparado por um conjunto de processos de amostragem que permitem estimar variáveis qualitativas e/ou quantitativas das florestas, constitui-se em um dos principais instrumentos para a tomada de decisões florestais que visam atender a esses requerimentos. Aliado a outras ferramentas, tais como a prognose de produção, técnicas de manejo e as análises econômico-financeiras, o inventário florestal oferece suporte relevante para a gestão do negócio florestal, inclusive sob o ponto de vista ambiental e social.

Certamente a busca de atendimento aos requisitos de sustentabilidade deu suporte à importância do inventário florestal nas empresas, porém não se constitui no único motivador. Unidades industriais cada vez maiores, de alta capacidade de produção instalada e controle minucioso de processos, têm gerado demanda de matéria-prima de qualidade e em quantidades proporcionais ao seu crescimento.

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Celulose e Papel (2013), o consumo brasileiro de madeira em 2012 foi de 182,4 milhões de metros cúbicos (m^3), provenientes de plantios florestais. Somente no setor de celulose, por exemplo, a produção em 2013 foi de aproximadamente 15 milhões de toneladas de celulose (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, 2014), o que implicaria em um consumo aproximado de 70 milhões de m^3 de madeira reflorestada.

Frente a essas magnitudes de consumo, percebe-se facilmente que a incerteza das estimativas de inventário, em termos absolutos, obedece a mesma proporção. Assim, os erros de estimativa de produção de madeira pelo inventário florestal já não podem ser tratados como irrelevantes e tampouco considerados com os limites de erro admitidos em décadas passadas. Um erro de amostragem de 10%, em termos de consumo anual brasileiro, atualmente implica em incertezas de +/- 18,2 milhões de m^3 de madeira. Estes valores são muito altos, principalmente quando se considera o valor da madeira e os consequentes transtornos financeiros e operacionais deste nível de incerteza (BURKHART et al., 1978; EID, 2000). Entretanto, apesar da expressividade destes números e da importância em obter estimadores mais precisos, na análise financeira dos negócios florestais o inventário florestal normalmente é considerado parte dos custos e não agrega valor aos produtos inventariados, o que ao mesmo tempo é um forte motivador para melhorar o processo.

Conscientes das consequências de se trabalhar com altas margens de incerteza de produção, muitas empresas florestais têm melhorado a precisão dos

inventários com a instalação de um maior número de unidades amostrais (UA). Entretanto, no estudo da intensidade de amostragem existe um limite a partir do qual, dependendo da variabilidade de cada população, não há um incremento significativo da precisão, ocasionando desperdício de recursos (COCHRAN, 1965; SHIVER; BORDERS, 1996). Por outro lado, amostras insuficientes levam à necessidade de voltar ao campo para a reposição de UA e assim chegar à precisão requerida. Ambas as situações implicam em custos maiores, seja pelo excesso de UA instaladas, seja pelo maior custo unitário das UA de reposição, podendo esta última ser agravada pelos curtos tempos disponíveis entre a necessidade dos resultados de inventário e o corte da floresta, o que na maioria das vezes leva a se optar pelo excesso.

Muitas vezes nas empresas a intensidade de amostragem é pré-estabelecida, baseada na análise de históricos de precisão obtida em inventários anteriores e na minimização da necessidade de voltar ao campo para a reposição de amostras. Contudo, motivadas pelos custos de análise e do tempo restrito, poucas vezes são realizadas as análises da estatística que definitivamente estabelece o tamanho ideal da amostra: a variância da variável de interesse, cujo comportamento pode ser diferente ao se introduzir novas tecnologias, materiais genéticos ou até mesmo de acordo à qualidade das operações florestais.

Apesar da importância dos inventários florestais e da intensificação de recursos destinados à melhoria das estimativas nos últimos anos, existem ainda grandes oportunidades no desenvolvimento e potencialização de ferramentas e rotinas que visem minimizar a intensidade de amostragem e manter ou aumentar os níveis de precisão.

O uso de sensoriamento remoto (SR) para inventários de florestas é um exemplo dessas oportunidades. Sua aplicação para esta finalidade, já mencionada por Loetsch e Haller (1964), ainda não é utilizada com todo o seu potencial em escala operacional (BERGER, et al., 2009; McROBERTS et al., 2002a).

Atualmente para o planejamento do inventário florestal baseado em informações cadastrais e mapas temáticos oriundos de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sistemas de Informações Florestais (SIF) bastante eficientes, os produtos de sensores remotos ainda não adquiriram maior importância, pois sua aplicação em geral ainda se restringe ao delineamento de superfícies (HOLOPAINEN; TALVITIE, 2006; McROBERTS et al., 2002a; McROBERTS et al.,

2006), sendo que as propriedades espectrais dos sensores são pouco exploradas (BERGER et al., 2014; McROBERTS et al., 2002a).

A possibilidade de obter a distribuição espacial do vigor da vegetação, traduzido sob a forma de indicadores de interesse para o inventário florestal, poderia contribuir para ampliar a lista de usos e aplicações dos produtos de sensores remotos no setor florestal, incluindo o inventário florestal, com redução de custo das operações. Vários trabalhos abordam as estimativas de atributos das florestas, tais como biomassa (JENSEN, 2011; LU, 2006; MACIEL et al., 2009; SONG, 2013), produção volumétrica (BERRA et al., 2012; CANAVESI; PONZONI; VALERIANO, 2010; GEBRESLASIE; AHMED; AARDT, 2010; MACIEL et al., 2009; MÄKELÄ; PEKKARINEN, 2004; SALVADOR; PONS, 1998; WARING; COOPS; LANDSBERG, 2010), densidade de árvores (MACIEL et al., 2009; SIVANPILLAI et al., 2006) e Índice de Área Foliar (IAF) (BULCOCK; JEWITT, 2010; CHEN; CIHLAR, 1996; FLORES et al., 2006; HOUBORG; ANDERSON; DAUGHTRY, 2009; JENSEN, 2011; LAW; WARING, 1994; SANQUETTA et al., 2014; SONG, 2013; STENBERG et al., 2004), utilizando sensores remotos. Alguns desses estudos, entretanto, abordam a pouca precisão dessas relações (BERRA et al., 2012; CANAVESI; PONZONI; VALERIANO, 2010; MÄKELÄ; PEKKARINEN, 2004; SALVADOR; PONS, 1998; SONG, 2013), principalmente no que se refere às estimativas de biomassa e volume. Outros apresentam boas e consolidadas relações, tais como o IAF, porém sua utilidade para o IF foi pouco explorada por não oferecer uso prático direto (SIVANPILLAI et al., 2006).

Neste sentido, o inventário florestal ainda se caracteriza como a principal ferramenta para gerar estimadores precisos da produção florestal. Por outro lado, é necessário reconhecer que o sensoriamento remoto é um suporte fundamental para o planejamento do inventário florestal, podendo contribuir significativamente para a melhoria da qualidade das estimativas e/ou para a diminuição de custos, por meio de estratificação, localização ótima de parcelas ou uso do CV% para estimar a intensidade de amostragem no inventário (BERGER et al., 2009; BERGER et al., 2014; DAVI et al., 2008; FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007; MAHTO, 2001; McROBERTS et al., 2002a; RIBEIRO, 2007).

Não obstante, uma imagem de sensoriamento remoto pode oferecer simultaneamente várias aplicações (McROBERTS et al., 2002a), o que abrange usos desde a delimitação de área (cartografia e SIG) até a mensuração de variáveis

dendrométricas de forma individual e coletiva (dendrometria e inventário florestal), por exemplo. Os custos de aquisição de imagens podem ser diluídos entre as diversas aplicações possíveis e compor parte dos custos de inventário. Esse por sua vez, poderia não ter seu valor significativamente afetado, visto que a intensidade de amostragem poderia vir a ser otimizada.

Este trabalho está baseado em estudos anteriores (ALBAUGH et al., 1998; BERGER et al., 2009; FLORES, 2003; FLORES et al., 2006; PEDUZZI, 2007), realizados com o apoio da Forest Productivity Cooperative (North Carolina State University, Virginia Tech University e Universidad de Concepción) e procura dar continuidade às diversas possibilidades de uso do IAF como ferramenta de suporte às decisões florestais e assim, teve como objetivo geral estimar o IAF de povoamentos florestais clonais de *Eucalyptus saligna* Smith pelo uso de produtos de sensores remotos e estudar sua relação com a produção florestal, buscando desta maneira a otimização do inventário florestal.

Os objetivos específicos foram:

- estudar as respostas de IAF medido em campo (IAF_{campo}) em diferentes idades de plantio;
- estudar as relações entre o IAF_{campo} e a capacidade produtiva dos plantios clonais avaliados, procurando avaliar a possibilidade de uso do IAF como indicador de produtividade;
- avaliar as relações entre IAF_{campo} e diferentes índices de vegetação (IV) obtidos de imagens do sensor OLI, a bordo do satélite Landsat 8, procurando estabelecer modelos de predição de IAF em função de IV de sensoriamento remoto;
- analisar a viabilidade técnica da estimativa da intensidade de amostragem de inventário a partir do IAF estimado por IV de sensores remotos (IAF_{SR});

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Inventário Florestal

O inventário florestal (IF) tem em comum com os inventários de outra natureza (industriais e comerciais, por exemplo) a característica de que as informações coletadas são imprescindíveis para o planejamento de um desenvolvimento econômico balanceado e tecnicamente sustentável, suprindo informações importantes para as diferentes atividades florestais (LOETSCH; HALLER, 1964).

Loetsch (1963), ao analisar o significado do IF para as políticas florestais, para a silvicultura e para a economia industrial europeia, destacou a importância de três setores de especialização no IF: a estatística, o mapeamento e a mensuração florestal.

Apesar de intrinsecamente dependente, o IF difere da mensuração florestal, uma vez que esta inclui as técnicas desenvolvidas para coletar informações diretamente da floresta, inclusive a estimativa da superfície dos povoamentos. Em contrapartida, o IF compreende somente as operações da mensuração que promovem a base para o planejamento prático de qualquer natureza florestal (HUSCH, 1971; LOETSCH; HALLER, 1964). O IF pode ser definido então como a informação tabulada das árvores, confiável e satisfatória, relacionada às variáveis de interesse do gestor florestal (LOETSCH; HALLER, 1964). Sanquetta et al. (2014) dão ainda ênfase à representatividade amostral e à validade estatística dos IF, o que os diferenciam dos simples levantamentos florestais.

As técnicas de IF evoluíram significativamente desde os primeiros registros sobre a obtenção de informação florestal. Iniciaram com simples estimativas visuais de áreas florestadas no final da Idade Média, passando pelo surgimento do conceito de amostragem no final do século 18 e pela introdução das técnicas de medição de árvores no século 19. Entretanto, foram os rápidos avanços na estatística do século XX que tiveram a primeira influência decisiva no IF. Os estudos sobre a relação entre variáveis, desenvolvidos no início do século XX, e a análise de variância (ANOVA) e de covariância (ANACOVA), desenvolvidas por Ronald Fisher em meados da década de 1930, estimularam o avanço das técnicas de amostragem e promoveram a possibilidade de estimar o erro da média, fundamental para obter informações confiáveis e satisfatórias (LOETSCH; HALLER, 1964).

O segundo maior avanço técnico no IF pode ter ocorrido com a introdução do uso de fotografias aéreas para o planejamento das atividades, possibilitando um conhecimento prévio mais detalhado da floresta, bem como a aplicação de técnicas que poderiam contribuir para o aumento da precisão e redução de custos de campo (LOETSCH; HALLER, 1964).

Finalmente, a modernização da dendrometria surge em meio às também atuais técnicas de SR, ambas beneficiadas pelos não menos importantes avanços da informática (RODRÍGUEZ et al., 2010). As novas técnicas de escaneamento a laser das florestas com o uso de sensores remotos têm alcançado resultados iniciais interessantes (EID; GOBAKKEN; NAESSET, 2004; HOLOPAINEN; KALLIOVIRTA, 2009; RODRÍGUEZ et al., 2010; SCHREUDER; ERNST; RAMÍREZ-MALDONADO, 2004; WEZYK, 2012). Sua aplicação ainda não atingiu escala comercial no Brasil, porém parece ser promissora em um futuro não muito distante, pois em alguns países do Norte europeu seu uso em escala operacional já está presente desde o início do século (RODRÍGUEZ et al., 2010).

Apesar dos grandes avanços tecnológicos nas últimas décadas, as ferramentas de SR para estimativa da produção têm sido pouco utilizadas, principalmente pelo pouco conhecimento da relação entre as propriedades espectrais dos sensores remotos e as variáveis de interesse do IF (LU et al., 2004; McROBERTS et al., 2002a; SALVADOR; PONS, 1998).

Neste sentido, a amostragem de campo talvez seja ainda a ferramenta de maior utilidade para o IF, principalmente quando os resultados devem ser obtidos em curto espaço de tempo, pelo menor custo e com a precisão requerida (COCHRAN, 1965; YAMANE, 1967). Apesar dessa vantagem em relação a outros métodos, os levantamentos de campo em si são onerosos em custos, trabalho e tempo (TROTTER; DYMOND; GOULDING, 1997).

Mandallaz (2008) menciona que as mais modernas técnicas de IF são aquelas combinadas, nas quais a informação de campo é melhorada por informações auxiliares obtidas por dados de SR, mapas temáticos ou inventários preliminares. McRoberts et al. (2002a), por exemplo, mencionam o uso de imagens orbitais no Programa de Inventário Florestal e Análise (em inglês, Forest Inventory and Analysis – FIA) do Serviço Florestal Americano para dois propósitos principais: análise de regressão e estratificação. O primeiro é utilizado para estimar e

espacializar um atributo florestal desejado e o segundo para melhorar a precisão dos inventários.

Por meio da estimativa de um atributo florestal por SR, a distribuição espacial dos valores espectrais dos pixels leva à distribuição espacial da variável de interesse, podendo inclusive destacar regiões homogêneas com características de interesse (estratos) (McROBERTS et al., 2002a).

2.1.1 Processos de Amostragem

Segundo Loetsch e Haller (1964), a estrutura da amostragem no IF segue basicamente os seguintes sistemas de seleção das unidades amostrais (UA): aleatório simples (ou irrestrito), restrito, sistemático ou em conglomerados (ou mistos). A escolha do sistema depende do tamanho e da estrutura (características e distribuição da variável de interesse) da população, devendo também ser consideradas questões práticas, tais como acesso, recursos humanos e custos, entre outros. Meunier, Silva e Ferreira (2001) destacam ainda que a escolha não deve ser realizada sem o prévio conhecimento desses fatores, o que também depende muito da experiência do planejador do inventário.

O processo a partir do qual surgiram todos os demais procedimentos de amostragem é conhecido como amostragem inteiramente aleatória (AIA) ou aleatória simples ou irrestrita. A AIA requer que todas as combinações possíveis de (n) UA da população possuam a mesma probabilidade em participar da amostra (COCHRAN, 1965; SHIVER; BORDERS, 1996). A AIA é recomendada para áreas florestais pequenas, de fácil acesso e relativamente homogêneas, pois dificuldades tais como a localização de UA no campo, o tempo de deslocamento entre UA e a probabilidade de uma distribuição irregular das UA (não representativa) podem comprometer a eficiência do processo (MEUNIER; SILVA; FERREIRA, 2001; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993; SANQUETTA et al., 2014; SCOLFORO; MELLO, 1997; SHIVER; BORDERS, 1996).

A amostragem restrita, também conhecida como amostragem estratificada (AE), surge da possibilidade de agrupar a população em estratos homogêneos quanto à variável de interesse, diminuindo assim a variância entre as UA por estrato. A AE é recomendada para populações florestais heterogêneas quanto à variável de interesse ou quanto às características relacionadas a essa (idade, espécie, densidade, classes de solo, etc.) (AVERY; BURKHART, 1994; SCHREUDER;

GREGOIRE; WOOD, 1993). Entretanto, a AE exige o conhecimento do tamanho exato dos estratos e a respectiva alocação das UA nesses estratos. A variância entre os estratos também deve ser menor que dentro desses, caso contrário os benefícios de redução do erro de amostragem ou do tamanho da amostra podem ser comprometidos (AVERY; BURKHART, 1994; MEUNIER, SILVA; FERREIRA, 2001; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993; SCHREUDER; ERNST; RAMÍREZ-MALDONADO, 2004).

Apesar de se situar entre os processos probabilísticos não aleatórios (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993), a amostragem sistemática (AS) proporciona uma boa estimativa da média da população quando esta apresenta distribuição aleatória da variável de interesse, o que não seria um problema em populações florestais (MEUNIER; SILVA; FERREIRA, 2001). É particularmente recomendada para situações em que não se conhece exatamente o tamanho da população, resultando em maiores facilidades na localização e deslocamento entre UA, diminuindo os custos de execução (HUSCH; MILLER; BEERS, 1972; SHIVER; BORDERS, 1996).

Segundo Péllico Netto e Brena (1993), a amostragem em conglomerados (AC) ou mista consiste em uma variação da amostragem em dois estágios, na qual o segundo estágio é organizado dentro do primeiro estágio de amostragem. Ambos os estágios podem ser aleatórios ou sistemáticos, conforme descrito por Meunier, Silva e Ferreira (2001) e Péllico Netto e Brena (1993). Este processo é indicado para populações florestais extensas e de difícil acesso, em que a variável de interesse possua certa homogeneidade. Nessas circunstâncias, a AC pode melhorar a precisão das estimativas e reduzir os custos significativamente.

As variações dos processos básicos apresentados são amplamente discutidas na literatura geral (COCHRAN, 1965; YAMANE, 1967) e especializada (MEUNIER; SILVA; FERREIRA, 2001; LOETSCH; HALLER, 1964; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993; SANQUETTA et al., 2014; SCHREUDER; ERNST; RAMÍREZ-MALDONADO, 2004; SCHREUDER; GREGOIRE; WOOD, 1993; SCOLFORO; MELLO, 1997), e a escolha depende não somente dos aspectos comentados anteriormente, como também dos objetivos do IF.

Os processos de inventário mais utilizados por empresas de base florestal com florestas plantadas são AIA, AE e AS, pelas características inerentes a essas populações (SANQUETTA et al., 2014). Entretanto, pode-se perceber na literatura que basicamente são utilizados apenas os conceitos de alocação das UA e a análise

estatística do IF não inclui as variações possíveis em cada processo. Em consulta a três diferentes empresas de base florestal (informação verbal)¹, pôde-se constatar que os conceitos de análise de suficiência amostral para reposição de UA nos inventários de uma ocasião ou a análise de possibilidade de variações nos inventários de múltiplas ocasiões (repetição independente, total, dupla ou parcial) não são considerados. Nesta mesma linha, a estratificação dos povoamentos é basicamente administrativa ou tipológica, e não se utiliza daquela que poderia ser a principal vantagem da AE: o aumento da precisão ou a diminuição da amostra quando a estratificação está baseada na variação do atributo de interesse do IF.

2.1.2 Mapeamento e planejamento de inventários florestais

Alguns processos de amostragem não necessariamente prescindem de mapas (LOETSCH; HALLER, 1964), tais como a AS. Entretanto, tanto a AIA como a AE, amplamente utilizadas no setor de florestas plantadas pela sua propriedade de produzir estimativas sem tendência da população, exigem plantas (mapas) cadastrais ou de outra natureza para estabelecer a estrutura de amostragem (HUSH, 1971; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993) em escala apropriada. Outro motivo importante para dispor de mapas no inventário é a sua influência direta nas estimativas totais da população, o que exige determinações exatas de área para evitar erros maiores do que aqueles obtidos pela amostragem.

Além de fornecer os subsídios mínimos para o planejamento da amostragem do IF e para determinar o tamanho da população, os mapas também podem conter informações importantes para melhorar o desempenho do IF. Na década de 1960, Loetsch e Haller (1964) discutiram amplamente sobre o uso de fotografias aéreas para as estimativas de área inventariada e de variáveis dendrométricas de interesse, destacando a grande contribuição dessa técnica para a melhoria das estimativas de inventário a partir da década de 1950. Essa análise, entretanto, é realizada na maior parte das vezes utilizando “métodos oculares”(anagrifos, estereoscopia, óculos de cintilação 3D, óculos polarimétrico de realidade virtual) e depende muito da habilidade do operador (HANSEN; WENDT, 2000; McROBERTS et al., 2002a). Neste sentido, os autores justificam a busca de novas alternativas para substituir o

¹ Comunicação pessoal com responsáveis pelo Inventário Florestal nas empresas Fibria, Klabin e CMPC Celulose Riograndense, respectivamente em 19 de agosto de 2014 para as duas primeiras e em 28 de julho de 2014 para a última.

uso de fotografias aéreas pela grande trabalhabilidade requerida (interpretação visual), frequente subjetividade, qualidade e ocorrência inadequadas, altos custos, processo de compra complexo e dificuldade de garantir a consistência dos dados fotográficos e de campo.

Em recente explanação sobre o planejamento e execução de inventários florestais, Sanquetta et al. (2014) dedicam boa parte de sua obra para destacar a importância dos mapeamentos florestais e a contribuição dos Sistemas de Posicionamento Global (em inglês, Global Positioning System – GPS), Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e das técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) para a melhoria do planejamento e do desempenho do IF. Outros como Store e Antikainen (2010) propuseram um método para otimizar o caminhamento entre parcelas, baseado essencialmente na ferramenta SIG para a elaboração de um mapa de importância ou prioridade de inventário.

Talvez uma das maiores contribuições do SIG e do SR seja a possibilidade de estratificação da população florestal e obter as vantagens para o IF mencionadas em 2.1.1. McRoberts et al. (2002a) também destacam como vantagem do SR o formato digital, a cobertura e a consistência da informação. Schreuder, Ernst e Ramírez-Maldonado (2004) acrescentam a rapidez em que se coletam dados em grandes áreas, a capacidade de obter informações sobre a cobertura florestal nas porções do visível e invisível do espectro eletromagnético (ver item 2.3.2), bem como a propriedade de manter registros permanentes de ocorrências do passado.

2.1.3 Precisão e intensidade de amostragem

A precisão e a intensidade de amostragem (n) do IF estão intrinsecamente relacionadas, e ambas dependem da variabilidade do atributo de interesse na população amostrada e da probabilidade de confiança estabelecida (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993; SCHREUDER; GREGOIRE; WOOD, 1993).

Cochran (1965) define cinco passos básicos para estimar a intensidade de amostragem para AIA, que incluem a definição dos objetivos e prioridades da amostragem (considerando as consequências do erro esperado), o desenvolvimento de uma equação que expresse “ n ” em termos de precisão desejada, a estimativa dos parâmetros desconhecidos da população (sendo necessária uma estimativa prévia da variação) e assegurar que a intensidade de amostragem esteja de acordo com os recursos disponíveis, neste caso dando lugar a três opções: aceitar o

tamanho da amostra, procurar por um processo de amostragem mais eficiente ou não realizar a amostragem porque a precisão não será a requerida.

Em se tratando de florestas plantadas, principalmente aquelas destinadas aos setores de celulose e energia, atualmente são esperados erros amostrais não maiores que 5%, sendo que o desejável para entrada na fábrica varia em torno de 3% (informação verbal)². Para alcançar este nível de precisão, normalmente a intensidade de amostragem deve ser alta.

Sanquetta et al. (2014) apresentam uma abordagem sucinta sobre os sistemas de inventário utilizados em algumas empresas do setor florestal brasileiro. A intensidade de amostragem é geralmente expressa em número de unidades amostrais para uma quantidade de superfície, e varia de acordo com os objetivos do inventário. Para o inventário florestal contínuo (IFC) a intensidade amostral utilizada pelas empresas varia entre uma UA a cada quinze hectares (1:15 ha) até uma UA a cada oito hectares (1:8 ha), sendo que em alguns casos o IFC substitui o inventário pré-corte (IPC). No IPC as intensidades de amostragem geralmente são maiores, variando entre uma UA a cada cinco hectares (1:5 ha) até uma UA a cada dois hectares (1:2 ha). Os tamanhos das parcelas variam entre 250m² e 600m², o que confere frações de amostragem variando entre 0,6% e 3%. Apenas uma das empresas menciona o erro de amostragem esperado, porém faz menção apenas ao volume médio estimado pelo inventário confrontado com os valores de entrada de madeira nas fábricas (BERNETT, 2014; FONSECA, 2014; HIRAMATSU, 2014; LIMA, 2014; SANTOS, 2014; WEBER, 2014).

O impacto da qualidade da informação fornecida pelo IF nas decisões florestais já foi amplamente discutido na literatura, principalmente no que se refere às possíveis perdas econômicas relacionadas à essas decisões (BURKHART et al, 1978; EID, 2000; EID; GOBAKKEN; NAESSET, 2004; DUVEMO; LÄMÅS, 2006; HOLOPAINEN; TALVITIE, 2006). A importância em otimizar a intensidade de amostragem do IF aparece como estratégia fundamental para evitar custos maiores ou perdas por decisões equivocadas.

Os sistemas utilizados pelas empresas, comentados nos exemplos anteriores, buscam em sua maioria técnicas de estratificação administrativa e tipológica para o IFC, nos quais as bases de estratificação são geralmente a

² Palestra sobre “Inventário Florestal da Fibria”, proferida por César Martins Andrade no II MENSUFLO, em 19 de agosto de 2014.

fazenda, espécie (ou grupo de material genético), idade, manejo e em alguns casos solo ou sítio. Nenhuma menção foi feita por parte das empresas com respeito à estratificação baseada na variação da variável de interesse (BERNETT, 2014; FONSECA, 2014; HIRAMATSU, 2014; LIMA, 2014; SANTOS, 2014; WEBER, 2014).

Quando existe a possibilidade de dividir a população em estratos homogêneos da variável de interesse (ou correlacionados a esta), é possível reduzir a variância dentro desses estratos (HUSCH, 1971; MEUNIER; SILVA; FERREIRA, 2001; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993; SCHREUDER; GREGOIRE; WOOD, 1993). Os objetivos de aumentar a precisão ou diminuir a intensidade amostral (e consequentemente os custos) são possivelmente os mais requeridos. Scolforo e Mello (1997) enumeram várias bases para a estratificação e afirmam que a maneira mais eficiente de estratificar uma floresta é com base na variável de interesse, o que pode colaborar muito para a diminuição do erro de amostragem ou dos custos.

A grande dificuldade do processo de estratificação florestal baseado na variável de interesse reside no fato de ser necessário conhecer o tamanho e a localização de cada estrato (HUSCH, 1971; MEUNIER; SILVA; FERREIRA, 2001; PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993), o que nem sempre é possível na primeira abordagem, principalmente quando se trata de variáveis de interesse relacionadas aos parâmetros biométricos da população. Neste caso seria recomendado um inventário piloto (prévio), sendo que a diminuição de custos poderia ser afetada, pois poderia haver necessidade de instalar mais UA em estratos que não alcançaram suficiência amostral (a um custo unitário maior) ou que se tenha instalado um número excessivo de UA (BERGER et al., 2009).

Neste sentido, vários autores comentam que as técnicas de sensoriamento remoto são muito úteis para o planejamento do inventário florestal, destacando a possibilidade de estratificação por tipologias florestais, biomassa e por índice de área foliar (IAF) (BERGER et al., 2009; DAVI et al., 2008; FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007; HUSCH, 1971; MAHTO, 2001; McROBERTS et al. 2002a; McROBERTS; NELSON; WENDT, 2002b; McROBERTS et al. 2006; McROBERTS; LIKNES; DOMKE, 2014; RIBEIRO, 2007; SCHREUDER; ERNST; RAMÍREZ-MALDONADO, 2004). Em relação ao IAF, Sanquetta et al. (2014) indicam que esse poderia ser uma ferramenta auxiliar para a automação e otimização das atividades de inventário florestal, uma vez que diversos trabalhos de SR têm sido realizados no sentido de estimar o IAF (ver item 2.2).

2.2 Índice de Área Foliar

No manejo florestal, o índice de área foliar (IAF) pode ser usado como indicador do crescimento e da produtividade florestal, e pode ser considerado como um fator crítico na gestão de florestas (HERNÁNDEZ et al., 2014). Definido como a quantidade de área foliar unilateral por metro quadrado de superfície ($m^2.m^{-2}$), portanto adimensional, é considerado o fator mais importante na absorção de luz pelas copas (ASNER; WESSMAN, 1997 apud FLORES et al., 2006; BATTAGLIA et al., 1998; CANNELL, 1989; FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007; JARVIS; LEVERENZ, 1983 apud FLORES et al., 2006). Além disto, pode determinar a capacidade de interceptação de precipitação, intercâmbio de CO_2 com a atmosfera e o estoque de carboidratos e nutrientes (DOUGHERTY et al., 1995), podendo assim explicar boa parte da variação da produção vegetal ou florestal (CANNELL, 1989).

O IAF, por sua vez, é influenciado pela estrutura da copa, ramos, espaçamento, etc., sendo que um mesmo valor de IAF pode corresponder a vários tipos florestais e diferentes distribuições espaciais (BINKLEY et al., 2013; COUTURIER et al., 2009; DAVI et al., 2008), dependendo da espécie, sítio, condições climáticas (sazonalidade) e manejo (BRÉDA, 2003; DAVI et al., 2008; JONCKHEERE et al., 2004). O IAF também pode ser considerado como um indicador de fácil compreensão no meio florestal, gerando índices de fácil interpretação da capacidade produtiva dos sítios, entre outros (BATTAGLIA et al., 1998; CANNELL, 1989; DAVI et al., 2008).

Segundo Albaugh et al. (1998), Jonckheere et al. (2004) e Peduzzi (2007), baixos valores de IAF indicam baixa produtividade florestal, sendo que na literatura são encontradas boas correlações entre IAF e produção volumétrica (BERGER et al., 2009; FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007; WARING; COOPS; LANDSBERG, 2010), além de resultados positivos no uso de regressões para estimar variáveis de produtividade florestal (altura dominante, volume, biomassa) em função do IAF (ALBAUGH et al., 1998; ARIAS; CALVO-ALVARADO; DOHRENBUSCH, 2007; VAN TUYL et al., 2005). Há uma relação muito estreita entre o IAF e a produção florestal, ao ponto de alguns estudos realizados para várias espécies florestais indicarem que a área foliar, e conseqüentemente a produção florestal, se encontram muito aquém do seu potencial produtivo biológico. Setores com baixo IAF poderiam ser identificados e potencializados, e mapas de IAF

poderiam ser utilizados para recomendações silviculturais (COLOMBO et al., 2003). Esta constatação estaria baseada no fato de se obterem respostas altamente positivas no incremento de IAF e da produção com o aumento da disponibilidade de água e nutrientes (ALBAUGH et al., 1998; MORATAYA et al., 1999; SMETHURST et al., 2003).

Devido à sua importância em muitos processos ecológicos, tais como a evapotranspiração e a ciclagem de nutrientes, uma quantidade significativa de estudos tem sido realizada no desenvolvimento de ferramentas para estimar o IAF (FLORES et al., 2006). A constatação de que o IAF, logo, a produção de madeira, se encontra em níveis muito abaixo do ótimo em vários locais (ALBAUGH et al., 1998; SMETHURST et al., 2003), levou à busca de alternativas para estimar o IAF em média e larga escalas, uma vez que as determinações ou estimativas de IAF são geralmente de difícil obtenção, pois demandam muito tempo no campo e têm um alto custo associado (ARIAS; CALVO-ALVARADO; DOHRENBUSCH, 2007).

O IAF pode ser obtido de forma direta, semidireta e indireta, mais detalhadamente descritos por Bréda (2003) e por Jonckheere et al. (2004). Os métodos diretos de medição de IAF são teoricamente mais precisos que os semidiretos (determinados por alometria, por exemplo) e que os métodos indiretos (métodos ópticos, como aqueles obtidos pelo equipamento LAI-2000 Plant Canopy Analyser). Entretanto, os métodos diretos consomem muito tempo em sua determinação, tornando-os praticamente inviáveis para seu uso até mesmo em pequena escala.

Por outro lado, os métodos indiretos são de mais fácil utilização, sendo que normalmente o uso de métodos ópticos são os preferidos, por sua relativa rapidez e precisão (BATTAGLIA et al., 1998; CHEN et al., 1997; LEBLANC; CHEN, 2001). Neste caso, o LAI-2000 Plant Canopy Analyser é o instrumento mais comumente utilizado para estimar a quantidade de radiação difusa que se infiltra através das copas, sendo a maneira mais prática e simples para obter estimativas de IAF em florestas de rápido crescimento de forma instantânea (ARIAS; CALVO-ALVARADO; DOHRENBUSCH, 2007). Entretanto, segundo alguns estudos, o equipamento tende subestimar o IAF (CUTINI; MATTEUCCI; MUGNOZZA, 1998; JONCKHEERE; MUYS; COPPIN, 2005), sendo que essa tendência é linear, o que para fins de uso comparativo não necessariamente levaria a um grande problema.

Por outro lado, os métodos de estimativa de IAF em larga escala dependem de ferramentas apropriadas, pois demandam muito tempo e o uso de equipamentos sofisticados e onerosos (HERNÁNDEZ et al., 2014). Forest Nutrition Cooperative (2007) sugeriram que o IAF também poderia ser obtido indiretamente por imagens de sensores remotos, por meio da relação do IAF_{campo} e as propriedades espectrais das folhas, medidas pelos sensores.

Ultimamente, as ferramentas de SR vêm sendo utilizadas com sucesso para estimar a distribuição espacial e temporal de IAF (BERGER et al., 2009; CHEN; CIHLAR, 1996; FLORES, 2003; HOUBORG; ANDERSON; DAUGHTRY, 2009), havendo uma forte relação entre os índices de vegetação (IV) obtidos pelos sensores a bordo de plataformas orbitais e o IAF, gerando relações lineares significativas (CHEN; CIHLAR, 1996; FLORES, 2003; FLORES et al., 2006; FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007; LAW; WARING, 1994; RUNNING et al., 1986).

Rautiainen (2005) e Forest Nutrition Cooperative (2007) encontraram que quanto maior o fechamento do dossel, maior a correlação entre IAF e dados de reflectância gerados pelos sensores. Chen e Cihlar (1996) comentam que o sensoriamento remoto por imagens orbitais proporciona um caminho singular para obter a distribuição de IAF em áreas extensas, o que para Colombo et al. (2003), Flores et al. (2006) e Lencinas e Mohr-Bell (2007), pode constituir uma ótima oportunidade para o manejo florestal em escala operacional, da mesma maneira como já vem sendo utilizado na agricultura de precisão. Flores et al. (2006), baseados em experiências anteriores de utilização de sensores remotos para estimativas de IAF de coníferas (CHEN; CIHLAR, 1996; FLORES, 2003; RUNNING et al. 1986), encontraram forte relação entre o IAF e o Índice da Razão Simples (em inglês, Simple Ratio Index – SRI) para *Pinus taeda* L., indicando a possibilidade de uso da ferramenta para aplicação em larga escala, servindo de suporte às decisões florestais.

Apesar de mencionar que existem algumas dificuldades associadas às estimativas de IAF_{SR} , tais como a relação entre interceptação, distribuição e emissão de radiação eletromagnética das folhas com a estrutura das copas, as regiões com altos valores de IAF onde os índices de vegetação apresentam uma resposta assintótica ou saturada, Peduzzi (2007) encontrou correlações significativas entre os índices de vegetação e o talhão avaliado e seus fatores de sítio, sugerindo que os

índices derivados do satélite estiveram mais relacionados aos parâmetros biofísicos do talhão que o IAF estimado no local por métodos indiretos. Dada a relação linear entre os índices de vegetação e o IAF antes da saturação (uma das dificuldades mencionadas pela autora), isto sugere que, neste caso, os dados orbitais multiespectrais estimaram o IAF do talhão de uma maneira mais precisa que a medição indireta do IAF_{campo} .

Existem diversos estudos sobre a estimativa de produção em volume ou biomassa por meio de SR, porém Song (2013), em uma revisão sobre o uso de sensoriamento remoto para estimativas de IAF e biomassa florestal, alerta para o cuidado com a qualidade das estimativas de biomassa quando utilizados sensores óticos e comenta que o mapeamento da biomassa continua predominantemente empírico, pois não há relação física direta entre a energia refletida pela vegetação e a biomassa. O autor, entretanto, destaca a evolução da modelagem de IAF_{SR} , passando das estimativas empíricas locais aos recentes usos de modelos semi-empíricos e biofísicos.

Por outro lado, a maior parte das estimativas da produção florestal ainda se baseia em modelos empíricos (ALMEIDA et al., 2010), os quais são considerados bons estimadores, porém se restringem à área em que foram obtidos e não incluem variações climáticas, disponibilidade de água ou manejo. Uma forte tendência atualmente, na medida em que se obtêm maiores informações sobre as variações mencionadas anteriormente, é a exploração da capacidade dinâmica dos modelos mecanísticos, baseados em processos, tais como os modelos ecofisiológicos (ALMEIDA et al., 2010).

Um modelo que já poderia ser considerado um clássico, é o proposto por Landsberg e Waring (1997), conhecido como Physiological Principles in Predicting Growth (3PG), em que os autores destacam a importância do IAF_{SR} como ferramenta para a estimativa indireta da produção volumétrica em larga escala. Assim, como Waring, Coops e Landsberg (2010) os autores sugerem que medições realizadas por meio de SR podem caracterizar o IAF, a quantidade de nitrogênio e clorofila presente nas copas, bem como a capacidade fotossintética, a estrutura e quantidade de biomassa aérea das florestas.

O IAF reflete rapidamente as variações de água nas folhas e no solo, déficits nutricionais, bem como a capacidade fotossintética e sua estimativa em larga escala por meio sensoriamento remoto é sugerida por alguns autores (ARIAS; CALVO-

ALVARADO; DOHRENBUSCH, 2007; JONCKHEERE et al., 2004; LANDSBERG; WARING, 1997; WARING; COOPS; LANDSBERG, 2010) para diversas aplicações, entre elas a calibração das estimativas de produção dos modelos baseados em processos.

2.2.1 Potencial de uso do IAF em inventários florestais

Para Forest Nutrition Cooperative (2007) existem também grandes oportunidades para melhorar a eficiência de inventários e determinar outras necessidades de plantios florestais, afirmando que o IAF é um dos indicadores de maior potencial para a estimativa indireta da produtividade florestal, existindo ainda muitas oportunidades para associar seu uso para melhorar a eficiência de inventários florestais, detectar necessidades nutricionais, entre outros. Nesta mesma linha, Arias, Calvo-Alvarado e Dohrenbusch (2007) sugerem que o uso dessa ferramenta de forma contínua em parcelas permanentes de medição geraria um índice ecológico que poderia ser utilizado como uma importante variável resposta para os diferentes tratamentos culturais aplicados nos povoamentos, tais como desbastes, desramas, fertilização, etc.

Apesar da forte relação entre IAF e produtividade florestal encontrada por diversos autores, poucos são os trabalhos que mencionam o uso do IAF em inventários florestais. Sanquetta et al. (2014) sugerem o uso do IAF_{SR} para automatizar algumas atividades do IF como, por exemplo, a estimativa da intensidade de amostragem. McRoberts et al. (2002b) e McRoberts et al. (2006) também mencionam o uso de sensores remotos, tais como as imagens orbitais, como recurso auxiliar para melhorar a precisão de inventários por meio de estratificação e obter assim uma redução de custos.

Outras técnicas, tais como uso de scanners e fotointerpretação são amplamente difundidas (EID; GOBAKKEN; NAESSET, 2004; NAESSET, 1997; NAESSET; BJERKNES, 2001; NAESSET, 2002). Por outro lado, Ribeiro (2007) e Salvador e Pons (1998), analisando as potencialidades da utilização de imagens orbitais no inventário florestal de florestas mediterrâneas, concluíram que as estimativas de variáveis dendrométricas por meio de imagens orbitais ainda não apresentam valores aceitáveis de exatidão, o que torna necessária a medição de campo. Ribeiro (2007) propõe a realização de pesquisa com imagens de alta resolução espectral e espacial ou com tecnologias emergentes como o Light

Detection and Ranging (LIDAR) para algumas parcelas permanentes, de forma a encontrar correlações mais significativas com alguns atributos florestais, o que no médio prazo poderia gerar uma redução gradual no trabalho de campo e a consequente redução de custos.

Na literatura observam-se técnicas que permitem a estimativa indireta da variabilidade dos povoamentos, sendo a capacidade de absorção de luz pelas copas (IAF) mencionada como uma delas (BERGER et al., 2009; FLORES et al., 2006). Entretanto, Arias, Calvo-Alvarado e Dohrenbusch (2007) comentam que apesar de todos os povoamentos avaliados em seu estudo apresentarem a mesma idade, encontraram uma grande variação nos valores de IAF obtidos nos blocos avaliados, indicando que os valores de IAF são fortemente afetados pelos fatores ambientais do sítio.

Forest Nutrition Cooperative (2007), em um estudo realizado com imagens orbitais para estimar IAF de *Pinus radiata* no Chile, comentam que apesar da variabilidade presente nas estimativas de IAF, existem grandes possibilidades na sua aplicação para estratificação de talhões no IF. Neste sentido, Berger et al. (2009) realizaram um estudo de caso para povoamentos de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* aos sete anos de idade, no qual estimaram o IAF usando imagens Landsat 7 ETM+, por meio da equação proposta por Flores et al. (2006). Os autores puderam estratificar a população segundo estratos de IAF, por meio de uma técnica de generalização de dados, resultando a estratificação altamente benéfica para o inventário, quando comparada ao processo aleatório simples. Os resultados do estudo indicaram uma redução de aproximadamente 50% do número de UA necessárias para a precisão requerida. Mahto (2001) também encontrou resultados positivos usando ferramentas de sensoriamento remoto na estratificação de um bosque natural no Nepal.

A técnica proposta por Berger et al. (2009), em alguns casos (talhões individuais), não se mostrou consistente pois a variabilidade do volume medido no campo foi alta dentro de um mesmo estrato. Segundo os autores isso pode ser explicado, em parte, devido à técnica de generalização de IAF utilizada para formar os estratos e, por outra parte, pela variação não explicada na correlação IAF e volume. Nestes casos Forest Nutrition Cooperative (2007) sugere ser factível avaliar a variabilidade interna do IAF médio obtido nos talhões e avaliar localizações ótimas para parcelas de inventário, complementando essas análises com as estimativas do

Coeficiente de Variação de IAF ($CV\%_{\text{IAF}}$ que explicaria satisfatoriamente a variação de IAF (DAVI et al., 2008))

2.3 Sensoriamento remoto da vegetação

Os dados de SR da vegetação obtidos por meio de equipamentos conhecidos como espectrorradiômetros (ou sensores), destinados a medir a radiação refletida ou emitida por alvos na superfície terrestre, podem ser adquiridos de diversas maneiras. Suas características também variam amplamente, e a escolha do sensor e da plataforma a serem utilizados depende do tipo e da qualidade de informação requerida em termos de resolução espacial, espectral, temporal ou radiométrica (JENSEN, 2009; MOREIRA, 2011; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

Existem diversos satélites, ativos ou não, com propriedades distintas de resolução espectral, espacial, temporal e radiométrica que poderiam ser utilizados no IF (Quadro 1) cujas características devem ser cuidadosamente analisadas em relação ao seu benefício/custo no IF (Sanquetta et al. , 2014)

A série de satélites Landsat é sem dúvidas a mais conhecida no SR da vegetação, e ainda é amplamente utilizada no sensoriamento remoto de formações florestais (BERGER et al., 2009; BERGER et al., 2014; FLORES et al., 2006; FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007; McROBERTS et al., 2002a; 2002b; McROBERTS et al., 2006; SALVADOR; PONS, 1998), mostrando perspectivas promissoras, não somente pelo recente lançamento do Landsat 8 em 2013, mas também pela possibilidade de uso das imagens dos sensores das séries anteriores, mesmo que inoperantes.

As imagens do Landsat 8 são gratuitas e possuem características muito parecidas com as obtidas com o sensor ETM+ (Landsat 7), porém com diferenças importantes. O Landsat 8 leva a bordo dois sensores: um sensor ótico, Operational Land Imager (OLI), que possui duas bandas adicionais, uma para observar nuvens de alta altitude (cirrus clouds) e outra para observar a atmosfera e a qualidade da água em lagos e águas costeiras rasas (coastal/aerosol). Ainda dispõe de sensor infravermelho termal chamado Thermal InfraRed Sensor (TIRS). O sensor OLI é baseado em arranjos lineares de detectores, portanto é um sensor do tipo “pushbroom” (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2013).

Cerca de 400 imagens por dia são coletadas e disponibilizadas via portais de dados online, como o Glovis e o EarthExplorer (AMSKEPLER, 2013; LEONARDI, 2013).

Quadro 1 – Exemplos de satélites com imagens disponíveis para uso no planejamento de inventários florestais.

Satélite	Resolução espacial (m)	Resolução temporal (dias)	Origem	Situação de imageamento
Landsat 8	30	16	USA - NASA	2013 – Atual
Landsat 5	30	16	USA - NASA	1984 – 2011
Landast 7	30	16	USA - NASA	1999 – 2003
CBERS 1	20	26	Brasil/China	1999 – 2001
CBERS 2	20	26	Brasil/China	2003 – 2007
CBERS 2B	20	26	Brasil/China	2007 – 2010
ASTER	15	16	USA	1999 – Atual
SPOT 6	6	1 - 3	França	2012 – Atual
RapidEye	5	Diária	Alemanha	2008 – Atual
QuickBird 2	2,44	1 – 3,5	USA	2001 – Atual
Ikonos II	4	1,5 – 2,9	USA	1999 – Atual

Fonte: Adaptado de Sanquetta et al. (2014).

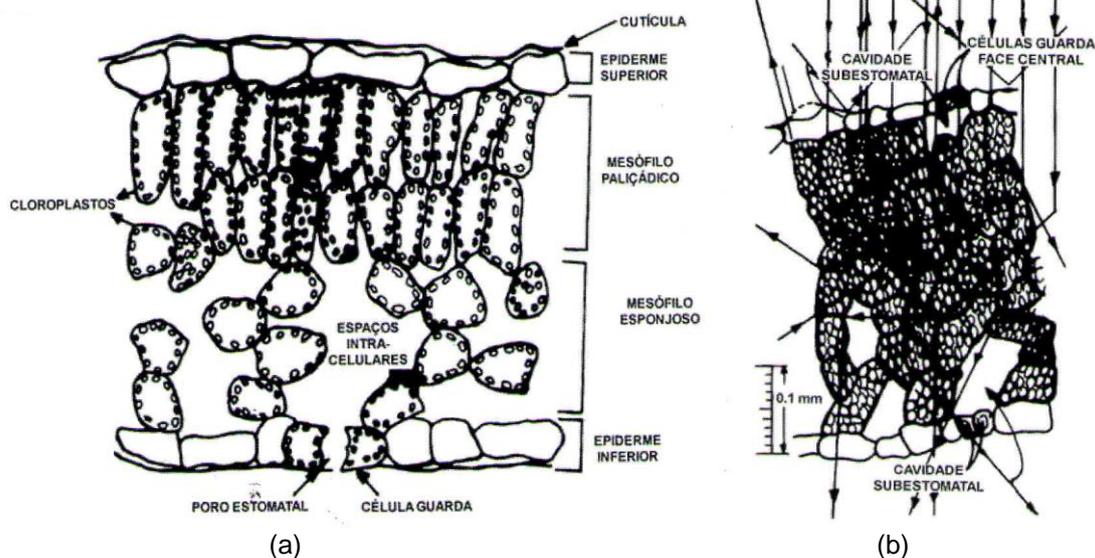
2.3.1 Comportamento espectral da vegetação

No estudo do SR da vegetação um dos principais fundamentos é o entendimento do comportamento espectral das folhas. Essa análise é bastante complexa porque uma folha é constituída por diferentes tecidos (Figura 1), que apresentam diferentes comportamentos ao longo do espectro eletromagnético, influenciados pelos fenômenos que os descrevem (reflexão, transmissão e absorção da radiação eletromagnética incidente) e pelos fatores químicos (pigmentos fotossintetizantes e água), além dos aspectos morfológicos e fisiológicos das plantas (JENSEN, 2011; LIU, 2007; PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

A reflectância pode ser considerada como o fenômeno físico de maior interesse no SR da vegetação, pois é a partir dela que se torna possível medir os padrões de comportamento das folhas ou dos dosséis (PONZONI, 2001).

Basicamente o comportamento espectral de uma folha pode ser analisado nas regiões do visível (0,4 – 0,72 μm) e do infravermelho próximo (0,72 – 1,10 μm) e médio (1,10 – 3,20 μm), principalmente nas duas primeiras regiões.

Figura 1- Seção transversal de uma folha e caracterização da sua estrutura celular (a) e (b) possíveis trajetórias da radiação eletromagnética incidente.



Fonte: (a) Ponzoni; Shimabukuro (2010); (b) Gates et al. (1965 apud PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Na região do visível os pigmentos presentes nos cloroplastos dominam as propriedades de reflectância das folhas, definindo a forma da curva dos fatores de reflectância (Figura 2). Desses elementos, somente as clorofilas absorvem na região do vermelho ($0,65 \mu\text{m}$), o que lhe confere baixa reflectância.

Na região do infravermelho próximo ocorre pequena absorção e um considerável espalhamento interno na folha, portanto a reflectância nessa região é consequência da estrutura do mesófilo esponjoso, e quase sempre é alta e constante, apesar de ser influenciada por fatores externos como disponibilidade de água ou ar. Por outro lado, a reflectância da vegetação nessa região normalmente é mais alta que a maioria dos elementos inorgânicos, tais como o solo (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

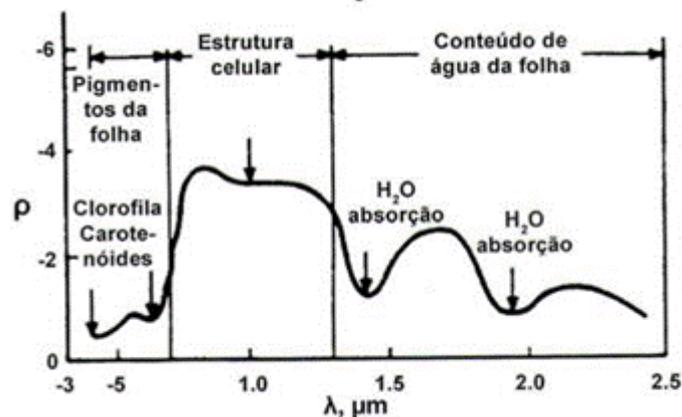
Maiores detalhes sobre as trajetórias da radiação eletromagnética incidente nas folhas e sobre o comportamento espectral da vegetação nas diferentes regiões do espectro eletromagnético podem ser encontrados em Jensen (2011), Ponzoni (2001) e Ponzoni e Shimabukuro (2010).

As folhas são os principais elementos de interação com a radiação eletromagnética, sendo que as curvas de reflectância para os dosséis não diferem muito desse comportamento, apesar desses serem influenciados pela arquitetura de copa.

Outro fator que pode influenciar as curvas de reflectância dos dosséis é a distribuição espacial dos indivíduos, que pode variar de acordo com as características da formação vegetal avaliada (distribuição, densidade, idade).

Uma maneira de medir essa variação é pelo índice de área foliar (IAF), cujo comportamento afeta as propriedades de reflectância da vegetação. Na região do visível, com o aumento do IAF há alta absorção de energia, e conseqüentemente baixa reflectância, principalmente na região do vermelho. Pelo contrário, nessas condições a absorção na região do infravermelho é mínima e o espalhamento interno das folhas aumenta, aumentando a reflectância (PONZONI, 2001).

Figura 2 – Assinatura espectral típica das diferentes estruturas de uma folha.



Fonte: Novo (2010).

A distribuição angular foliar (DAF) também pode influenciar na resposta espectral dos dosséis. Dosséis compostos por folhas que se posicionam de maneira mais horizontal apresentam menor variabilidade na reflectância e os mais altos valores em todas as distribuições, enquanto que para aquelas folhas com disposição mais vertical, a reflectância na região do visível decresce e aumenta na região do infravermelho próximo, pelo aumento do ângulo zenital solar (KIMES, 1984 apud PONZONI, 2001). Neste sentido, Ponzoni (2001) também alerta para a influência do posicionamento e da altura da vegetação (em relação ao ângulo de elevação solar) na reflectância na região do visível, podendo esta ser reduzida pela absorção dos pigmentos das plantas e pelo sombreamento do solo.

Na região do infravermelho próximo, a orientação das fileiras de árvores exerce menor influência do que na região do visível. Nesta região podem ainda haver outros fenômenos que influenciam a reflectância. As faces ventrais e dorsais

das folhas, por influência do mesófilo esponjoso (mais presente nas faces dorsais), podem ser refletir de forma diferenciada na região do visível (PONZONI, 2001). Por outro lado, o grau de maturação das folhas também exerce influência sobre a reflectância nessa região, sendo que esta decresce com a idade (GATES; TANTRAPPORN, 1952 apud PONZONI, 2001).

Em geral, qualquer fenômeno que possa afetar os pigmentos fotossintetizantes, introduzir outros elementos ou gerar alterações do equilíbrio das folhas, pode acarretar em mudanças importantes na reflectância (LIU, 2007; PONZONI, 2001). Outras variáveis que podem afetar a reflectância da vegetação estão associadas às características de iluminação (geometria, características espectrais), do sensor (geometria, sensibilidade espectral, campo de visada instantâneo - IFOV) e tipos de solos (textura, cor e teor de umidade), bem como da orientação da face (pixel) do terreno (JENSEN, 2011).

Um parâmetro essencial para o entendimento do comportamento espectral da vegetação é a função (ou fator) de distribuição da reflectância bidirecional (em inglês, BRDF), representado pela quantidade relativa de radiação eletromagnética refletida pelo objeto (neste caso, a vegetação) em uma determinada condição geométrica de iluminação (sol) e de visada (sensor). Ambas geometrias são caracterizadas pelos ângulos zenital e azimutal formados em relação ao alvo e influenciadas pelas propriedades anisotrópicas da vegetação (JENSEN, 2009; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012). As características da vegetação podem variar amplamente: dosséis (tipo, porcentagem de fechamento, orientação aleatória ou sistemática), copas (forma e diâmetro), troncos (número de árvores, DAP), folhas (IAF, DAF). Em função disso, há uma importante influência dessas características na resposta espectral dos alvos. Jensen (2009) demonstra essa condição utilizando um exemplo para uma espécie de gramínea avaliada em diferentes horários do dia, mostrando a variação da BRDF nessas condições. Os efeitos da BRDF geralmente são menores nos comprimentos de onda de baixa absorção do verde e do infravermelho próximo.

Outro aspecto relevante sobre o comportamento espectral da vegetação (ou de outros alvos) é a mistura espectral. Cada pixel de uma imagem contém informações de proporções e resposta espectral de cada componente dentro da resolução espacial desse pixel. Essa informação é originada de uma relação linear que pondera a contribuição de cada elemento (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Dependendo da resolução espacial e dos elementos que compõem a imagem (solos, vegetação, sombra, outros), juntamente à influência da BRDF, o comportamento espectral da vegetação pode variar amplamente, devendo ser cuidadosamente analisado e entendido (JENSEN, 2009; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012).

2.3.2 Índices de vegetação de sensores remotos

Os índices de vegetação (IV) são medidas radiométricas adimensionais, geradas por meio de transformações matemáticas que se valem das propriedades multiespectrais da maior parte dos sensores remotos. Os IV têm buscado explorar as propriedades espectrais da vegetação (folhas e outros componentes fotossinteticamente ativos), principalmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Sua fundamentação reside no comportamento antagônico da reflectância da vegetação nas duas regiões mencionadas, com o qual pretendem indicar a abundância relativa e a atividade da cobertura vegetal, incluindo o IAF, o teor de clorofilas, biomassa verde e a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (JENSEN, 2011; LIU, 2007; MOREIRA, 2011; PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Moreira (2011) comenta que na literatura podem ser encontrados mais de 50 diferentes tipos de índices de vegetação, obtidos por meio de diversas metodologias, cada qual com suas particularidades e especificidades. Dentre os diversos índices de vegetação apresentados por Jensen (2011), Liu (2007), Moreira (2011), Ponzoni e Shimabukuro (2010), com suas aplicações e características, destacam-se o Índice de Razão Simples (IRS, ou em inglês: Simple Ratio Index - SRI) e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (IVDN, ou em inglês: Normalized Difference Vegetation Index – NDVI), como os mais amplamente utilizados para caracterizar o IAF e a biomassa de formações florestais (FLORES et al., 2006; JENSEN, 2011; MOREIRA, 2011). O Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (em inglês: Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI), cuja introdução de uma constante tem a função de minimizar o efeito do solo, também tem sido utilizado para formações florestais (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

As expressões (1), (2) e (3) representam como são obtidos o SRI, NDVI e SAVI (JENSEN, 2011), respectivamente:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}}) \quad (1)$$

$$\text{SRI} = \rho_{\text{IVP}} / \rho_{\text{V}} \quad (2)$$

$$\text{SAVI} = [(\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}} + L)] * (1 + L) \quad (3)$$

Em que:

ρ_{V} , ρ_{IVP} referem-se ao fluxo radiante refletido no vermelho (visível) e ao fluxo radiante refletido no infravermelho próximo, respectivamente;

L é a constante que minimiza o efeito do solo.

Os valores de ρ_{IVP} e ρ_{V} são obtidos por uma série de transformações que dependem do tipo de sensor utilizado, bem como dos valores de radiância que foram medidos pelos detectores do sensor em cada banda espectral. Maiores detalhes podem ser encontrados em Ponzoni e Shimabukuro (2010).

O SRI é, provavelmente, o primeiro IV utilizado (JACKSON; HUETE, 1991; PONZONI; SHIMABUKURO, 2010) e foi sugerido por (Jordan, 1969), baseando-se no princípio de que as folhas absorvem relativamente mais radiação eletromagnética na região do vermelho (visível) do que na região do infravermelho. Sendo assim, quanto maior a quantidade de folhas no dossel, maior será o valor da razão. Os valores de SRI partem próximos de um (JACKSON; HUETE, 1991) e não possuem limite superior, pois em áreas de densa vegetação a quantidade de radiação eletromagnética refletida na região do visível tende a valores muito baixos (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Já os valores para o NDVI variam teoricamente entre -1 e 1, sendo que para alvos terrestres o limite inferior chega próximo a zero e o limite superior próximo a 0,80 (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Os autores comentam sobre a popularidade de uso do NDVI, que foi amplamente aplicado para dados de sensores remotos do satélite Landsat. Huete et al. (2002) inclusive mencionam o seu uso para a geração de produtos padrão do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Assim como os demais IV, o SRI e o NDVI apresentam vantagens e desvantagens e sua interpretação deve levar em consideração vários fatores limitantes, tais como: pontos de saturação, interferência atmosférica e do solo, entre outros (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Jackson e Huete (1991) comentam que os IV podem ser influenciados pelo teor de umidade, rugosidade, sombra ou por diferentes teores de matéria orgânica no solo.

Jensen (2011) destaca a alta sensibilidade do SRI às variações de biomassa da vegetação ou de IAF para formações florestais, sendo que Jackson e Huete (1991) alertam para a sua baixa sensibilidade em formações de baixa produção de biomassa (pastagens, biomas áridos e semiáridos).

Já o contrário ocorre para o NDVI, em que Jackson e Huete (1991) e Jensen (2011) comentam ser um índice mais adequado para as áreas com vegetação esparsa. Jensen (2011) também menciona que, apesar do NDVI ser altamente correlacionado ao IAF, esta relação pode ter sido prejudicada quando o IAF é muito alto.

Huete, Jackson e Post (1985) analisaram a sensibilidade dos IV em relação ao solo e verificaram que essa é maior em dosséis com nível de cobertura médio. O SAVI, que introduz uma constante para minimizar esse efeito no valor final do IV, tem sido utilizado para diminuir esse ruído em condições de vegetação com cobertura média (JENSEN, 2011).

Apesar de resultar em valores distintos, o NDVI é funcionalmente equivalente ao SRI, sendo que para cada valor de SRI há um valor fixo para o NDVI (JACKSON; HUETE, 1991; JENSEN, 2011). Moreira (2011) demonstra que os resultados para cada IV, obtidos em um mesmo local e na mesma medida radiométrica, são números totalmente diferentes devido ao uso de equações diferentes. Jackson e Huete (1991) também alertam que deve haver muito cuidado nas comparações entre valores de IV, pois se deve considerar como foram calculados, quais sensores foram utilizados e quais as condições ambientais e atmosféricas no momento da medição. Desta forma, a interpretação numérica também deve ser distinta, dependendo do tipo de sensor e da metodologia de cálculo do IV utilizado.

Outro fator que deve ser considerado é que cada sensor remoto possui seu próprio critério para gerar os valores de radiância por banda espectral, o que depende principalmente de sua resolução radiométrica e da calibração de cada sistema sensor (conforme a data de aquisição da imagem), gerando valores na escala específica dessa resolução (valores discretos), conhecidos como Números Digitais (ND). Desta maneira, as imagens resultantes de um mesmo sensor, ou até mesmo das bandas de uma mesma imagem, podem não apresentar compatibilidade, o que impossibilitaria sua comparação e a caracterização espectral dos alvos (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Para serem passíveis de

comparação, os ND devem ser convertidos em valores físicos, tais como radiância e reflectância. A partir desta última é possível realizar operações matemáticas entre bandas, como por exemplo o cálculo dos IV.

Quando se pretende avaliar a distribuição espacial da produção florestal pelo uso de sensores remotos, a representação numérica da variação da vegetação depende do tipo de IV e do sensor que seja utilizado. Por outro lado, em se tratando de medidas radiométricas adimensionais, a variação numérica dos IV pode apenas indicar maior ou menor valor de um parâmetro biofísico requerido, sem necessariamente fornecer indicadores práticos de produção florestal.

Vários trabalhos abordam a relação dos IV obtidos por sensoriamento remoto com os parâmetros biofísicos das florestas, sendo destacados aqueles que se referem às estimativas de biomassa (JENSEN, 2011; LU, 2006; MACIEL et al., 2009; SONG, 2013), produção volumétrica (BERRA et al., 2012; CANAVESI; PONZONI; VALERIANO, 2010; MACIEL et al., 2009; MÄKELÄ; PEKKARINEN, 2004; WARING; COOPS; LANDSBERG, 2010) e IAF (CHEN; CIHLAR, 1996; FLORES, 2003; HOUBORG; ANDERSON; DAUGHTRY, 2009; JENSEN, 2011; LAW; WARING, 1994; SONG, 2013; STENBERG et al., 2004).

Alguns desses estudos, entretanto, abordam a pouca precisão dessas relações (BERRA et al., 2012; CANAVESI; PONZONI; VALERIANO, 2010; MÄKELÄ; PEKKARINEN, 2004; SONG, 2013), principalmente no que se refere às estimativas de biomassa e volume.

Neste sentido, é importante destacar que os IV representam a relação da reflectância da vegetação nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético medida nas folhas, e seus valores variam conforme a metodologia para calcular o IV utilizado (MOREIRA, 2011), porém guardam estreita relação com a quantidade de folhas do dossel, expressa pelo IAF. Assim, há uma relação física direta entre o IV e o IAF, e qualquer alteração na reflectância da vegetação é mais bem explicada pela variação do IAF do que pela biomassa, por exemplo.

Coberturas vegetais homogêneas, tais como os plantios florestais, geralmente apresentam uma forte relação entre o IAF e o IV correspondente. Neste sentido, imagens de alta resolução espacial tendem a oferecer melhores relações de IAF e IV do que as imagens de menor resolução, pois essas podem conter as respostas de diferentes tipos de cobertura (COLOMBO et al., 2003).

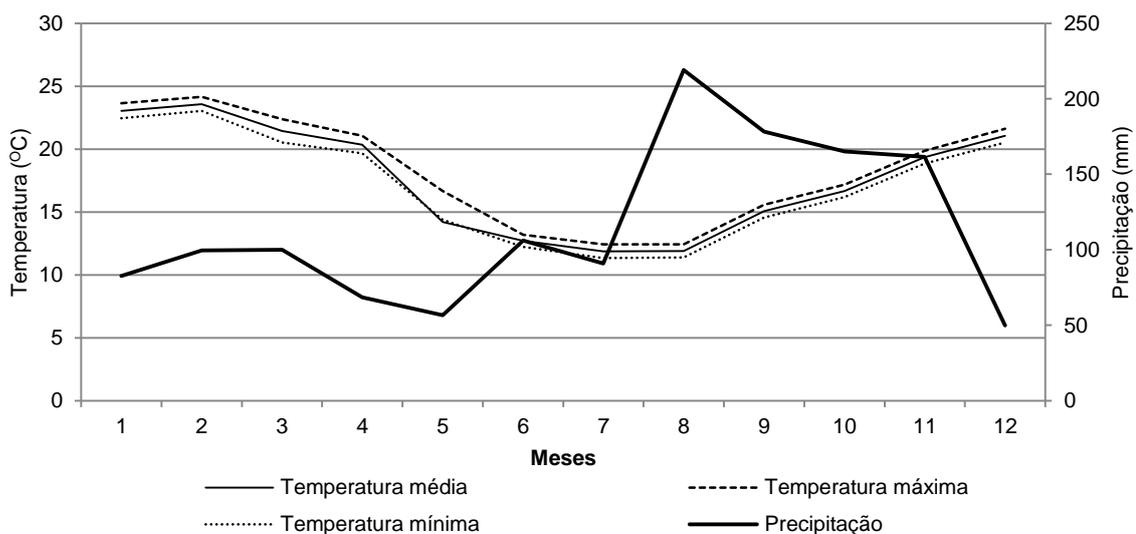
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de estudo

A área de estudo está localizada no município de Barra do Ribeiro, Rio Grande do Sul, Brasil. Os dados foram coletados no Horto Florestal Barba Negra (HFBN), de propriedade da empresa Celulose Riograndense - Grupo CMPC, cuja localização geográfica está situada entre os paralelos $30^{\circ}27'56,802''$ S e $30^{\circ}26'33,803''$ S, e entre os meridianos $51^{\circ}16'06,079''$ W e $51^{\circ}05'46,049''$ W (Datum WGS84).

Conforme o sistema de classificação Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo Cfa (temperado, verão quente e sem estação seca) (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). A Figura 3 mostra os dados de precipitação e temperatura mensal obtidos em 2013 na estação meteorológica instalada no HFBN. A precipitação total foi de 1.378,21 mm, com temperatura máxima média do mês mais quente de $24,1^{\circ}\text{C}$ e temperatura mínima média do mês mais frio de $11,3^{\circ}\text{C}$. O relevo do local varia de suave ondulado a plano, predominando este último. Os solos da região são de formação recente, tais como argissolo vermelho-amarelo, gleissolo melânico, neossolo quartzarênico e planossolo hidromórfico (STRECK et al., 2008 apud SYDOW, 2010).

Figura 3 – Dados de precipitação e temperatura da estação meteorológica do Horto Florestal Barba Negra durante o ano 2013.



Fonte: Dados meteorológicos do HFBN, CMPC Celulose Riograndense (2013).

O HFBN possui uma superfície total de 10.273,86 ha, sendo 6.763,19 ha plantadas com *Eucalyptus* spp.. Na época das medições de campo, 3.013,03 ha correspondiam aos plantios com o material genético de origem clonal selecionado para este trabalho (ver item 3.2).

3.2 Características dos plantios selecionados

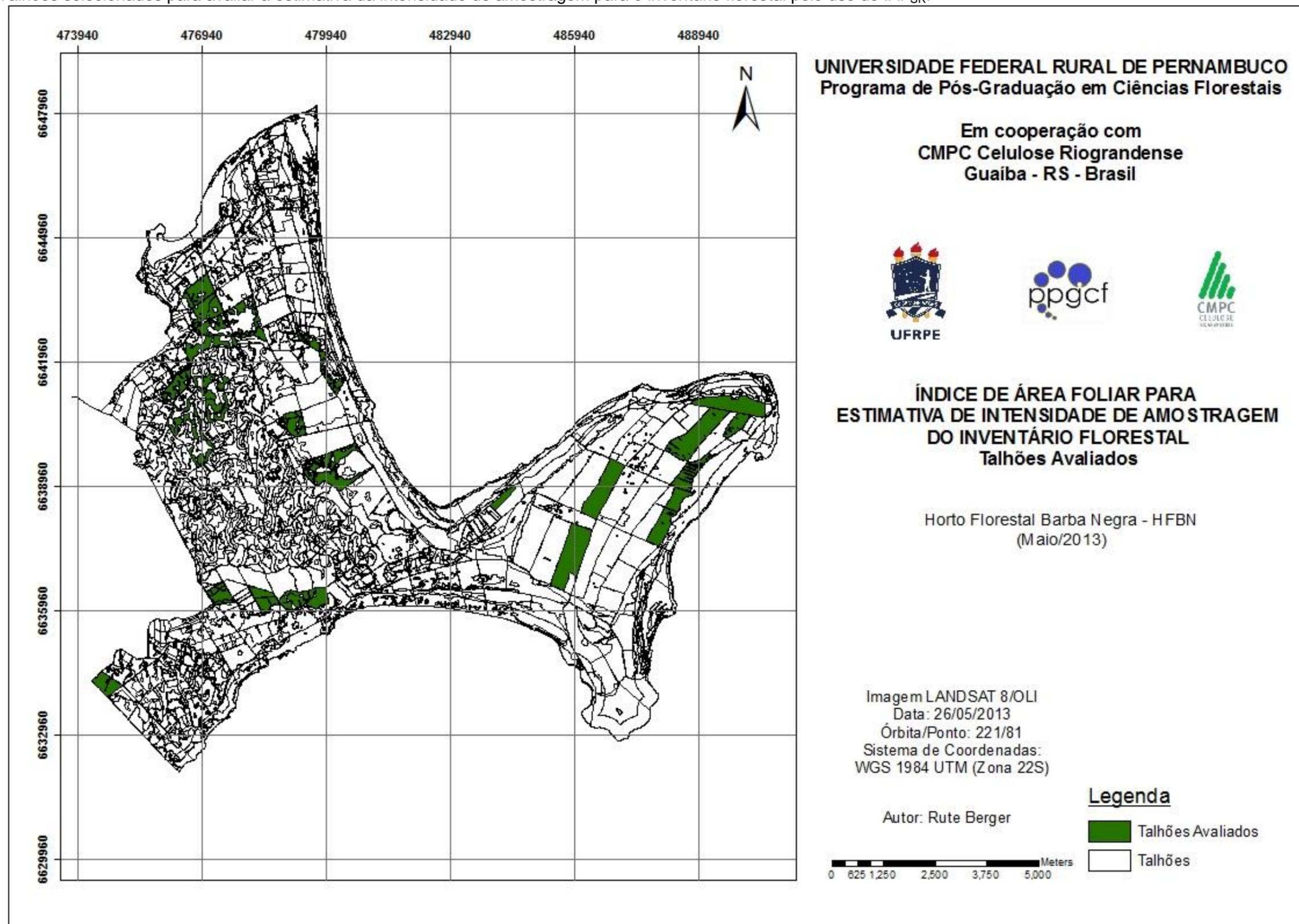
Para este estudo foram selecionados talhões comerciais com condições internas homogêneas de espécie, idade, manejo e espaçamento. O material genético selecionado para a avaliação foi um clone de *Eucalyptus saligna* Smith, plantado sob diferentes espaçamentos (3,00 m x 3,00 m, 3,00 m x 2,50 m e 3,50 m x 2,14 m), com idades variando entre três e oito anos.

Avaliaram-se plantios com diferentes condições de sítio e as características predominantes de tipos de solo, textura e relevo dos talhões selecionados foram obtidas a partir do banco de dados cadastral dos plantios da empresa, e classificados como: a) Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Espessarênico moderado, de textura arenosa/média ou arenosa/média/argilosa e relevo suave ondulado (AVADE); b) Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico moderado, de textura arenosa/média/argilosa e relevo plano a suave ondulado (AVADT); c) Planossolo Hidromórfico Distrófico Arênico moderado, de textura média leve/argilosa e relevo plano (PHDA); e, d) Neossolo Quartzarênico Típico, de textura arenosa e relevo plano (NQT). Neste estudo, essa caracterização foi considerada apenas para explicar possíveis variações das medições entre talhões de mesma idade e espaçamento, sem pretensões de realizar uma análise mais profunda, o que requereria um tipo de abordagem mais específica.

3.3 Medição de unidades amostrais de Inventário

Para a análise da viabilidade técnica do uso do IAF estimado por sensoriamento remoto (IAF_{SR}) na estimativa da intensidade de amostragem para o IF foram avaliados 23 talhões, em idades que variaram entre, aproximadamente, três e oito anos, perfazendo um total de 778,21 ha. Os talhões avaliados foram: 110B, 115B, 121A, 122A, 126A, 129A, 147A, 150A, 163B, 209D, 272C, 301A, 341A, 348A, 351A, 401B, 406B, 407C, 407D, 410A, 413D, 418B e 433B, visualizados na Figura 4.

Figura 4 – Talhões selecionados para avaliar a estimativa da intensidade de amostragem para o inventário florestal pelo uso de IAF_{SR} .



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = Índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

Nesses talhões foram medidas parcelas permanentes de inventário (PPI), pertencentes ao Sistema de Inventário Florestal Contínuo (IFC) da empresa. No IFC, as PPI foram alocadas aleatoriamente em estratos administrativos (horto florestal, espécie ou material genético, idade, rotação ou manejo e tipo de solo), em uma intensidade de amostragem de, aproximadamente, uma parcela a cada cinco hectares, sem coordenadas geográficas pré-estabelecidas em mapa. As PPI, de formato circular e tamanho de 400 m², foram demarcadas no campo e georeferenciadas com GPS navegador marca Garmin.

Nessas medições foram levantados dados de diâmetro à altura do peito (DAP) em centímetros, altura total (h) em metros e situação (vitalidade, sanidade, forma ou outro) de cada árvore, para posterior processamento de dados. Nesse processamento foi estimado o volume total com casca (VTCC), por meio de uma equação específica para a espécie/clone. Um total de 117 PPI foram medidas para este estudo, entre os dias 10 e 17 de junho de 2013.

3.3.1 Estimadores do inventário florestal de campo

Para cada talhão foi realizada a análise estatística do inventário, pelo processo de amostragem inteiramente aleatória (AIA), com a finalidade de obter os estimadores de coeficiente de variação ($CV\%_{INV}$) e erro de amostragem ($E_r\%$) para a variável vtcc, com 95% de probabilidade de confiança, de acordo com Péllico Netto e Brena (1993). Também foi estimada a intensidade de amostragem ideal utilizando $CV\%_{INV}$, para diferentes limites de erro de amostragem (LE) esperado, sendo: LE = 15%, 10% e 5%.

Estabeleceu-se um valor mínimo de intensidade de amostragem igual a três, para que as análises estatísticas pudessem ser realizadas.

3.4 Medição do Índice de Área Foliar no campo

A medição do Índice de Área Foliar no campo (IAF_{campo}) foi realizada durante os meses de março e abril de 2013, utilizando o equipamento de medição indireta de IAF, o Li-Cor LAI-2000 Plant Canopy Analyser (LI-COR, 1992). Conforme proposto pelo fabricante, as medições foram realizadas sob condições de radiação difusa, nas primeiras horas da manhã e no final da tarde, quando não havia incidência direta de raios solares sobre os sensores. Utilizou-se o método dos dois sensores, com um sensor de referência coletando dados em uma área livre de

vegetação (campo aberto) e outro sensor de medição fazendo as coletas sob o dossel nas PPI. Ambos os sensores foram posicionados e orientados na mesma direção. Como as PPI são de tamanho reduzido (400 m^2) e a coleta foi realizada por operadores, o campo de visualização azimutal do sensor foi restringido a 45° , pelo fato do LAI-2000 ser capaz de detectar objetos fora da parcela de medição, o que poderia afetar as estimativas. Buscou-se assim minimizar os erros de medição. Todas as medições com o equipamento foram tomadas entre as linhas de plantio e a $1,30 \text{ m}$ do solo, neste caso para reduzir o efeito do sub-bosque.

Foram consideradas as medições de $\text{IAF}_{\text{campo}}$ em 40 PPI, pertencentes a 11 talhões ($246,33 \text{ ha}$), em idades variando entre, aproximadamente, três e oito anos. Em cada PPI foram tomadas em média 30 medições de IAF, cobrindo toda a superfície da parcela. O valor do IAF de cada PPI foi obtido pelo cálculo da média dessas medições, obtido diretamente pelo equipamento.

Os valores de $\text{IAF}_{\text{campo}}$ por PPI foram associados às respectivas informações de inventário, e a variação do IAF nas diferentes idades, tipos de solo e espaçamento foi analisada pelo coeficiente de variação de IAF (CV_{IAF}) e pela ANOVA.

Para descrever o comportamento do $\text{IAF}_{\text{campo}}$ em função da idade nos talhões estudados foi ajustado um modelo linear. Para melhor ajuste nos anos iniciais, por não haver plantios comerciais mais jovens desse clone no HFBN, foram utilizados dados de $\text{IAF}_{\text{campo}}$ medidos aos 12 e 18 meses de idade, obtidos de dois experimentos plantados com o mesmo material genético em outra fazenda da empresa.

3.5 Relação entre Incremento Periódico em volume e $\text{IAF}_{\text{campo}}$

No mês de dezembro de 2013, aproximadamente seis meses após a primeira medição foram novamente medidas algumas PPI, para obter o incremento periódico (IP) em VTCC. Cinco talhões ($129,49 \text{ ha}$) foram selecionados e ao todo foram remedidas 20 PPI em plantios de diferentes idades (entre 3,5 e 6,5 anos), com o propósito de estabelecer as relações entre a produtividade dos plantios e o IAF. O IP de VTCC, em $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, para um período de seis meses (0,5 anos) foi obtido pela expressão 4 (adaptada de FINGER, 1992):

$$\text{IP} = \text{VTCC}_{(m+n)} - \text{VTCC}_{(m)} \quad (4)$$

Em que:

VTCC = volume total com casca, em metros cúbicos por hectare; m = idade de referência, em anos; n = período de tempo, em anos.

Para avaliar a viabilidade de uso do IAF como indicador de produtividade florestal, representado nas medições de campo pelo IP, foram testadas as seguintes hipóteses:

H₀: A relação entre o IP e o IAF não é significativa para plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith.

H₁: A relação entre o IP e o IAF é significativa para plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith.

As análises de correlação e regressão foram utilizadas para testar as hipóteses, sendo que no caso de H₀ ser rejeitada, a utilização do IAF como indicador de produtividade de plantios clonais comerciais de *Eucalyptus saligna* Smith seria considerada viável.

3.6 Obtenção dos Índices de Vegetação

Para esta análise foi utilizada uma imagem orbital obtida pelo sensor Operational Land Imager (OLI), a bordo do satélite Landsat 8, gerada em maio de 2013 pelo United States Geological Survey (Figura 5) (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2013).

A imagem foi disponibilizada gratuitamente pela página web da USGS, em formato GeoTIFF (georreferenciada), e Datum WGS84. As especificações da imagem estão descritas na Tabela 1.

Os números digitais (ND) da imagem foram inicialmente convertidos para radiância (L_i), utilizando os valores de ganho e *offset* disponíveis no arquivo de metadados da imagem. Posteriormente, a radiância foi convertida para reflectância (ρ_i) no topo da atmosfera, conforme a expressão 5 (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

O software utilizado para o tratamento dos dados foi o ENVI 5.1 (ENVI 5.1, 2014), versão *trial*. As imagens utilizadas possuem 30 m de resolução espacial.

$$\rho_i = \frac{\pi \cdot L_i \cdot d^2}{E_{sun} \cdot \cos\theta} \quad (5)$$

Em que:

ρ_i = fluxo radiante ou reflectância no topo da atmosfera, para a banda i ; L_i = radiância aparente ($\text{Watts} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), para a banda i ; d = distância Sol-Terra em unidades astronômicas; E_{sun} = Irradiância média do sol no topo da atmosfera ($\text{Watts} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); θ = ângulo solar zenital.

Figura 5 – Imagem-composição RGB obtida pelo sensor *Operational Land Imager* (OLI), a bordo do satélite Landsat 8, com identificação do local de estudo.



Fontes: USGS, 2013; Berger, 2014.

Tabela 1 - Especificações da imagem do sensor OLI/Landsat 8 utilizada para a estimativa dos Índices de Vegetação dos plantios comerciais clonais de *Eucalyptus saligna* Smith do Horto Florestal Barba Negra, em maio/2013.

Especificações da imagem OLI/LANDSAT 8	
Órbita/Ponto	221/81
Data	26/05/2013
Hora (TMG)	13:20:46
Azimute Solar	33,44°
Elevação Solar	30,87°
Qualidade da Imagem	9*
Sistema Geodésico de Referência	WGS84

Fonte: USGS, 2013.

TMG=tempo médio de Greenwich; *Sem erros detectados, cena perfeita.

Para a obtenção dos índices de vegetação (IV), após o pré-processamento da imagem, foram realizadas operações matemáticas utilizando a banda 4 (fluxo radiante refletido no vermelho) e a banda 5 (fluxo radiante refletido no infravermelho próximo). No sensor OLI, essas bandas espectrais operam entre o comprimentos de onda 0,64-0,67 μm e 0,85-0,88 μm , respectivamente, para banda 4 e banda 5 (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2014).

Assim, foram geradas três imagens índice de vegetação, a saber: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice da Razão Simples (SRI) e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) obtidas, respectivamente, pelas expressões (1), (2) e (3), (item 2.3.2), conforme Jensen (2011). A função *Math Band* do software ENVI 5.1 foi utilizada para realizar as operações. Para a constante L do SAVI, foi adotado o valor de 0,5 para uma densidade de vegetação média, segundo Huete (1988).

Após o processamento dos dados os arquivos foram exportados para o software ArcMap (Versão 10.1).

Os arquivos *shape* dos talhões do HFBN foram disponibilizados pela empresa, sendo utilizada uma versão atualizada para o mês de abril de 2013. Esses arquivos continham informações sobre o uso do solo por talhão, referentes à data de plantio, ao material genético, ao espaçamento e ao tipo de solo predominante, entre outros. Desta maneira, após a obtenção dos IV para a imagem, gerando três imagens índice de vegetação, foi criado um arquivo de banco de dados com os respectivos valores de NDVI, SRI e SAVI por pixel contido em cada um dos 23 talhões avaliados.

3.7 Relação IAF_{campo} e índices de vegetação

Os valores de IAF_{campo} foram relacionados aos valores dos IV em cada PPI, sendo esses resultantes de uma média entre os oito pixels vizinhos ao pixel que continha o centro da PPI e este último, totalizando nove pixels. Essa metodologia foi adotada porque as coordenadas UTM das PPI foram registradas com uso de GPS navegador, cujos erros podem ser superiores a 5 m, o que não assegura sua localização exata no campo. Metodologia semelhante foi utilizada por Salvador e Pons (1998), ao relacionar parâmetros biométricos de parcelas de inventário com os valores de reflectância de bandas espectrais do Landsat 5/TM e alguns índices de

vegetação e por Forest Nutrition Cooperative (2007), ao relacionar dados de IAF obtido no campo e o SRI obtido de uma imagem Landsat 5/TM.

Para reduzir a variabilidade entre a relação IAF_{campo} e IV foram eliminados todos os pontos de medição cujo coeficiente de variação entre IV dos nove pixels tenha sido maior que 10%. Também foram eliminados todos os pontos localizados em áreas limites, tais como bordas, caminhos, corpos de água, ou outros usos do solo que pudessem interferir nas estimativas de IAF_{SR} .

Posteriormente foram estabelecidos pares de dados entre IAF_{campo} e NDVI, entre IAF_{campo} e SRI e entre IAF_{campo} e SAVI com o propósito de analisar a relação entre essas variáveis. Para avaliar a viabilidade de estimar o IAF a partir de NDVI, SRI ou SAVI, foram testadas as seguintes hipóteses:

H_0 : A relação entre o IAF e os IV não é significativa para plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith.

H_1 : A relação entre o IAF e os IV é significativa para plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith.

A análise de regressão linear simples foi utilizada para testar as hipóteses e para estabelecer e selecionar equações que estimariam o IAF em função dos diferentes IV. Os critérios para a seleção da melhor equação foram as estatísticas coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) e distribuição gráfica de resíduos. Adicionalmente foi realizada uma análise semelhante por idade de plantio buscando verificar se algum dos IV poderia estimar o IAF com maior precisão em uma idade específica.

Definida a equação essa foi utilizada para estimar o IAF de cada pixel em função dos respectivos IV da imagem, utilizando a função *Raster Calculator* do ArcGIS, gerando uma imagem IAF estimada por SR (IAF_{SR}).

Os arquivos *shape* de uso do solo dos talhões do HFBN foram utilizados para analisar o comportamento do IAF_{SR} estimado nas diferentes condições de cobertura do solo, buscando avaliar a coerência das estimativas.

3.8 Planejamento do inventário florestal pelo uso de IAF_{SR}

A imagem IAF_{SR} foi utilizada para avaliar a viabilidade de uso do IAF para estimar a intensidade de amostragem do inventário de campo, sendo geradas duas

possibilidades para analisar a ferramenta como um potencial inventário piloto. Talhões com comportamentos inconsistentes quanto à relação entre o IAF_{SR} e VTCC nas PPI foram excluídos das análises (ver item 4.5).

A primeira alternativa considerou os valores originais dos pixels para determinação do coeficiente de variação de IAF_{SR} ($CV\%_{IAF}$) entre pixels dentro de cada talhão, onde a intensidade de amostragem foi estimada por AIA.

A segunda alternativa classificou os valores de IAF_{SR} por pixel em seis categorias ou classes de IAF_{SR} , conforme proposto por Berger et al., (2009) (Tabela 2):

Cada classe de IAF_{SR} foi considerada como um possível estrato (ver critérios no item 3.8.1) assegurando o limite citado por Cochran (1965), que indicou serem mínimos os benefícios quando o número de estratos aumenta para um número maior de seis. Nesse sentido, buscou-se uma maneira prática para determinar as classes de IAF_{SR} e o tamanho dos estratos, sendo esse último obtido pela soma de pixels pertencentes a cada estrato dentro do talhão permitindo assim, o cálculo da proporção (McROBERTS et al., 2006).

Tabela 2 – Classes de índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto (IAF_{SR}) para plantios comerciais de *Eucalyptus saligna* Smith no Horto Florestal Barba Negra, em maio/2013.

Classe de IAF_{SR} (estrato)	Valores de IAF_{SR} por pixel
Sem classificação	< 0
0	0 + 1
1	1 + 2
2	2 + 3
3	3 + 4
>4	> 4

Fonte: Berger, 2014.

Para o cálculo da intensidade de amostragem baseada em na variação de IAF_{SR} entre pixels, os talhões avaliados foram separados em duas categorias, embasadas nas alternativas apresentadas em 3.8: *talhões com estratos* e *talhões sem estratos*. A metodologia de estabelecimento e análise adotada em cada categoria é apresentada nos itens 3.8.1 e 3.8.2.

Foram eliminados todos os pixels que resultaram em valores de IAF_{SR} negativo (ou sem classificação) dentro de cada talhão.

A intensidade de amostragem estimada pelo IAF_{SR} para as alternativas analisadas foi convertida em fração de amostragem, para posterior conversão em número de UA de inventário. Este procedimento foi adotado porque os pixels da imagem correspondem a uma superfície de 900 m^2 ($30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$), e as parcelas de inventário possuem 400 m^2 .

O valor de graus de liberdade para a determinação da estatística t foi obtido inicialmente a partir do número de pixels contido em cada talhão, considerando que esses compõem o total da população (N). A intensidade de amostragem foi estimada considerando a população como infinita (McROBERTS et al., 2006).

3.8.1 Talhões com estratos de IAF_{SR}

Nesta categoria o número de estratos foi definido de acordo com as classes de IAF_{SR} estabelecidas no item 3.8, selecionando os talhões que apresentaram a formação de ao menos dois agrupamentos de pixels pertencentes a duas classes diferentes de IAF (estratos). O tamanho mínimo do estrato foi definido como igual ou superior a seis hectares no talhão, podendo ser formado por um ou mais grupos isolados de tamanho mínimo superior a um hectare no mesmo talhão, desde que totalizassem seis hectares. Este critério considerou uma análise espacial (visual) da distribuição dos estratos dentro dos talhões e foi definido para permitir a posterior instalação das parcelas de inventário.

No caso em que algum estrato não alcançasse a superfície mínima estabelecida (contígua ou não), porém outros estratos imediatamente acima ou abaixo apresentassem possibilidade de estratificação no talhão, os estratos sem superfície mínima foram incorporados ao estrato mais próximo.

Para efeito de comparação, a intensidade de amostragem do inventário foi calculada para os processos AE e AIA nos talhões com estratos ($LE = 15\%$, 10% e 5%), sendo para AE utilizada a alocação ótima com custos iguais (Alocação de Neyman).

Estabeleceu-se um valor mínimo de intensidade de amostragem igual a três, para que as análises estatísticas pudessem ser realizadas.

Os resultados de intensidade de amostragem para AIA e AE nos talhões com estratos foram plotados em gráficos e analisados para limites de erro de amostragem ($LE\%$) esperados de 5% , 10% e 15% .

Para avaliar a efetividade teórica da estratificação por IAF_{SR} foi realizada análise de variância (Tabela 3) para os talhões com estratos válidos de IAF.

No caso de existirem diferenças significativas entre as médias de IAF por estrato, a amostragem estratificada poderia trazer vantagens no que se refere à precisão e custos de inventário (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993).

Tabela 3 - Análise de variância da efetividade teórica da estratificação para talhões com estratos de IAF_{SR} no Horto Florestal Barba Negra.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F _{calc.}
Entre estratos	L - 1	$SQ_e = \sum_{h=1}^L N_h \cdot (\bar{X}_h - \bar{X})^2$	$QM_e = \frac{SQ_e}{L - 1}$	$F_{calc} = \frac{QM_e}{QM_d}$
Dentro dos Estratos	N - L	$SQ_d = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^{N_h} (X_{ih} - \bar{X}_h)^2$	$QM_d = \frac{SQ_d}{N - L}$	
Total	N - 1	$SQ_T = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^{N_h} (X_{ih} - \bar{X})^2$	$QM_T = \frac{SQ_T}{N - 1}$	

Fonte: Adaptado de Péllico Netto e Brena (1993).

Em que: GL=graus de liberdade; SQ=soma de quadrados; QM=quadrado médio; F_{calc.}=valor de F calculado; L=número de estratos; N=número total de pixels do talhão; IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto; N_h = número potencial de unidades do estrato h; \bar{X}_h = Média de IAF por estrato; X_{ih} = variável de interesse, neste caso o IAF; \bar{X} =média estratificada.

3.8.2 Talhões sem estratos de IAF_{SR}

Para os talhões que não atenderam aos critérios de estratificação (o talhão foi considerado homogêneo segundo o critério de estratificação), a intensidade de amostragem foi obtida considerando o processo de amostragem inteiramente aleatória (AIA), sendo estabelecido um valor mínimo de intensidade de amostragem igual a três, para que as análises estatísticas pudessem ser realizadas.

3.9 Validação da estimativa da intensidade de amostragem por IAF_{SR}

Para esta análise foi realizado um novo inventário florestal em quatro talhões selecionados, durante o mês de julho de 2014, em um total de 173,43 ha. Os critérios de seleção foram estabelecidos para os talhões sem estratos e com estratos, sendo que para este último foram incluídos dois casos considerados especiais.

O talhão 126A, com 7,25 anos de idade, plantado em espaçamento 3,00 m x 3,00 m, foi selecionado por apresentar três estratos claramente definidos e idade próxima ao corte final (Figura 25, no item 4.9).

O talhão 401B, com 4,2 anos de idade, plantado em espaçamento 3,00 m x 3,00 m, foi selecionado por apresentar dois estratos definidos e porque os resultados do inventário de campo mostraram um alto CV% (Figura 26, no item 4.9).

Apesar de apresentar um baixo CV% de inventário de campo, para o talhão 418B (8,9 anos de idade, plantado em espaçamento 3,00 m x 2,50 m) as análises espaciais de IAF_{SR} mostraram um setor diferenciado, em que não havia parcelas no inventário inicial. Neste sentido, foram instaladas UA nos dois estratos, de acordo com a intensidade de amostragem definida pelo $CV\%_{IAF}$ (Figura 27, no item 4.9).

O talhão 406B, com sete anos de idade, plantado em espaçamento 3,00 m x 2,50 m, foi selecionado por apresentar o menor $CV\%_{IAF}$ para estimar a intensidade de amostragem para o inventário de campo por AIA (Figura 28, no item 4.9).

Para os talhões com estratos, após a geração de mapas com a localização dos estratos de IAF, foram remedidas algumas PPI, e/ou lançadas aleatoriamente novas unidades amostrais (UA), de acordo com a localização da UA no estrato e da intensidade de amostragem definida pela alocação ótima de Neyman (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993), para $LE\%=10\%$ (talhões 126A e 418B). Um $LE\%=15\%$ foi adotado para o talhão 401B, motivado pela maior variabilidade de IAF resultante ($CV=34,3\%$), que ocasionaria maior intensidade de amostragem. Para os casos em que $n=1$, foram adicionadas duas UA para compor o estrato e permitir as análises estatísticas.

Para o talhão sem estratos, algumas PPI foram remedidas e novas UA instaladas, e lançadas aleatoriamente por toda a extensão do talhão, de acordo com a intensidade de amostragem estimada por AIA, também para um $LE\%=15\%$.

Os estimadores de inventário de campo foram obtidos para AIA e para AE, conforme Péllico Netto e Brena (1993).

Para avaliar a efetividade da estratificação por IAF_{SR} na validação de campo foi realizada ANOVA (conforme a Tabela 3), para o VTCC dos talhões com estratos. No caso de existirem diferenças significativas entre as médias de VTCC por estrato, a amostragem estratificada traria vantagens no que se refere à precisão e custos de inventário (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1993). O propósito da estratificação em melhorar a precisão do IF também foi medido pela eficiência relativa, em que valores superiores a 1,0 indicam a efetividade da estratificação (McROBERTS; LIKNES; DOMKE, 2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do Índice de Área Foliar medido no campo

Os resultados IAF_{campo} obtidos com o LAI-2000 mostram que em todas as idades avaliadas, houve ampla variação entre as PPI, com valores entre 1,30 e 4,01 (Tabela 4).

Tabela 4 – Estatística descritiva para IAF_{campo} de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith em diferentes idades.

IAF_{campo}	Idade (anos)			
	3	5	6	8
Média	3.28	2.66	2.51	1.37
Mín	2.43	1.87	1.69	1.30
Máx	4.01	3.24	2.85	1.44
n	10	17	11	2

Fonte: Berger (2013).

IAF_{campo} = índice de área foliar medido no campo.

Xavier et al. (1998), ao estudar diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. entre doze meses e seis anos, sob manejo de reforma e rebrota, encontraram valores de IAF_{campo} semelhantes, variando entre 1,5 e 4,5.

Quando analisados por idade, os valores de IAF_{campo} variaram entre 2,43 e 4,01 aos três anos, entre 1,87 e 3,24 aos cinco anos, entre 1,69 e 2,85 aos seis anos e entre 1,30 e 1,44 aos oito anos. A menor amplitude de IAF_{campo} foi observada aos oito anos (0,14) e a maior aos três anos (1,58) (Tabela 5).

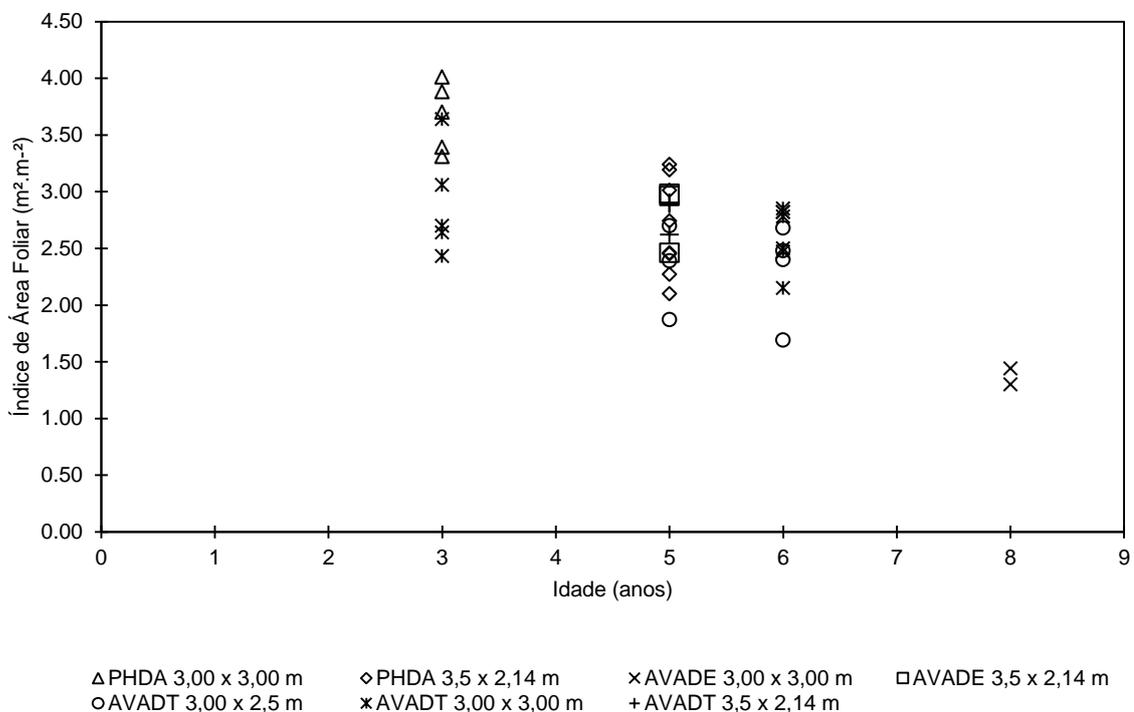
Resultados semelhantes foram obtidos por Xavier, Soares e Almeida (2002) estudando clones híbridos de *Eucalyptus grandis* no Norte do estado do Espírito Santo. Os autores avaliaram a variação do IAF_{campo} dos 15 e 84 meses após o plantio, em espaçamento 3,00 m x 3,00 m, e o esse variou entre 1,72 e 4,31. Os maiores valores de IAF_{campo} foram encontrados em plantios jovens (24 meses) e os menores em plantios de 60 meses. Tendência semelhante foi encontrada por Almeida et al. (2007) e Almeida et al. (2010), avaliando plantios clonais de *Eucalyptus* sp. entre três e seis anos de idade.

A apresentação e discussão dos resultados por tipos de solo e espaçamentos de plantio foram incluídas na análise para melhor compreensão da variação e da amplitude de IAF_{campo} observada em cada idade (Figura 6).

Apesar da grande amplitude observada por idade e por tipo de solo e/ou espaçamento (Figura 6 e Tabela 5), percebe-se uma evidente tendência de diminuição de IAF_{campo} entre os três e oito anos de idade. Xavier, Soares e Almeida

(2002) encontraram a mesma tendência para três dos cinco clones híbridos de *Eucalyptus grandis*, encontrando correlações negativas significativas (entre -0,67 e -0,83). Para os autores, essa tendência reflete o comportamento do incremento corrente anual (ICA), que nessas plantações atinge o pico máximo entre três e quatro anos, decrescendo sensivelmente após essa idade. Resultados semelhantes foram obtidos por Almeida et al. (2007), em que as idades de máximo ICA e máximo IAF são coincidentes.

Figura 6 – Comportamento do IAF_{campo} de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith, em diferentes idades, tipos de solo e espaçamentos de plantio.



Fonte: Berger (2013).

IAF_{campo} = Índice de área foliar medido no campo; AVADE = Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Espessarênico; AVADT = Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico; PHDA = Planossolo Hidromórfico Distrófico Arênico A.

É importante ressaltar que a caracterização dos solos corresponde ao tipo de solo predominante nos talhões, e não necessariamente é única e homogênea no interior desses. Por outro lado, a caracterização do espaçamento é nominal, e este pode variar de acordo com as práticas operacionais e a sobrevivência dos plantios. Esses fatores poderiam contribuir para o entendimento do comportamento do Coeficiente de Variação ($CV\%_{IAF}$) de IAF_{campo} em cada idade, tipo de solo e espaçamento (Tabela 5).

Tabela 5 – Estatística descritiva (média e amplitude) e coeficiente de variação ($CV\%_{IAF}$) de IAF_{campo} de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith nas diferentes idades, tipos de solo e espaçamentos de plantio avaliados.

Idade (anos)	Tipo de solo	Espaçamento (m)		
		3 x 2,5	3 x 3	3,5 x 2,14
3	AVADT	...	2.89(1.21) 10%	...
	PHDA	...	3.66(0.57) 8%	...
5	AVADE	2.80(0.50) 11%
	AVADT	2.32(0.83) 18%	...	2.80(0.28) 6%
	PHDA	2.68(1.14) 16%
6	AVADT	2.31(0.99) 19%	2.63(0.70) 10%	...
8	AVADE	1.37(0.14) 7%		

Fonte: Berger (2013).

IAF_{campo} = Índice de área foliar medido no campo; AVADE = Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Espessarênico; AVADT = Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico; PHDA = Planossolo Hidromórfico Distrófico Arênico; Valores entre parênteses refletem a amplitude de IAF_{campo} e os valores em porcentagem refletem o $CV\%_{IAF}$.

Para os plantios de três anos, cujo espaçamento não foi variável (3,00 m x 3,00 m), o $CV\%_{IAF}$ foi de 10% e 8%, respectivamente para o IAF_{campo} em argissolo vermelho amarelo distrófico típico (AVADT) e planossolo hidromórfico distrófico arênico (PHDA). A análise de variância (ANOVA) mostrou que houve diferença significativa ($\alpha=5\%$) entre os dois tipos de solo (Apêndice A, Tabela 17). Os planossolos hidromórficos (PHDA) apresentaram valores de IAF_{campo} estatisticamente superiores àqueles observados em argissolos (AVADT). Em média, nos solos PHDA, o IAF_{campo} aos três anos foi de 3,66 e sua amplitude de variação foi de 0,57. A amplitude de variação para os solos AVADT foi maior (1,21) e a média de IAF_{campo} foi menor (2,89).

Para o IAF_{campo} em plantios de cinco anos apenas o espaçamento 3,50 m x 2,14 m foi implantado nos três tipos de solo avaliados, sendo que o $CV\%_{IAF}$ foi de 6%, 11% e 16%, respectivamente para AVADT, AVADE e PHDA. Nesse espaçamento, a ANOVA mostrou que houve diferença significativa ($\alpha=5\%$) entre as médias de IAF_{campo} nos diferentes tipos de solo (Apêndice A, Tabela 18).

Aos cinco anos, os plantios em argissolos (AVADE e AVADT) mostraram médias de IAF_{campo} iguais (2,80), estatisticamente superiores ao IAF_{campo} médio (2,68) em planossolos hidromórficos (PHDA). Para esse tipo de solo, a amplitude de variação de IAF_{campo} foi a mais alta (1,14) em comparação ao AVADE (0,50) e ao AVADT (0,28). Por outro lado, apenas o tipo de solo AVADT possuía variação de espaçamentos (3,50 m x 2,14 m e 3,00 m x 2,5 m), cujo $CV\%_{IAF}$ foi de 6% e 18%,

respectivamente. Não foi encontrada diferença significativa ($\alpha=5\%$) entre as médias de IAF_{campo} nos diferentes espaçamentos (Apêndice A, Tabela 19).

Os plantios de seis anos avaliados foram implantados em um único tipo de solo (AVADT), em dois espaçamentos diferentes (3,00 m x 3 m e 3,00 m x 2,5 m), cujo $CV\%_{IAF}$ foi de 19% e 10%, respectivamente. Não foi encontrada diferença estatística significativa ($\alpha=5\%$) entre as médias de IAF_{campo} (Apêndice A, Tabela 20).

Aos oito anos foram consideradas na análise somente duas PPI, pois no talhão avaliado havia abundante presença de sub-bosque de porte arbóreo, predominantemente da espécie *Butia capitata* (Mart.) Becc., incluída na categoria em perigo da Flora Nativa Ameaçada de Extinção no Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2002) e mantida nos talhões comerciais. Na maior parte dos talhões sua presença é esporádica, porém em algumas PPI dos plantios de oito anos não foi possível medir o IAF_{campo} por haver interferência das copas da referida espécie nas medições. Apesar de não terem sido observados indivíduos dessa espécie nas PPI inicialmente incluídas nessa idade, três medições foram descartadas da análise por resultarem em diferenças superiores a 80% em relação aos valores médios de IAF_{campo} obtidos. O $CV\%_{IAF}$ entre as PPI que permaneceram na análise nessa idade foi de 7%. Neste caso é possível que tenha havido interferência de vizinhos, pois o equipamento LAI-2000 realiza medições periféricas, e indivíduos estranhos à parcela podem ter sido incluídos. Este fato ressalta a limitação de algumas estimativas indiretas de IAF, conforme destacado na literatura e alerta para a precaução no uso indiscriminado da ferramenta.

Xavier, Soares e Almeida (2002), apesar de não fazerem menção às possíveis variações de solo nos talhões avaliados, apresentaram resultados de desvios que levam a um $CV\%_{IAF}$ variando entre 15% e 19% para os diferentes clones analisados.

O efeito significativo dos tipos de solo evidencia a influência da capacidade produtiva dos sítios no IAF. A partir do fechamento do dossel, o espaçamento não exerce efeito significativo no IAF. A variação do IAF_{campo} de acordo com a idade dos plantios foi explicada por um polinômio de terceiro grau, ajustado para os dados observados, cuja ANOVA (Apêndice B) mostrou significância para a regressão. Como os plantios deste estudo foram avaliados a partir dos três anos de idade, foram incluídas quatro medições adicionais de IAF_{campo} em idades menores, aos 12

e 18 meses, realizadas em experimentos implantados com o mesmo material genético, para melhor ajuste do modelo.

As estatísticas de regressão linear múltipla (Tabela 6) mostram um coeficiente de determinação ($R^2\%$) de 57,3%, e um erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) de 17,5%. O alto valor de $S_{yx}\%$ da equação se deve a grande dispersão de IAF_{campo} observado em cada idade, conforme discutido anteriormente.

Tabela 6 – Coeficientes e estatísticas do modelo de regressão ajustado para estimar o índice de área foliar (IAF) em função da idade (t) de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith.

Modelo	Coeficientes e estatísticas
Parâmetros do modelo Linear Múltiplo*	
β_0	-0.894327241
β_1	2.777812502
β_2	-0.569415514
β_3	0.032533482
Estatísticas	
Coeficiente de Determinação ($R^2\%$)	57.3
Erro padrão da Estimativa ($S_{yx}\%$)	17.5

Fonte: Berger (2013).

* $IAF = \beta_0 + \beta_1 \cdot t + \beta_2 \cdot t^2 + \beta_3 \cdot t^3 + \varepsilon_i$

Xavier, Soares e Almeida (2002) ajustaram equações lineares simples e quadráticas para explicar a variação do IAF com a idade, com valores de R^2 entre 0,45 e 0,83. Almeida et al. (2007) ajustaram uma equação linear de quarto grau, obtendo um R^2 de 0,79.

É importante ressaltar que o presente estudo e o de Xavier, Soares e Almeida (2002) não acompanharam a dinâmica do IAF_{campo} em um mesmo povoamento, sendo realizado um levantamento simultâneo em diferentes idades. Esse fato pode ter gerado as importantes diferenças de IAF_{campo} observadas nas idades avaliadas.

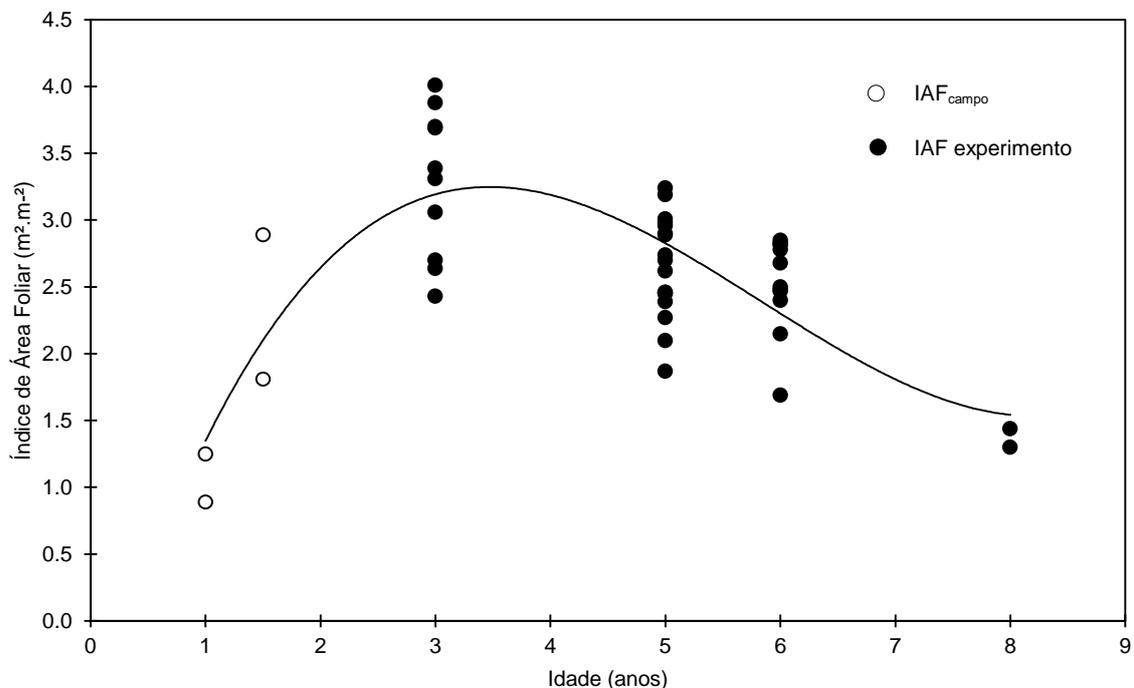
A equação de regressão resultante (Expressão 6, Figura 7) mostra que a variação do IAF_{campo} nas diferentes idades corresponde ao comportamento típico da espécie. São encontrados menores valores nas idades iniciais, um ponto de máxima próximo à idade de maior incremento corrente e posterior diminuição nas idades mais avançadas (ALMEIDA et al., 2007; ALMEIDA et al., 2010; XAVIER; SOARES; ALMEIDA, 2002) (Figura 7).

$$\text{IAF} = -0.894327241 + 2.777812502*t - 0.569415514*t^2 + 0.032533482*t^3 \quad (6)$$

Em que t é a idade do povoamento.

Observa-se na Figura 7 que o IAF estimado pela expressão 6 tende a atingir um ponto de máxima em uma idade entre três e quatro anos. O pico máximo de IAF próximo aos três anos para *Eucalyptus* sp. também foi encontrado nos estudos de Almeida et al. (2007), com valores máximos de IAF próximos a quatro. Já Chaves et al. (2007) encontraram valores de IAF próximos a quatro em plantios não desbastados de *Eucalyptus grandis* aos 68 meses, sendo observadas diferenças significativas de IAF entre povoamentos desbastados e não desbastados. Xavier, Soares e Almeida (2002) encontraram os maiores valores de IAF para *Eucalyptus grandis* em idades próximas aos dois anos. FORRESTER, COLLOPY e MORRIS (2010) observaram valores máximos de IAF entre três e quatro, para povoamentos de *Eucalyptus globulus* nativos, ocorrendo nas idades entre quatro e seis anos.

Figura 7 – Dados observados de $\text{IAF}_{\text{campo}}$ e de um experimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith em diferentes idades, tipos de solo e espaçamentos de plantio. A linha sólida representa a equação de regressão.



Fonte: Berger (2013).

$\text{IAF}_{\text{campo}}$ = Índice de área foliar medido no campo.

O aumento progressivo do IAF nas idades iniciais, até atingir o ponto de máxima, foi apontado por Almeida, Landsberg e Sands (2004) como uma estimativa de maior complexidade de obtenção, pois o potencial de crescimento de plantios de *Eucalyptus* nestas idades é muito maior do que perto do final da rotação.

A redução do IAF com a idade em plantios de rápido crescimento também foi observada por outros autores (ALMEIDA et al., 2007; ALMEIDA et al., 2010; FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007; FORRESTER; COLLOPY; MORRIS, 2010; SMETHURST et al., 2003; XAVIER; SOARES; ALMEIDA, 2002). Para estes últimos autores, esse fato reflete a diminuição do incremento corrente anual a partir dos três ou quatro anos de idade.

4.2 Relação do Índice de Área Foliar e incremento periódico em volume

Os valores médios, mínimos e máximos observados de IP em VTCC nas diferentes idades são apresentados na Tabela 7. O IP refere-se ao crescimento em VTCC em um período entre os meses de junho de 2013 (primeira medição) e dezembro de 2013 (segunda medição), perfazendo um total de seis meses de intervalo.

Tabela 7 – Estatística descritiva para incremento periódico em volume total com casca (IP) de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith nas diferentes idades de medição.

IP (m ³ .ha ⁻¹)	Idade (anos)		
	3.5	5.5	6.5
Média	37.65	33.29	29.15
Mín	29.74	21.49	18.08
Máx	45.91	39.44	34.70
n	7	7	6

Fonte: Berger (2013).

Período = seis meses.

É importante ressaltar que as medições ocorreram entre o início do período invernal e o final do período primaveril. De acordo com as condições climáticas do período (Tabela 3), as temperaturas médias foram mais baixas nos meses de julho e agosto, iniciando um aumento a partir de então. A precipitação no período foi mais alta que no restante do ano. Almeida et al. (2010) encontraram diferenças importantes entre o crescimento de híbridos de *Eucalyptus* sp. em períodos com precipitação inferior à média histórica anual.

A maior média de IP foi observada em plantios de 3,5 anos de idade ($37,65 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) e a menor ocorreu em plantios de 6,5 anos ($29,15 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$). O maior IP também foi observado aos 3,5 anos ($45,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), e o menor ocorreu aos 6,5 anos ($18,08 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

Apesar do pequeno número de medições e idades envolvidas, pode-se perceber uma clara tendência de diminuição do incremento periódico em VTCC a partir dos três anos de idade. Este resultado mostra uma semelhança ao comportamento do $\text{IAF}_{\text{campo}}$ com a idade encontrada neste estudo, no qual a idade de máximo IAF ajustada (Figura 7) ocorre entre os três e quatro anos. Estes resultados também coincidem com os comentários de Xavier, Soares e Almeida (2002), ao destacar a relação do IAF e o incremento corrente anual, bem como com os resultados de Almeida et al. (2007), ao comparar graficamente os picos de ICA em volume e o IAF, que ocorreram na mesma idade. Os autores sugerem que essa relação é contínua com a idade, pois os baixos valores de IAF levam a menor interceptação de radiação e conseqüentemente a menor produção de biomassa seca.

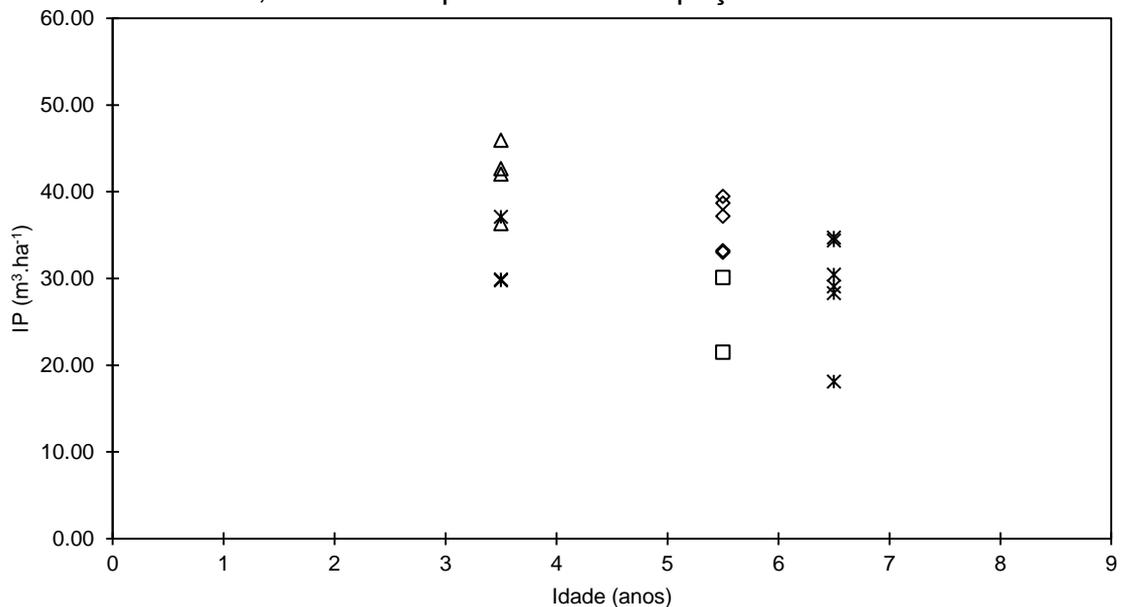
A variação do incremento periódico em volume (IP) observado em função da idade, espaçamento e tipo de solo pode ser visualizada na Figura 8.

Assim como ocorrido para o $\text{IAF}_{\text{campo}}$, a ampla diferença de IP em idades iguais provavelmente é devida às variações de tipo de solo. Outros fatores como o número de árvores por hectare e as condições de sítio específicas para cada PPI também podem ter contribuído para essa variação.

A correlação entre as variáveis de IP e IAF resultou positiva, com $r=0,63$ (Tabela 8) e significativa, conforme os resultados da ANOVA para a regressão (Apêndice C), das estatísticas da regressão (Tabela 8), podendo esta tendência ser visualizada na Figura 9.

As estatísticas de regressão linear simples (Tabela 8) mostram um baixo coeficiente de determinação ($R^2=39,3\%$) e um alto erro padrão da estimativa ($S_{yx}=16,3\%$), apesar da significância observada na ANOVA (Apêndice C). Entretanto há uma tendência positiva e significativa da correlação entre essas variáveis ($r=0,63$), ainda que baixa.

Figura 8 – Dados observados de incremento periódico em volume total com casca (IP) em função da idade, para um clone de *Eucalyptus saligna* Smith, em parcelas com diferentes idades, diferentes tipos de solo e espaçamentos.



△IP_PHDA 3,00 x 3,00 m ◊IP_PHDA 3,5 x 2,14 m □IP_AVADE 3,5 x 2,14 m *IP_AVADT 3,00 x 3,00

Fonte: Berger (2014).

AVADE = Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Espessarênico; AVADT= Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico; PHDA= Planossolo Hidromórfico Distrófico Arênico.

Tabela 8 – Coeficientes e estatísticas do modelo de regressão linear simples ajustado para estimar o incremento periódico em volume total com casca (IP) em função do IAF_{campo} de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith.

Modelo	Coeficientes e estatísticas
Coeficientes do modelo Linear Simples*	
β_0	6.82616684
β_1	9.15431565
Estatísticas	
Coeficiente de Correlação (r)	0,63
Coeficiente de Determinação (R ² %)	39,3
Erro padrão da Estimativa (S _{yx} %)	16,3

Fonte: Berger (2014).

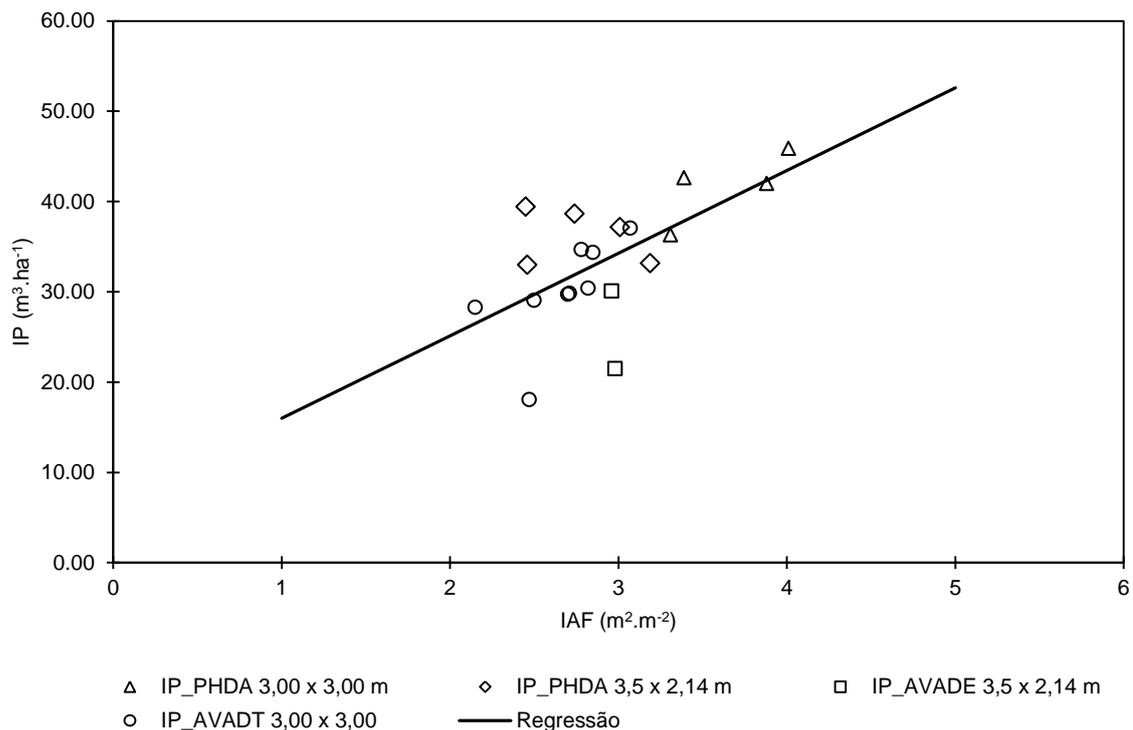
* IP= $\beta_0 + \beta_1 \cdot \text{IAF} + \varepsilon_i$

IAF_{campo}= Índice de área foliar medido no campo.

Conforme os resultados obtidos, para cada unidade de IAF houve um incremento de aproximadamente 9,1 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ em VTCC. Albaugh et al. (1998) encontraram valores de incremento de 7,7 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ para cada unidade de IAF em plantios de *Pinus taeda* L., ao estudarem o efeito da fertilização e da irrigação.

Rubilar et al. (2013) encontraram valores entre 2,9 e 7,1 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ por unidade de IAF para plantios de *Pinus radiata* D. Don, sob diferentes condições de fertilização e controle de mato-competição, indicando haver diferenças importantes na eficiência do IAF em diferentes sítios, devidas a restrições de água e nutrientes.

Figura 9 – Dados observados e ajuste de incremento periódico em volume total com casca (IP) em função do $\text{IAF}_{\text{campo}}$ para um clone de *Eucalyptus saligna* Smith, em parcelas com diferentes idades, tipos de solo e espaçamentos.



Fonte: Berger (2014).

$\text{IAF}_{\text{campo}}$ = Índice de área foliar medido no campo; AVADE = Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Espessarênico; AVADT = Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico; PHDA = Planossolo Hidromórfico Distrófico Arênico.

A avaliação de talhões de plantios comerciais, com toda a variação inerente às diferentes condições operativas e de sítio podem ter contribuído para o baixo ajuste da equação. Salvador e Pons (1998) sugerem que menor precisão das estimativas é normalmente encontrada nesses casos, pois há menor controle local do que em experimentos. O tamanho da amostra, a extensão da área de estudo e os erros decorrentes do processamento de dados de inventário também são apontados pelos autores como causas da variabilidade encontrada em análises que utilizam plantios comerciais.

A relação positiva entre a produtividade de plantios florestais e o IAF também foi observada por Arias, Calvo-Alvarado e Dohrenbusch (2007), ao analisar plantios homogêneos de quatro espécies nativas (*Terminalia amazonia*, *Vochysia ferruginea*, *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides*) e duas espécies exóticas (*Pinus caribaea* var *hondurensis* e *Gmelina arborea*) na Costa Rica. Os autores ajustaram modelos lineares simples para estimar o incremento médio anual das espécies mencionadas e obtiveram resultados de R^2 entre 87% e 97%, sugerindo que a produtividade dos povoamentos poderia ser estimada pelas medições de IAF. Os autores sugerem que os resultados obtidos também permitiriam a avaliação da qualidade dos sítios e monitoramentos silviculturais, e a análise do efeito de propriedades biofísicas (superfície fotossintética, evapotranspiração e produção primária líquida) no desenvolvimento dos talhões. Além disto, o uso de ferramentas que permitissem a estimativa de IAF em larga escala, tais como o sensoriamento remoto por satélites também é indicado pelos autores.

Albaugh et al. (1998) encontraram uma relação linear positiva e significativa entre o IAF e a produtividade em volume e biomassa de um experimento de fertilização e irrigação de *Pinus taeda* L.. Os valores máximos de produtividade estiveram fortemente relacionados aos picos máximos de IAF em cada tratamento.

Álvarez et al. (2013) também encontraram essa mesma relação entre IAF e o incremento periódico em volume de plantios comerciais de *Pinus radiata* D. Don, e ajustaram um modelo linear simples ($R^2=0,46$). Para essa mesma espécie, Rubilar et al. (2013) também encontraram uma relação linear entre o incremento em volume e o IAF sob diferentes sítios (R^2 variando entre 80% e 97%). Entretanto, a forma dessa relação variou amplamente entre os diferentes sítios,

Smethurst et al. (2003) encontraram forte relação entre o IAF e a produtividade de *Eucalyptus nitens* ($R^2=0,84$), ao analisarem o efeito da fertilização no IAF e no crescimento da espécie.

Para Forest Nutrition Cooperative (2007), o IAF pode ser considerado como um dos indicadores de maior potencial para a estimativa da produtividade florestal, existindo ainda muitas oportunidades para associar seu uso para melhorar a eficiência de inventários florestais, detectar necessidades nutricionais, entre outros. O IAF também pode ser considerado como um indicador de fácil compreensão no meio florestal, gerando índices de fácil interpretação da capacidade produtiva dos

sítios. Entretanto, sua estimativa em larga escala depende de ferramentas apropriadas, e os autores sugerem o uso de sensoriamento remoto para estimar o IAF em grandes extensões.

É importante ressaltar que este estudo busca apenas avaliar a relação entre o IAF e a capacidade produtiva dos sítios, sem pretensões de substituir as medições de unidades amostrais no campo. Estes resultados não pretendem estimar com precisão o IP em função do IAF, senão apenas avaliar o seu uso para a espacialização da capacidade produtiva dos sítios, podendo ser gerados mapas de produtividade para a aplicação em diversos usos, tanto operacionais como de planejamento, inclusive para o inventário florestal (FOREST NUTRITION COOPERATIVE, 2007).

Desta maneira, considerou-se que a correlação obtida, ainda que baixa, é satisfatória, pois é estatisticamente significativa, levando em consideração que a avaliação foi realizada em talhões comerciais, com ampla variação de tipos de solos e espaçamentos.

4.3 Obtenção dos índices de vegetação a partir da imagem Landsat/OLI

As imagens índice de vegetação resultantes das operações matemáticas entre as bandas 4 e 5 do sensor OLI/Landsat 8 podem ser visualizadas nas Figuras 10, 11 e 12, respectivamente para Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice da Razão Simples (SRI) e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI).

Na Figura 10, pode-se observar que o NDVI variou entre -0,562 e 0,848, indicando setores com ausência de vegetação (iguais ou inferiores a zero) e setores com maior abundância de vegetação, respectivamente. Os contrastes são mais evidentes entre a ausência e presença da vegetação, não sendo tão clara a diferenciação entre setores com maior ou menor abundância de folhas.

Na Figura 11, pode-se observar maior contraste entre os setores, e os valores de SRI nos pixels variaram entre 0,28 e 12,16, respectivamente para maior ausência e maior presença de vegetação. Os contrastes são mais evidentes entre os setores com maior ou menor abundância de folhas.

O mapa de uso principal do solo no HFBN (obtido pelo cadastro da empresa), com a localização das áreas de preservação permanente e reserva legal

(APP/RL), estradas e aceiros, infraestrutura (Viveiro), recursos hídricos, pastagem, solo por plantar, plantios comerciais e outros usos de produção pode ser visualizado na Figura 13. Os plantios comerciais foram separados em plantios com idade menor ou igual a três anos e maiores que três anos, para posterior análise dos resultados da imagem IAF_{SR} .

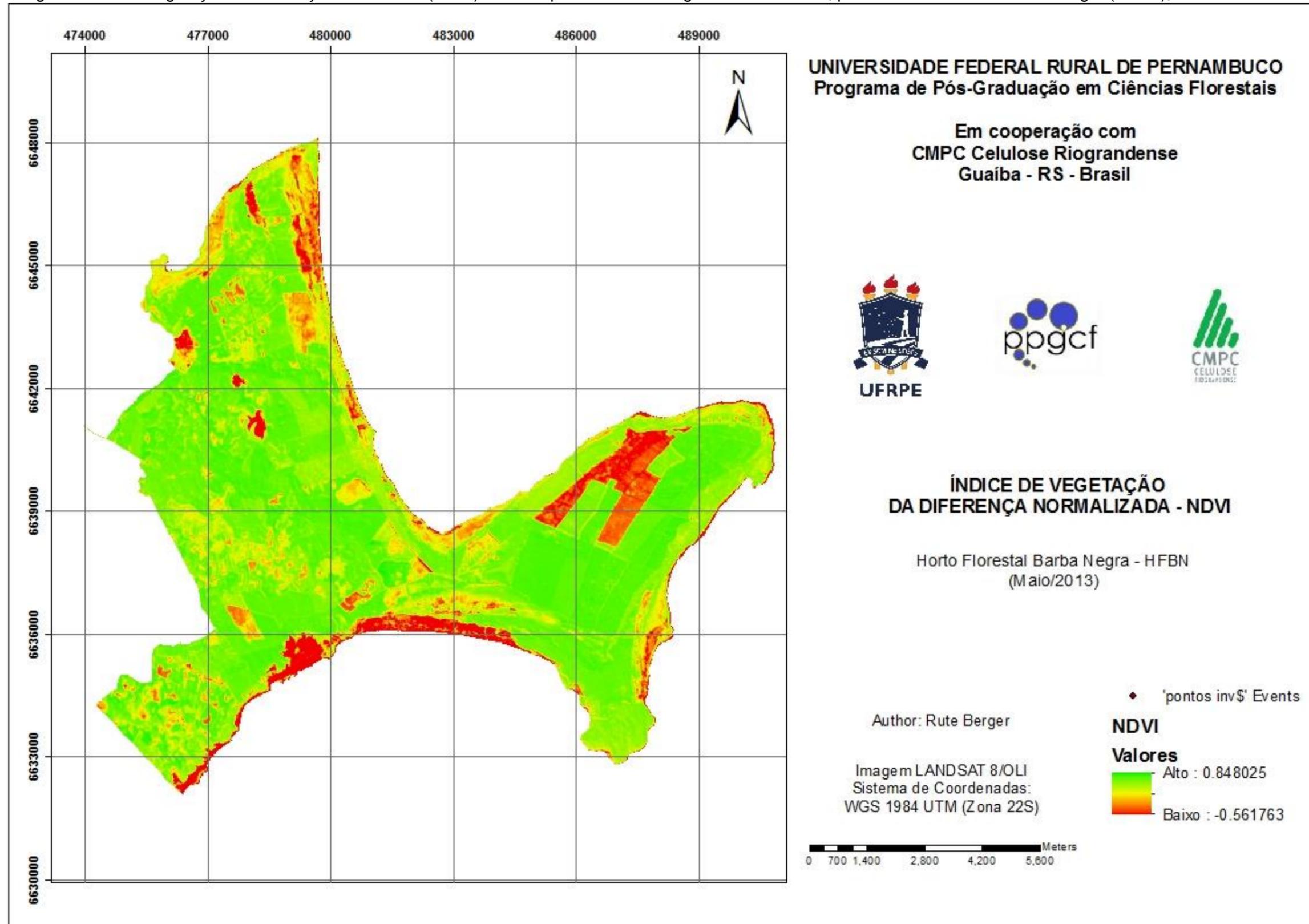
Na imagem SAVI (Figura 12), pode-se observar um baixo contraste entre os setores com ausência e com presença de vegetação, entretanto parece haver maior diferenciação entre setores com vegetação (ver mapa de uso do solo na Figura 13). Os valores dos pixels variaram entre -0,156 e 0,671.

Ao comparar as três imagens, observa-se que houve menor contraste entre os pixels de SAVI (Figura 12), em relação ao observado para os pixels de NDVI e SRI (Figuras 10 e 11, respectivamente). Apesar de SRI e NDVI estarem funcionalmente relacionados (MOREIRA, 2011), a imagem SRI (Figura 11) mostrou maior contraste entre os pixels, permitindo destacar visualmente as áreas de maior e de menor vigor da vegetação. A validade desta observação gráfica foi avaliada por meio de análise de regressão (item 4.4), na qual a relação entre o IAF e os IV de cada PPI foi avaliada.

A Figura 14 mostra a proporção de pixels no HFBN, segundo a classe de uso do solo.

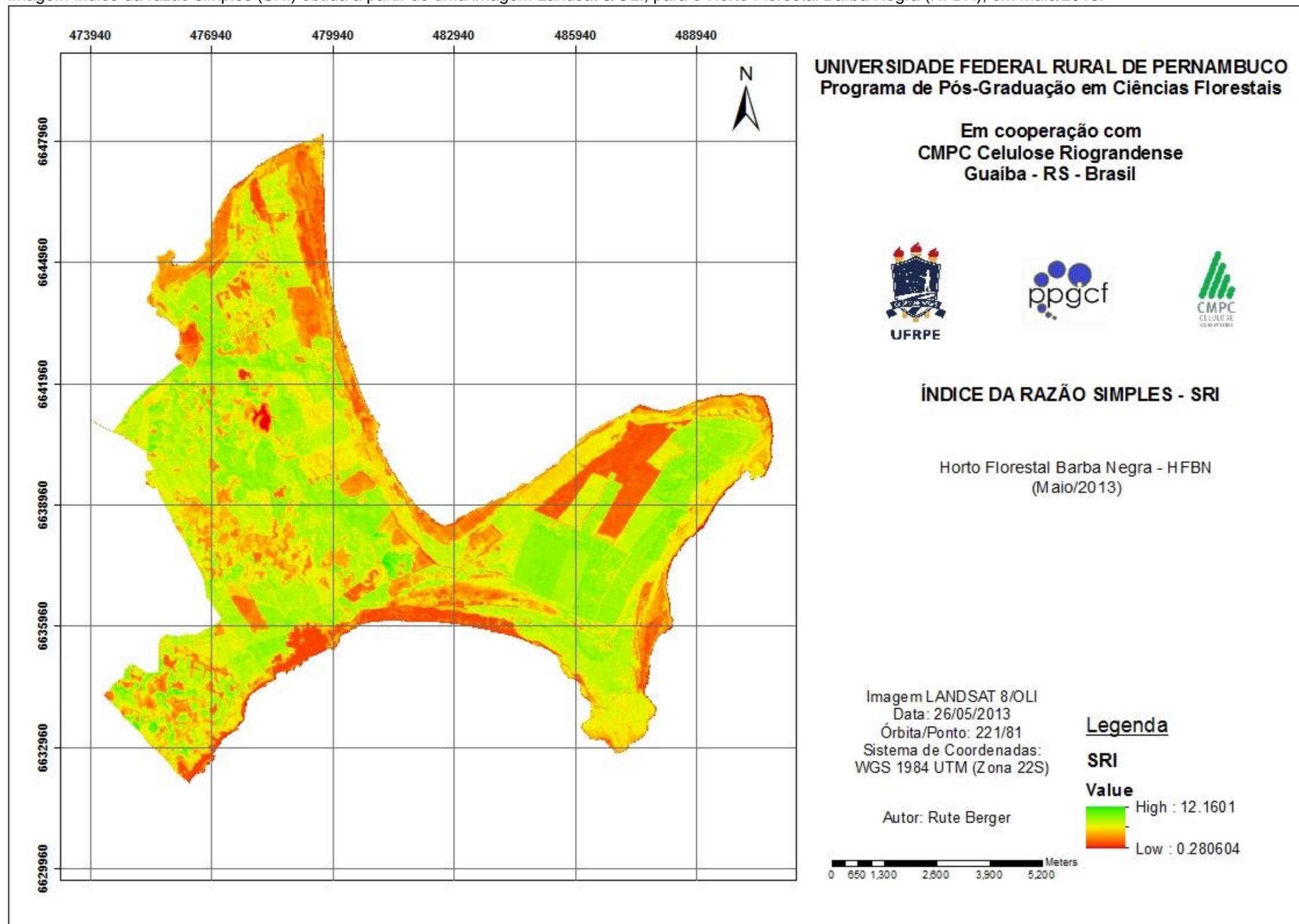
Na época da obtenção dos dados, aproximadamente 62% da superfície total do HFBN possuía plantios comerciais do gênero *Eucalyptus*, sendo que 6,5% aguardavam plantio. Outros 26% conformavam as áreas de preservação permanente (APP) e reserva legal (RL), e o restante era ocupado por outros usos de produção (2,2%), estradas e aceiros (1,7%), recursos hídricos (0,7%), infraestrutura e pastagens (0,2% cada). Cerca de 0,02% dos pixels da imagem não pertenciam à fazenda (maiores detalhes no item 4.5).

Figura 10 – Imagem índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) obtida a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para o Horto Florestal Barba Negra (HFBN), em maio/2013.



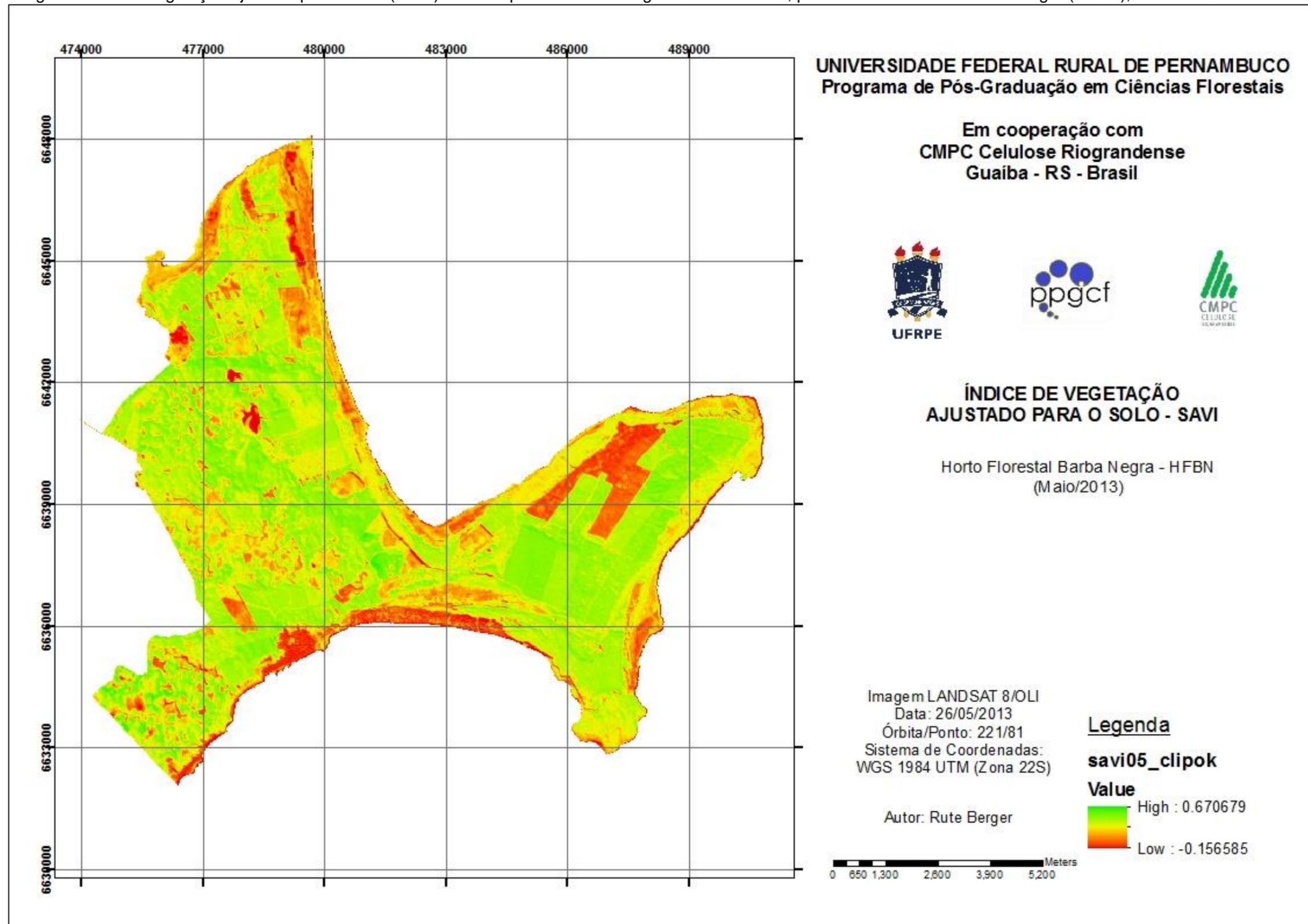
Fonte: Berger (2014).

Figura 11 – Imagem índice da razão simples (SRI) obtida a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para o Horto Florestal Barba Negra (HFBN), em maio/2013.



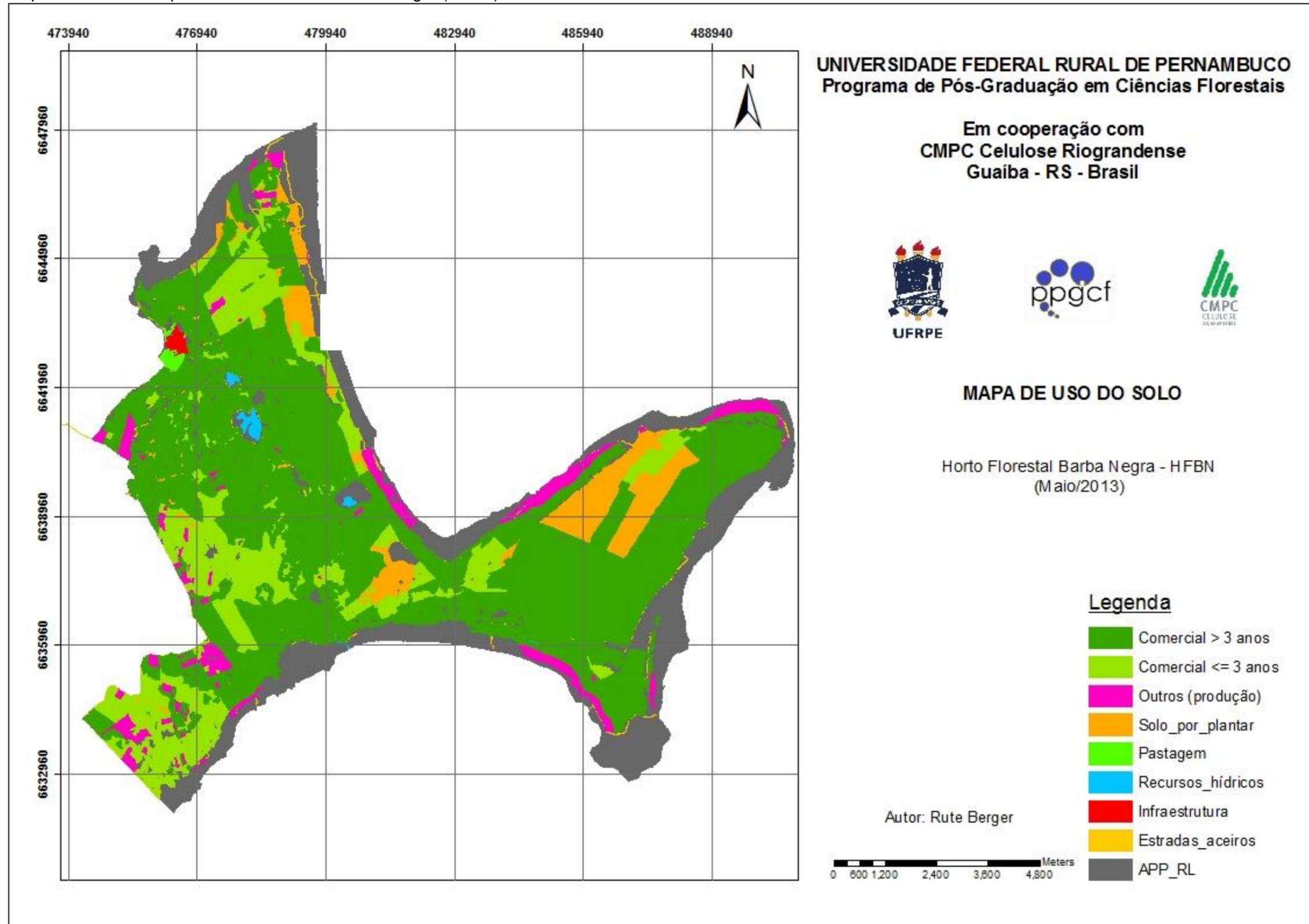
Fonte: Berger (2014).

Figura 12 – Imagem índice de vegetação ajustado para o solo (SAVI) obtida a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para o Horto Florestal Barba Negra (HFBN), em maio/2013.



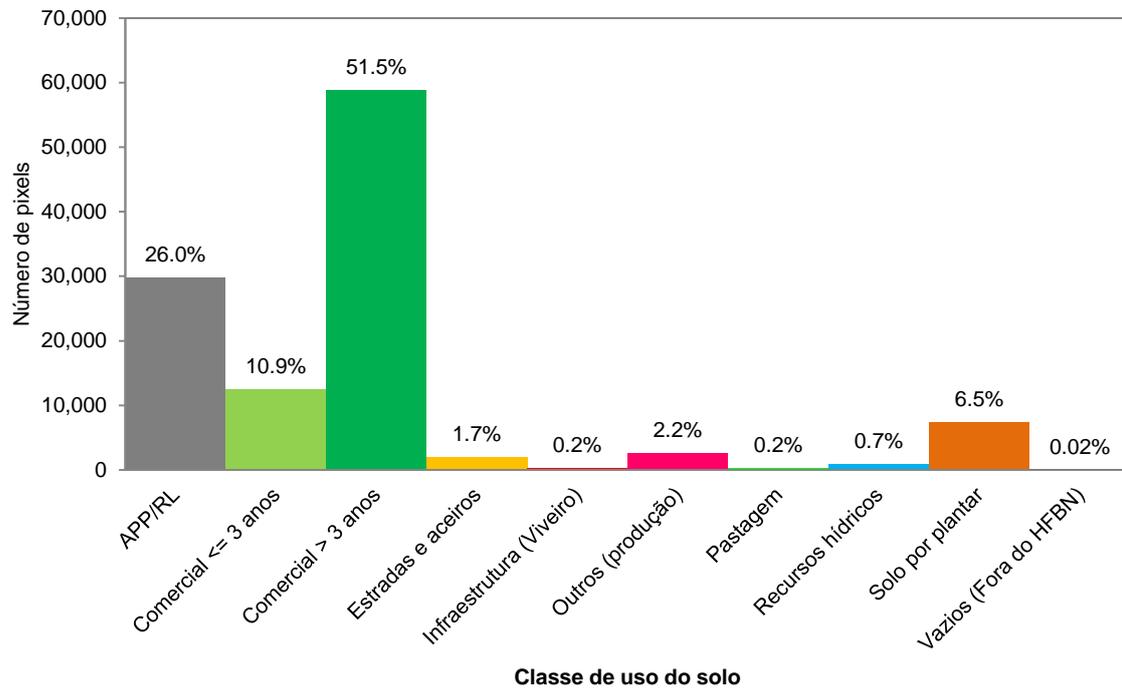
Fonte: Berger, 2014.

Figura 13 – Mapa de uso do solo para o Horto Florestal Barba Negra (HFBN).



Fonte: Berger, 2014.

Figura 14 – Distribuição de pixels segundo a classe de uso do solo no horto florestal Barba Negra (HFBN).



Fonte: Berger, 2014.

4.4 Índice de Área Foliar em função dos índices de vegetação

Os pares de dados das 40 parcelas de IAF_{campo} e os IV correspondentes, obtidos da imagem Landsat/OLI, foram utilizados para ajustar os modelos de regressão linear simples (Tabela 9).

Tabela 9 - Estatísticas e parâmetros de regressão para estimar o índice de área foliar (IAF) em função de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice da Razão Simples (SRI) e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI).

Equação	Índice de Vegetação (variável independente)	Parâmetros do modelo*	Coefficientes	Prob>F	R ² %	S _{yx} %
1	NDVI	β_0 β_1	-32.2073 44.1954	9.54E-11	66.3	16.2
2	SRI	β_0 β_1	-5.6159 0.9716	6.78E-11	67.8	12.5
3	SAVI	β_0 β_1	-3.7866 18.2500	5.58E-05	35.1	17.8

Fonte: Berger, 2014.

* $IAF = \beta_0 + \beta_1 \cdot IV + \epsilon_i$; Prob>F=valor de significância; R²%= Coeficiente de Determinação, em percentagem; S_{yx}%=Erro padrão da estimativa, em percentagem.

Os resultados mostram que o melhor ajuste foi obtido quando utilizado o SRI como variável independente para estimar o IAF (Tabela 9). A variação total explicada pela regressão, expressa pelo R^2 , foi de 67,8% para a equação 2 (Tabela 9). Esta equação também resultou na menor dispersão percentual entre os dados observados e estimados pela regressão ($S_{yx}\%$), com 12,5%.

Law e Waring (1994) também encontraram melhores estatísticas de R^2 ao estimar o IAF de duas formações florestais no estado do Oregon-EUA, utilizando o SRI (86% e 74%). Forest Nutrition Cooperative (2007) encontraram um $R^2=31\%$ ao ajustar um modelo para estimar o IAF por SRI em plantios homogêneos de *Pinus radiata*. Um ajuste adicional foi realizado para talhões com mais de 1.000 árvores por hectare, sendo encontrado um valor de $R^2=57\%$. Flores (2003) encontrou uma forte relação entre IAF e SRI, com $R^2=94\%$ e erro padrão da estimativa de 14% de um experimento de *Pinus taeda* L. na Carolina do Norte.

A utilização do SAVI como variável independente para estimar IAF resultou em baixo R^2 (35,1%) e alto $S_{yx}\%$ (17,8%) (Equação 3, Tabela 9). Apesar da significância do coeficiente angular β_1 (Prob>F = 5.58E-05), esta equação apresentou o pior desempenho quando comparada às demais equações. Este resultado diverge daquele encontrado por Xavier et al. (1998), que obtiveram um R^2 de 69,4% ao utilizar uma equação linear simples para estimar o IAF de plantios clonais de *Eucalyptus* spp. em função do SAVI, que resultou ser a melhor variável independente quando comparada com o NDVI e algumas imagens proporção (componentes principais). Colombo et al. (2003) tampouco encontraram melhoras pela introdução da constante que teoricamente minimiza os efeitos do solo, quando comparada a outros IV de diversos tipos de vegetação). Bulcock e Jewitt (2010) obtiveram baixo R^2 ao ajustarem modelos de predição de IAF em função de SAVI e NDVI (0,46 e 0,39, respectivamente).

A equação 1 (Tabela 9) mostrou que o NDVI gerou um bom ajuste de regressão ($R^2=66,3\%$), ligeiramente inferior ao SRI. Entretanto, o $S_{yx}\%$ mostrou maior dispersão entre os dados observados e estimados (16,2%). Fan et al. (2009) encontraram $R^2=79,0\%$ ao usar equações lineares simples para estimar IAF a partir do NDVI de pastagens da região de semiárido (condição mais adequada para esse IV, segundo os autores) na Mongólia. Colombo et al. (2003) obtiveram melhores ajustes na estimativa de IAF ao utilizar a informação de textura em diferentes formações vegetais, entretanto o menor ganho foi observado para plantios de álamo

e o maior foi para formações florestais nativas (explicada pela distribuição não uniforme das árvores). Hernández et al. (2014), sugerem o uso e aperfeiçoamento de modelos híbridos ou de inteligência artificial para melhorar as previsões de IAF em larga escala.

Le Maire et al. (2011), ao testarem diferentes IV do sensor MODIS para estimar IAF de plantios clonais, obtiveram R^2 de 0,58, 0,58, 0,60 e 0,62, respectivamente para SRI, NDVI, SAVI e índice de vegetação generalizado ajustado para o solo (GESAVI).

Chen e Cihlar (1996) comentam que a alta dispersão dos dados nas estimativas de IAF por IV normalmente é encontrada quando os pixels das imagens incluem uma combinação de reflectâncias originadas de diferentes tipos de vegetação. Esta observação alerta para os cuidados necessários em relação à presença de vegetação de sub-bosque nos povoamentos analisados.

Salvador e Pons (1998) comentam que os erros podem ser explicados pela relação entre a intensidade de amostragem e a extensão da área avaliada. Nesses casos, os autores sugerem que os modelos ajustados por um grande número de amostras poderiam ter mais chances de incorporar causas de variação não controladas, tais como solos, clima, manejo, sub-bosque, entre outros, interferindo nas respostas espectrais de cada amostra.

Nas Figuras 15a, 16a e 17a pode ser observada a relação gráfica entre IAF e NDVI, SRI e SAVI, respectivamente. Todas as equações da Tabela 9 mostraram tendência em sobrestimar o IAF para valores inferiores a dois (Figuras 15b, 16b e 17b). Subestimativas de IAF foram observadas para valores de IAF superiores a 3,5 para NDVI e SRI, e superiores a três para SAVI. A equação ajustada por Flores (2003) subestimou os valores observados de IAF, o que foi justificado em parte pela presença de folhas mortas, que na verdade levariam a uma sobrestimativa do IAF medido no campo com o LAI-2000. Arias, Calvo-Alvarado e Dohrenbusch (2007) concluíram que as subestimativas ou sobrestimativas de IAF_{campo} obtidas com o LAI-2000 dependem da arquitetura de copa e da distribuição da espécie.

A análise realizada por idade resultou em algumas diferenças de desempenho dos IV avaliados (Tabela 10), em relação ao modelo geral que incluiu todas as medições (Tabela 9).

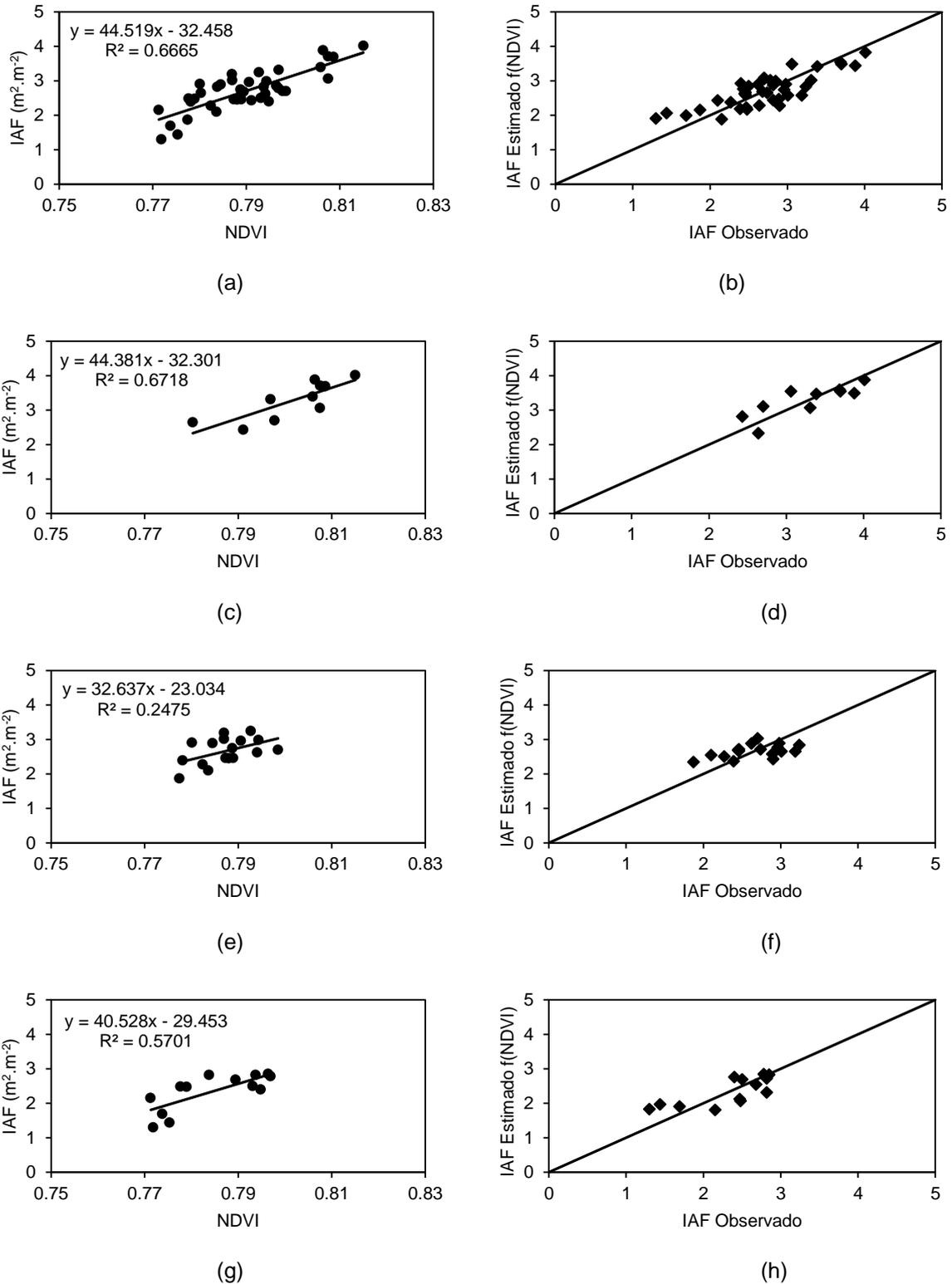
Tabela 10 - Estatísticas e parâmetros de regressão para o índice de área foliar (IAF) em função de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice da Razão Simples (SRI) e Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI), em diferentes idades.

Índice de Vegetação (variável independente)	Equação	Idade	Parâmetros do modelo*	Coefficientes	Prob>F	R ² %	S _{yx} %
NDVI	1	3	β_0 β_1	-32.3006 44.3809	0.004	67.2	10.3
	2	5	β_0 β_1	-23.0336 32.6372	0.042	24.7	12.9
	3	6-8	β_0 β_1	-29.4532 40.5279	0.003	57.0	15.7
SRI	4	3	β_0 β_1	-5.68816 0.98086	0.002	70.9	9.7
	5	5	β_0 β_1	-3.81335 0.76816	0.035	26.2	12.7
	6	6-8	β_0 β_1	-5.44301 0.93592	0.003	56.8	15.7
SAVI	7	3	β_0 β_1	-2.33423 15.35661	0.023	49.5	12.7
	8	5	β_0 β_1	-0.83999 9.9894	0.173	12.0	13.9
	9	6-8	β_0 β_1	-4.6714 19.6933	0.008	48.7	17.1

* IAF= $\beta_0 + \beta_1 \cdot IV + \varepsilon_i$; Prob>F=valor de significância; R²%= Coeficiente de Determinação, em percentagem; S_{yx}%=Erro padrão da estimativa, em percentagem.
Fonte: Berger, 2014.

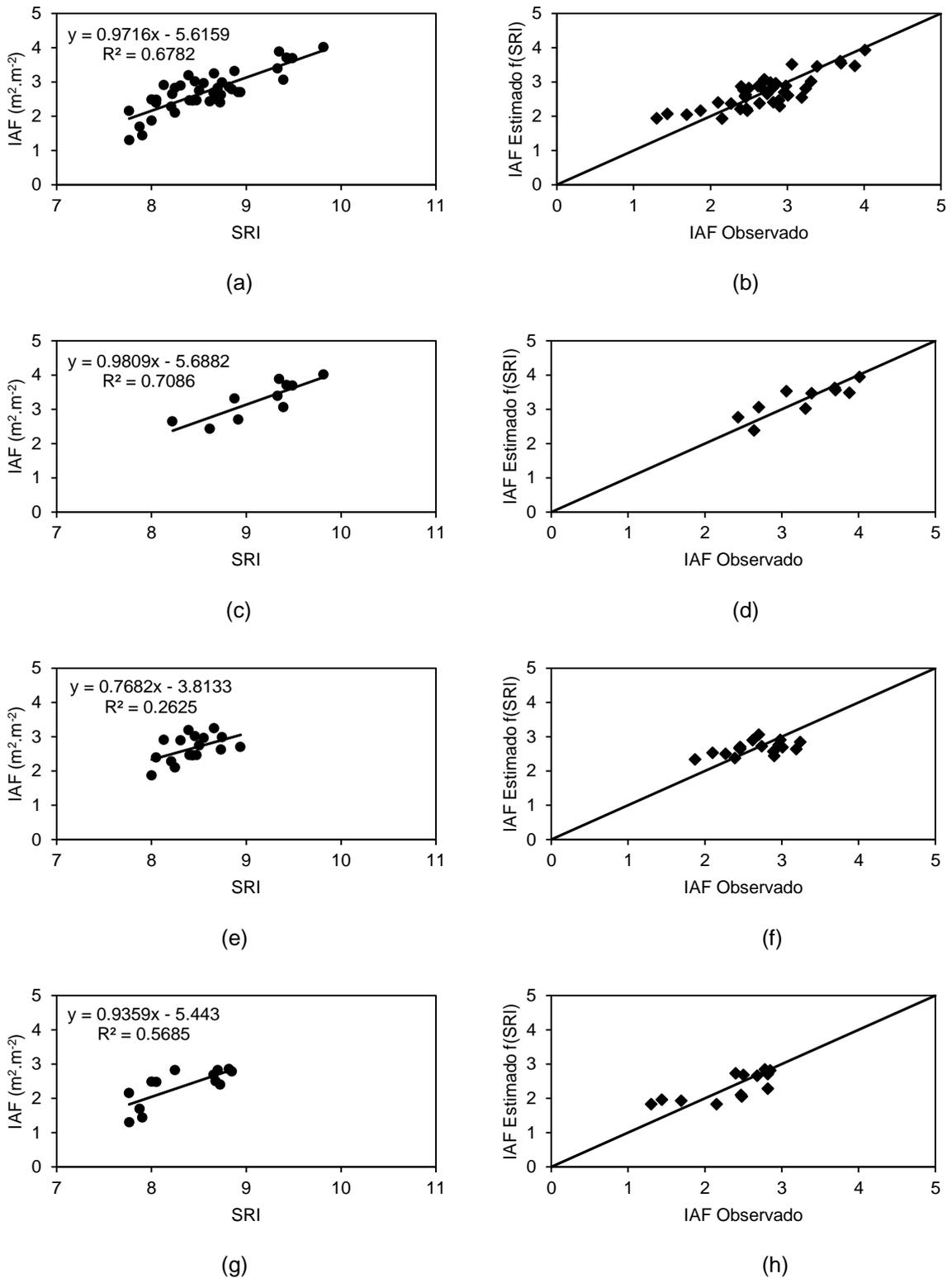
Em todas as idades analisadas o SRI mostrou melhor desempenho quando comparado aos demais IV, com exceção de ligeira superioridade do coeficiente de determinação (R²%=57,0%) obtido com NDVI nas idades de seis e oito anos (Equação 3, Tabela 10). Aos três anos (Tabela 10), todas as equações mostraram melhor desempenho em R²% e S_{yx}% do que a respectiva análise geral (Tabela 9). Entretanto, aos cinco anos todas as equações mostraram pior desempenho em R²% e melhor dispersão entre os dados observados e estimados (S_{yx}%) em relação à equação geral por IV, à exceção do SRI que apresentou S_{yx}% ligeiramente superior (12,7%). Nas Figuras 15 a 17 podem ser observadas as relações entre o IAF e o NDVI, SRI e SAVI, e o IAF observado e estimado, respectivamente, para as idades de três (c, d), cinco (e, f) e seis-oito (g, h) anos de idade.

Figura 15 – Relação entre o índice de área foliar observado no campo (IAF_{campo}) e o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), obtido a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para todas as idades avaliadas (a) e para três, cinco e seis-oito anos (c, e, g). Dados observados e estimados de IAF para todas as idades avaliadas (b) e para três, cinco e seis-oito anos (d, f, h).



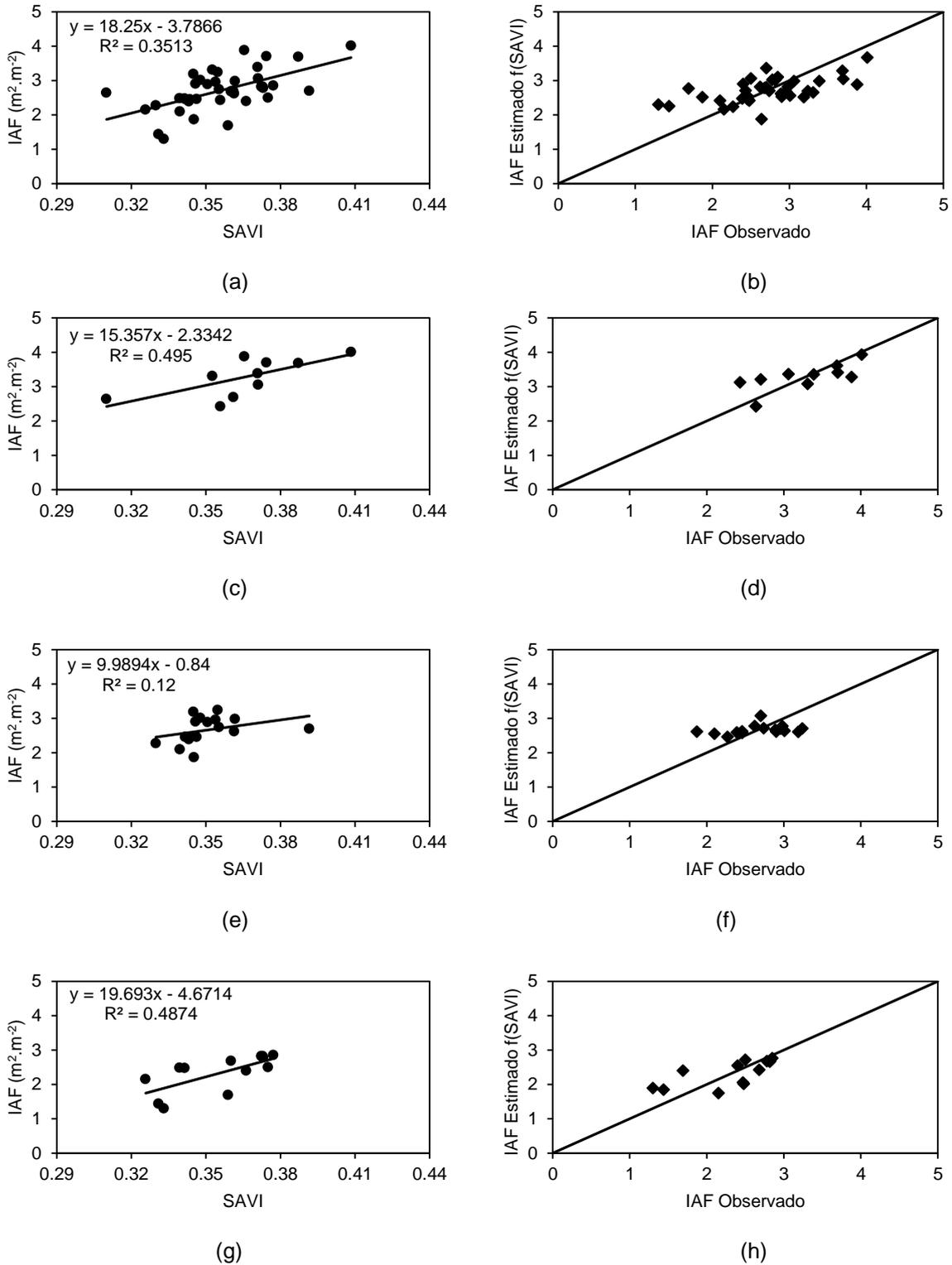
Fonte: Berger, 2014.

Figura 16 – (a) Relação entre o índice de área foliar observado no campo (IAF_{campo}) e o índice da razão simples (SRI), obtido a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para todas as idades avaliadas (a) e para três, cinco e seis-oito anos (c, e, g). Dados observados e estimados de IAF para todas as idades avaliadas (b) e para três, cinco e seis-oito anos (d, f, h).



Fonte: Berger, 2014.

Figura 17 – (a) Relação entre o índice de área foliar observado no campo (IAF_{campo}) e o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI), obtido a partir de uma imagem Landsat 8/OLI, para todas as idades avaliadas (a) e para três, cinco e seis-oito anos (c, e, g). Dados observados e estimados de IAF para todas as idades avaliadas (b) e para três, cinco e seis-oito anos (d, f, h).



Fonte: Berger, 2014.

As Figuras 15c, 16c e 17c mostram a relação do IAF e o NDVI, SRI e SAVI aos três anos de idade, respectivamente. A equação para NDVI mostrou leve tendência em subestimar o IAF a partir de valores superiores a 3,5 (Figura 15d). Essa mesma tendência também pode ser observada para SRI e SAVI, porém de maneira mais sutil (Figuras 16d e 17d).

Aos cinco anos, a equação ajustada para IAF em função de NDVI (Figura 15e) resultou em leve tendência de superestimar valores inferiores a 2,4 e subestimar valores superiores a 2,9 (Figura 15f). Esse mesmo comportamento foi observado para IAF estimado por SRI (Figuras 16e, 16f). Para IAF em função de SAVI a equação ajustada (Figura 17e) mostrou-se tendenciosa para valores inferiores e superiores a 2,7 (Figura 17f).

Todas as equações ajustadas para as idades de seis e oito anos (Figuras 15g, 16g e 17g) mostraram tendência em superestimar valores de IAF inferiores a dois (Figuras 15h, 16h e 17h).

As características da vegetação analisada podem explicar as diferenças entre os resultados encontrados para cada IV e idade. O NDVI é apontado na literatura como um índice mais sensível para condições de baixa biomassa tais como pastagens, biomas áridos ou semiáridos, e plantios com menores valores de IAF. Além disso, pode sofrer a influência de pontos de saturação nas condições de biomassa abundante, tais como as florestas, não caracterizando adequadamente a condição da vegetação (JENSEN, 2011; PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

O SRI, por sua vez, é altamente sensível às variações de biomassa para formações florestais (JENSEN, 2011) e pouco adequado para formações de baixa produção de biomassa (JACKSON; HUETE, 1991).

Huete, Jackson e Post (1985) analisaram a sensibilidade dos IV em relação ao solo e verificaram que essa é maior em dosséis com nível de cobertura médio. O SAVI, que introduz uma constante para minimizar esse efeito no valor final do IV, tem sido utilizado para diminuir esse ruído em condições de vegetação com cobertura média (JENSEN, 2011).

Houborg, Anderson e Daughtry (2009) consideram os modelos lineares (empíricos) como generalistas e propuseram um modelo baseado em processos (parâmetros biofísicos) para estimar o IAF por SRI, encontrando erros de 10% (sensor com 1m de resolução) e de 13% (imagem SPOT, com 10m de resolução).

Por outro lado, Flores et al. (2006) encontraram erros semelhantes (14%) ajustando uma equação linear simples.

Apesar de ser considerada como modelo empírico, a relação linear simples entre o IAF e os índices de vegetação obtidos pela relação entre as reflectâncias das bandas espectrais dos sensores pode ser considerada como uma relação biofísica, diferentemente de outras relações empíricas, tais como a estimativa de parâmetros biométricos em função do tempo.

As folhas são os elementos que prioritariamente regem a fotossíntese, responsável pelo acúmulo de biomassa. Se as folhas são afetadas de alguma maneira pela disponibilidade de água, nutrientes ou por presença de pragas e doenças, entre outros, esses fatores também modificam o acúmulo de biomassa e o seu comportamento espectral se modifica (ALBAUGH et al., 1998; CANNELL, 1989). Neste sentido, a propriedade dos sensores remotos em medir as respostas espectrais das folhas poderia gerar em uma relação direta entre ambas, que pode ser explicada de maneira simples e rápida.

Por outro lado, o ajuste de modelos não lineares poderia contribuir para evitar efeitos indesejáveis e pouco realistas das estimativas de IAF_{SR} , principalmente em condições que fogem da amplitude de dados observada

Diante da pouca significativa melhora nos modelos ajustados especificamente para as diferentes idades avaliadas, optou-se por utilizar uma equação geral, cujas estatísticas apresentaram o melhor desempenho. Neste sentido, a equação 2 (Tabela 9) foi selecionada para estimar IAF em função de SRI.

$$IAF = -5.6159 + 0.9716 \cdot SRI \quad (7)$$

Em que:

IAF = Índice de área foliar

SRI = Índice da razão simples, obtido da imagem Landsat 8/OLI.

4.5 Análise da imagem IAF

A imagem IAF (Figura 18) resultante da aplicação da operação de aritmética de bandas do software ArcGIS, utilizando a expressão 7 (item 4.4), mostra um panorama geral do comportamento do IAF estimado por sensoriamento remoto (IAF_{SR}) em toda a extensão do HFBN, para todos os tipos de uso do solo.

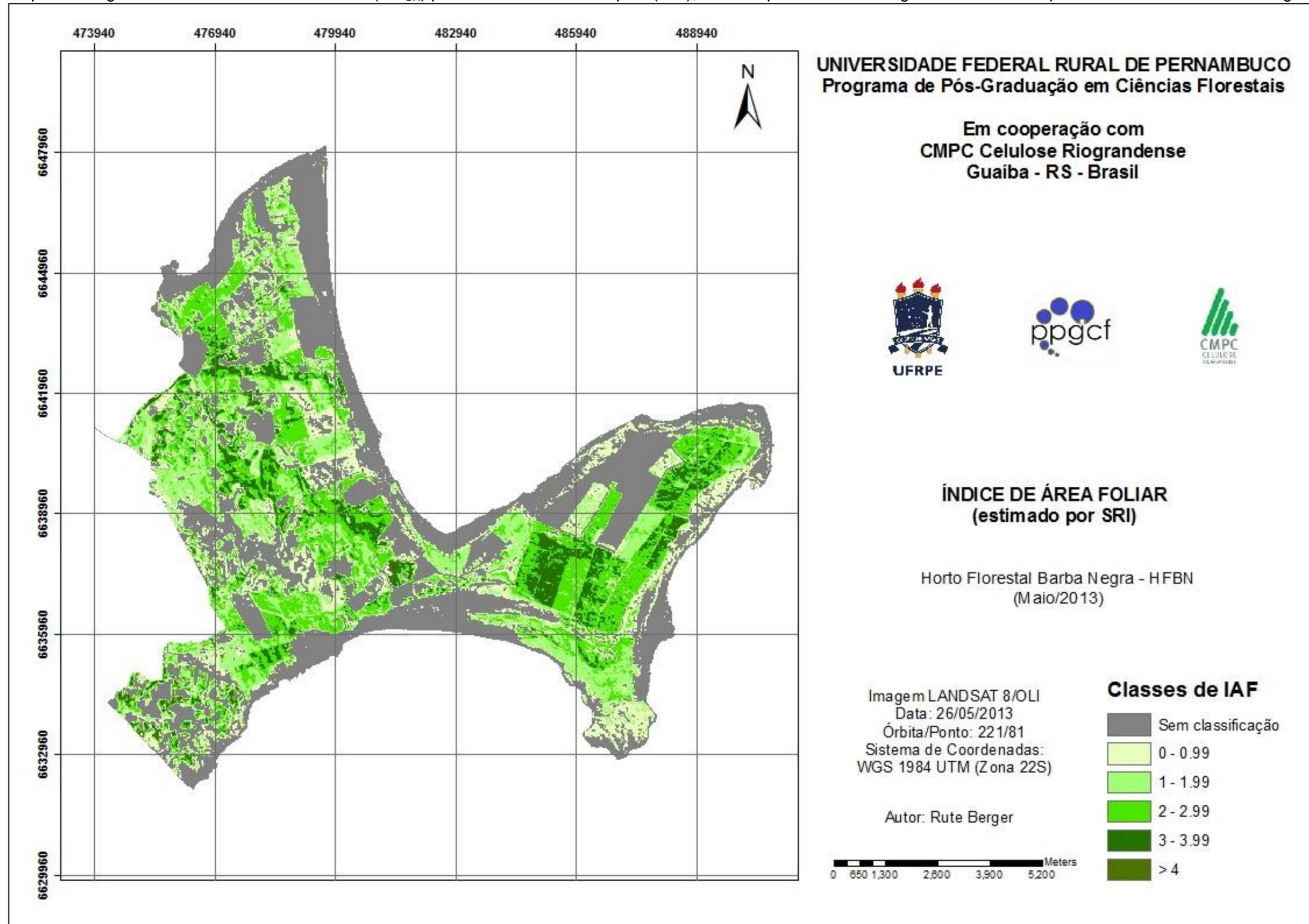
Na Figura 18 podem ser observadas regiões (pixels) sem classificação, cujo IAF_{SR} resultou ser inferior a zero, e regiões (pixels) com valores positivos de IAF_{SR} (variando entre $>zero$ e >4), podendo ser visualizado um bom contraste entre setores com maior e menor IAF_{SR} . Os valores IAF_{SR} negativo ($IAF < 0$) podem ter sido ocasionados por várias características inerentes aos pixels, em maior ou menor proporção (mistura espectral), tais como influência dos solos, interferência atmosférica, propriedades espectrais dos alvos (que não são necessariamente vegetação) ou outros.

A classificação de pixels e área total correspondente (ha) segundo a classe de uso do solo e IAF_{SR} no HFBN pode ser observada na Tabela 11. Nessa tabela é possível verificar a exatidão dos resultados das somatórias de pixels em relação aos valores nominais das classes de uso do solo correspondentes (segundo a classificação de uso do solo da empresa). As diferenças variaram entre +2,07% (recursos hídricos) e -1,59% (estradas e aceiros), com um erro geral de apenas 0,0009%.

Cerca de 40% da superfície total do HFBN foi classificada com $IAF < 0$, e o restante da área aparece com valores iguais ou superiores a zero (Figura 19). Desses, aproximadamente 37% foram classificados com IAF_{SR} entre 1 e 3,99.

Na análise das respostas de IAF_{SR} dos diferentes usos do solo do HFBN (conforme os dados cadastrais da empresa), aproximadamente 50% da classe de $IAF < 0$ correspondem às áreas de preservação permanente (APP) e reserva legal (RL) (Figura 20). Essas áreas incluem, além de superfícies com vegetação (que provavelmente foram incluídas nas demais classes de IAF_{SR}), a presença de dunas e praias de areia, áreas alagáveis, entre outros, o que poderia explicar os valores negativos de IAF_{SR} .

Figura 18 – Mapa da imagem índice de área foliar estimado (IAF_{SR}) pelo índice da razão simples (SRI), obtida a partir de uma imagem Landsat 8/OLI para o horto florestal Barba Negra (HFBN).



Fonte: Berger, 2014.

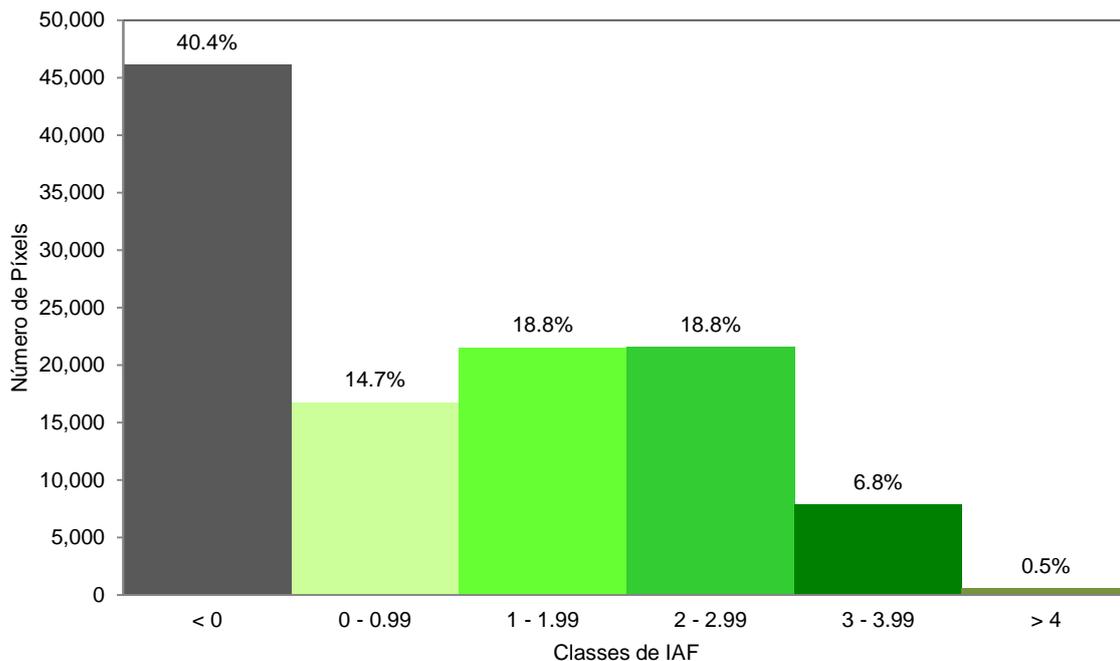
Tabela 11 – Classificação de pixels e área correspondente (ha) segundo a classe de uso do solo e IAF_{SR} no horto florestal Barba Negra (HFBN).

Uso do Solo	Classe de IAF _{SR}						Total (pixels)	Total cadastro (ha)*	%
	<0	0 – 0.99	1 – 1.99	2 – 2.99	3 – 3.99	>= 4			
APP/RL**	22671 (76.3)	4499 (15.1)	1854 (6.2)	603 (2.0)	97 (0.3)	6 (0.1)	29730	2674.57	100.04%
Comercial <= 3 anos	7861 (63.2)	1702 (13.7)	1526 (12.3)	1011 (8.1)	299 (2.4)	38 (0.3)	12437	1120.79	100.92%
Comercial > 3 anos	8067 (13.7)	8035 (13.7)	16049 (27.3)	19197 (32.6)	7127 (12.1)	345 (0.6)	58820	5292.87	99.79%
Infraestrutura (Viveiro)	239 (100)						239	21.81	98.62%
Outros (produção)	595 (23.2)	972 (38.0)	813 (31.7)	150 (5.9)	30 (1.1)	1 (0.1)	2561	228.58	100.84%
Recursos hídricos	634 (74.3)	96 (11.3)	74 (8.7)	45 (5.3)	3 (0.3)	1 (0.1)	853	75.21	102.07%
Estradas e aceiros	753 (39.4)	384 (20.1)	405 (21.2)	285 (14.9)	84 (4.3)	2 (0.1)	1913	174.95	98.41%
Solo por plantar	5048 (68.2)	1068 (14.4)	740 (10.0)	225 (3.0)	180 (2.4)	139 (2.0)	7400	666.97	99.85%
Vazias	18 (95)	1 (5)					19	0	0.00%
Pastagem	197 (99)	3 (1)					200	18.11	99.39%
Total Geral	46083	16760	21461	21516	7820	532	114172	10273.86	100.02%
% da Área	40.36	14.68	18.80	18.85	6.85	0.47			0.0009%

Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR}= índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto; APP = Área de Preservação Permanente; RL = Reserva Legal; * Valores correspondentes ao uso do solo em Abril/2013; ** Incluem áreas de plantio avançado. Valores em percentagem na coluna correspondem à exatidão da somatória de pixels de 30 x 30 m em relação à área nominal de cada classe de uso, e nas células correspondem à proporção (%) em relação ao total de pixels de cada classe de uso.

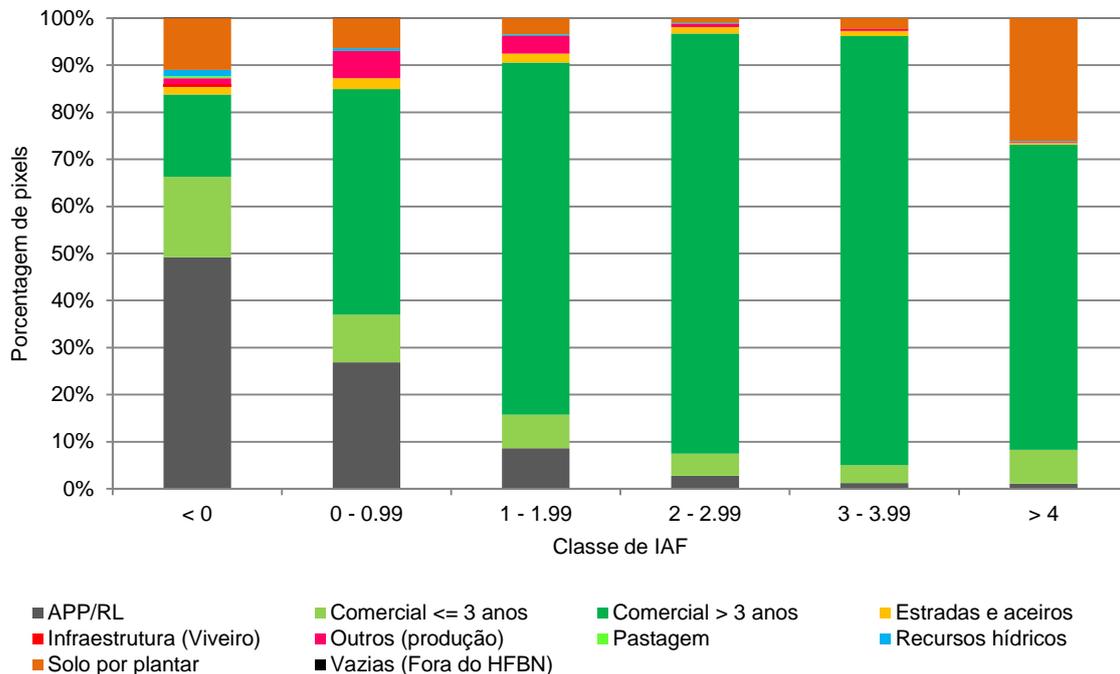
Figura 19 – Distribuição dos pixels por classe de IAF_{SR} para o horto florestal Barba Negra (HFBN).



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR}= índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto

Figura 20 – Classificação de pixels segundo a classe de IAF_{SR} e uso do solo no horto florestal Barba Negra (HFBN).



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto

Outros 33% da classe $IAF < 0$ correspondem a áreas com plantios comerciais. Aproximadamente a metade desses plantios era de idades inferiores aos três anos, onde a vegetação ainda pode ser esparsa (sem cobertura do solo), e que podem estar influenciados pela falta de ajuste da equação para estimar o IAF_{SR} nessas idades ou espécies/clones diferentes (somente foram considerados plantios de um clone, com idade maior ou igual a três anos). A outra metade corresponde aos plantios comerciais com idades superiores aos três anos, que poderiam estar influenciados por algumas situações principais: (a) mistura espectral e influência de pixels vizinhos no interior do talhão, tais como estradas, talhões de idades inferiores ou menos produtivos; (b) características da imagem e BRDF, tais como a geometria de visada do sensor, ângulo zenital solar, horário de tomada da imagem, interferência atmosférica (o que pode ter ocasionado a reflectância negativa em alguns pixels - ver exemplo na Figura 21 (PONZONI, 2001) e; (c) características dos plantios, tais como azimute de fileiras e altura das árvores, e da espécie (disposição vertical ou horizontal das folhas), cuja conjunção com os ângulos da fonte de iluminação pode influenciar a reflectância espectral (PONZONI, 2001).

A área restante na classe de $IAF < 0$ (27%) é composta por infraestrutura (viveiro), estradas e aceiros, área de pastagem, recursos hídricos (lagos, canais de drenagem e banhados), outros usos de produção (pesquisa e área de produção de sementes) e solo por plantar, que apresentam comportamento espectral diferente da vegetação ou poderiam resultar da falta de ajuste da equação. Além disto, a classe inclui alguns pixels classificados como “vazios”, que foram incorporados à base de valores de IAF_{SR} por pixels extraída do ArcGIS, porém sua área total corresponde justamente à diferença encontrada entre a área nominal do HFBN (cadastro da empresa) e o número total de pixels convertidos em área (Tabela 13), que foi de 1,71 ha, perfazendo um erro de estimativa de área inferior a 0,00009%, considerado não significativo. A inclusão desses pixels na base provavelmente se deve à metodologia do software, o qual extrai todos os pixels cujo centro se localiza dentro dos talhões do arquivo *shape* utilizado.

Para valores de IAF_{SR} superiores a zero, observa-se na Figura 20 o aumento da participação dos plantios comerciais maiores que três anos, principalmente nas classes de 2 – 2,99 e de 3 – 3,99.

Na classe de IAF 0 – 0,99 um pouco mais de 25% da superfície corresponde às áreas de APP e RL e outros 10% correspondem aos plantios comerciais de idade inferior aos três anos, cuja vegetação poderia estar presente em baixa intensidade ou vigor. Entretanto, conforme comentado anteriormente, os erros da equação também poderiam influenciar nesses resultados. Cerca de 50% dos pixels classificados corresponde aos plantios de idade superior aos três anos, que variam em idade, material genético, espaçamento, tipos de solo e regime de manejo, o que poderia explicar o baixo vigor em termos de IAF_{SR} . Os 15% restantes correspondem estradas e aceiros (que podem estar influenciados por pixels vizinhos), recursos hídricos (lagos, canais de drenagem e banhados, cuja presença de algas poderia refletir no infravermelho próximo), outros usos de produção (pesquisa e área de produção de sementes) e solo por plantar, o qual pode conter vegetação de regeneração natural, brotações de *Eucalyptus* spp. e/ou ervas daninhas.

Cerca de 75% dos pixels classificados com IAF entre 1 - 1,99 correspondem aos plantios comerciais com idades superiores aos três anos. Os outros 25% correspondem às APP e áreas de RL, bem como estradas e aceiros, recursos hídricos, outros usos de produção e solo por plantar, cujos motivos para aparecerem

nesta classe podem ser os mesmos apresentados para a classe de IAF anterior, apenas com mais vigor.

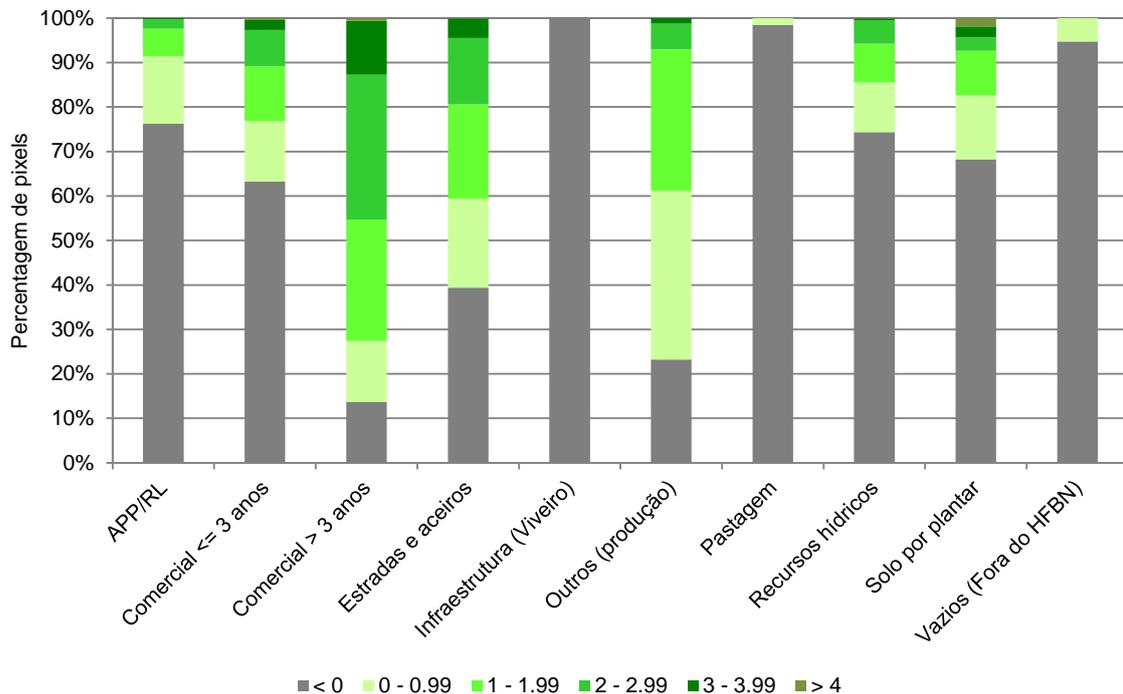
As classes de IAF entre 2 – 2,99 e entre 3 – 3,99 são maioritariamente (90%) compostas por plantios comerciais de idades superiores aos três anos. As APP, RL, estradas e aceiros, recursos hídricos, outros usos de produção e solo por plantar compõem os 10% de pixels restantes desta classe, o que também poderia ser explicado pelas razões anteriormente expostas. Estes resultados são consistentes quando comparados aos valores médios obtidos na medição do IAF no campo (item 4.1), e permitem inferir que a ferramenta utilizada para estimar o IAF_{SR} em grandes extensões é adequada.

Na classe de $IAF > 4$, cerca de 65% da superfície é de plantios comerciais com idades superiores aos três anos. É interessante observar que o restante dos pixels (35%) corresponde a áreas de plantio comercial com idades inferiores aos três anos e áreas com solo por plantar (aguardando reforma ou condução de rebrota). Essas áreas podem estar influenciadas pela proximidade de algumas áreas à idade de maior IAF_{SR} (próxima aos três anos, conforme comentado anteriormente), e também pela influência de vegetação de sub-bosque. É importante considerar que estes pixels não necessariamente estão agrupados e correspondem a menos de 0,5% do total de pixels (Figura 19).

Sob uma ótica distinta, a Figura 21 mostra a proporção de cada classe de IAF por uso do solo no HFBN.

Cerca de 76% das áreas caracterizadas pelo uso do solo em área de preservação permanente (APP) e reserva legal (RL) foram classificadas com valores de IAF menores que zero. Segundo as informações do cadastro de uso de solo, essas áreas correspondem a banhados, campos úmidos, áreas de florestas nativas (em diversos estágios de formação) e vegetação de Restinga, o que sugere coerência nos resultados de IAF_{SR} , principalmente porque o modelo está ajustado somente para um clone de *Eucalyptus saligna* Smith, e pode não ser capaz de estimar com precisão os valores de IAF_{SR} para essas áreas. De qualquer maneira, 24% dessas áreas obtiveram valores de IAF superiores a zero, sendo que essa classificação deve ser considerada com cautela, pelos motivos anteriormente expostos.

Figura 21 – Classificação de pixels segundo a classe de uso do solo e IAF_{SR} no horto florestal Barba Negra (HFBN)..



Fonte: Berger, 2014.

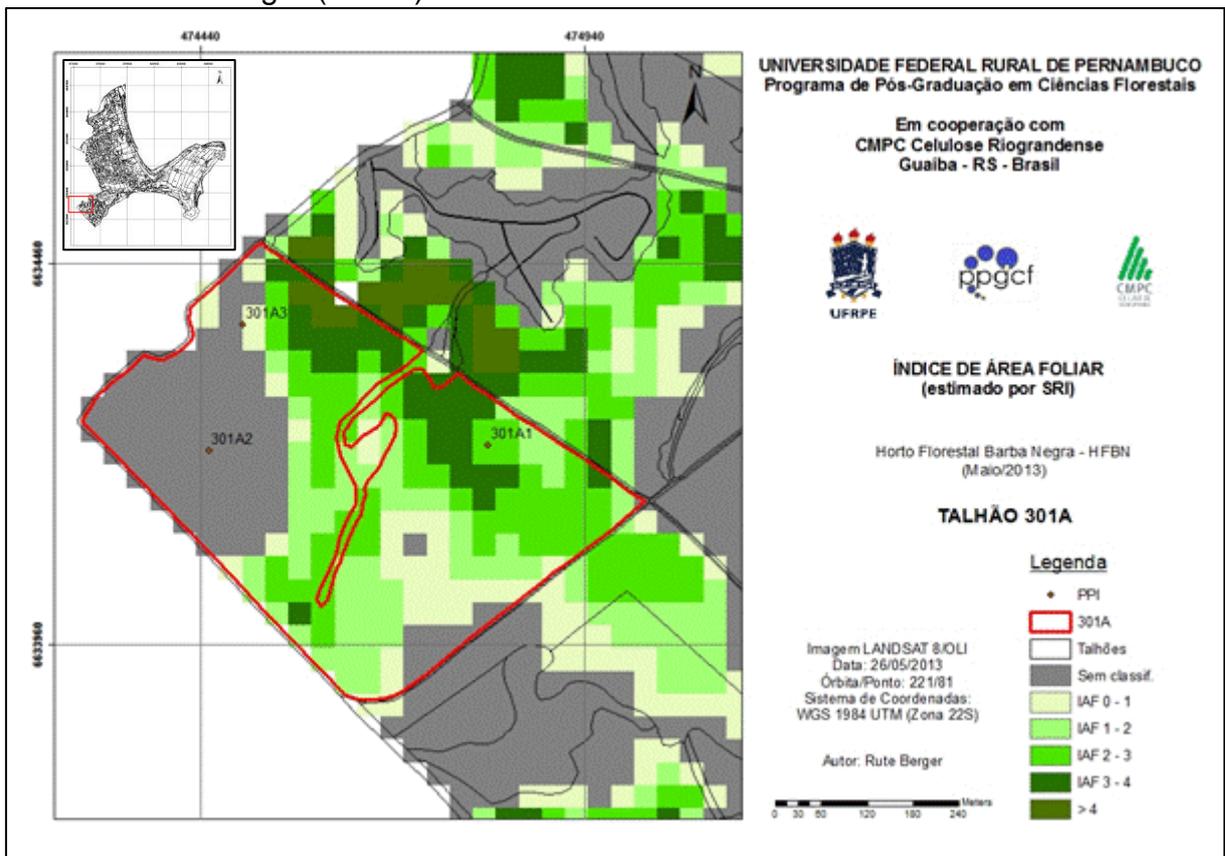
IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto

As áreas de plantio comercial de idade inferior a três anos aparecem com mais de 60% de pixels com valores negativos, o que em parte pode ser explicado pela vegetação esparsa até essa idade e, por outra parte pela falta ajuste do modelo para estimar IAF por SRI, que foi ajustado com dados a partir de três anos, justamente pela possibilidade de haver interferência dos solos e outro tipo de vegetação de sub-bosque que poderia influenciar na reflectância obtida na imagem. Outro fator poderia ser o diferente comportamento espectral de outras espécies/clones de *Eucalyptus* spp., os quais não foram incluídos no ajuste da equação.

Em contrapartida, os plantios com idades superiores aos três anos aparecem com mais de 85% de valores de IAF maiores que zero, predominantemente entre as classes de IAF 2 – 2,99 e 3 – 3,99. Nesta classe de uso do solo, os pixels classificados com valores de $IAF < 0$ podem ser devidos à influência de mistura espectral, falta de ajuste da equação de IAF em baixos valores de SRI e presença de outros fatores que podem influenciar na reflectância, tais como a presença de nuvens.

Neste estudo, um talhão foi excluído da análise (talhão 301A, idade oito anos) porque uma parte de sua cobertura aparece com pixels de IAF_{SR} com valor negativo (Figura 22), sendo que a PPI instalada no local e medida no campo mostrou resultados normais (301A2, $VTCC=379,1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, em junho de 2013). Nesse talhão não foram coletados dados de IAF_{campo} , por problemas com o equipamento LAI-2000.

Figura 22 – Pixels com valores IAF_{SR} inferior a zero em talhão comercial no horto florestal Barba Negra (HFBN).



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto

A inconsistência indica que possivelmente houve a interferência de nuvens ou outra interferência atmosférica sobre o talhão, e alerta para os cuidados necessários na utilização da ferramenta. Colombo et al. (2003) analisaram alguns IV com diferentes propriedades, porém não encontraram melhorias nas estimativas de IAF_{SR} quando do uso de IV que propõem a minimização dos efeitos atmosféricos, tais como o índice de vegetação resistente à atmosfera (ARVI). Outra possibilidade para essa inconsistência seriam os problemas decorrentes da falta de ajuste do

modelo ou insuficiência amostral, porém esse seria um problema recorrente em todos os talhões em que as condições fossem semelhantes, o que não foi o caso.

Outros usos de produção (experimentos e áreas de produção de sementes) também aparecem com mais de 80% de sua superfície com $IAF > 0$.

Estradas e aceiros aparecem com 60% de sua superfície com valores de $IAF > 0$, o que pode ser explicado pela composição vegetal dos aceiros, normalmente pastagem, e pelo efeito de borda no caso das estradas. Valores de referência de IAF para pastagens variaram de 0,1 a 0,6 em um estudo realizado por Fan et al. (2009).

A infraestrutura (viveiro florestal) e áreas de pastagem aparecem quase na totalidade com $IAF < 0$. O viveiro está caracterizado por coberturas metálicas e solo exposto, o que justificaria os baixos valores de índice de vegetação e consequentemente o IAF negativo. As áreas de pastagem (cerca de 18 ha) podem ter resultado em IAF negativo por efeito dos erros de ajuste do modelo.

As áreas classificadas com usos de solo para recursos hídricos e solos por plantar são caracterizadas por mais de 25% cada uma com valores de $IAF > 0$, o que poderia ser explicado por presença de algas nas primeiras e pela presença de vegetação (mato-competição) nos solos que aguardam condução da brotação ou reforma, bem como pela influência de pixels vizinhos.

4.6 Caracterização dos talhões pelo inventário de campo

Uma síntese dos estimadores do inventário de campo realizado entre os dias 10 e 17 de junho de 2013 é apresentada na Tabela 12, para cada talhão (maiores detalhes do inventário podem ser encontrados no Apêndice D). A análise foi realizada considerando AIA e estima um valor de intensidade de amostragem definitivo para LE% de 15%, 10% e 5%. Pelos motivos expostos no item 4.5, o talhão 301A foi excluído da análise.

É importante ressaltar que o inventário de campo foi realizado sobre uma rede de parcelas permanentes de inventário (PPI), cuja distribuição está vinculada aos estratos administrativos definidos pela empresa, dos quais alguns talhões os representam participando com uma ou mais parcelas. Neste trabalho os talhões foram analisados individualmente, portanto o número de amostras de cada talhão pode ser baixo e os erros de amostragem de inventário resultantes podem ser altos.

Tabela 12 – Estimadores de inventário de campo para volume total com casca (VTCC) de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith do horto florestal Barba Negra (HFBN), em junho/2013.

Talhão	Idade (anos)	Área (ha)	n	Média (m ³ .ha ⁻¹)	Erro padrão (m ³ .ha ⁻¹)	CV%	E _r %	Intensidade de amostragem (P=0.95)		
								n _{d15%}	n _{d10%}	n _{d5%}
110B	5	30.05	8	270.7	16.1	16.8	14.1	8	14	46
115B	5	29.28	3	254.1	13.1	9.0	22.3	4	7	15
121A	3	19.07	5	144.0	13.1	20.4	25.3	10	19	67
122A	3	24.79	3	88.9	7.2	14.1	35.0	6	11	33
126A	6	26.30	8	320.4	8.9	7.9	6.6	3	5	13
129A	5	24.83	3	238.4	29.1	21.1	52.5	11	20	72
147A	5	22.49	3	258.2	16.7	11.2	27.8	5	8	22
150A	3	37.00	4	127.1	0.6	0.9	1.5	3	3	3
163B	5	22.04	2	221.6	61.7	39.4	353.8	29	63	241
209D	6	36.29	5	315.0	8.6	6.1	7.6	3	4	9
272C	6	56.81	9	333.8	26.4	23.7	18.2	13	25	89
341A	5	23.57	4	213.4	8.0	7.5	11.9	3	5	12
348A	5	20.62	4	173.7	6.1	7.0	11.2	3	5	11
351A	5	39.21	4	219.0	15.8	14.4	23.0	7	11	35
401B	3	55.07	4	34.9	3.6	20.5	32.5	10	19	67
406B	6	18.45	3	260.5	9.8	6.6	16.3	3	5	10
407C	6	28.37	4	288.1	11.2	7.8	12.4	5	5	12
407D	3	47.50	9	67.7	4.2	18.4	14.2	9	16	55
410A	3	57.66	5	57.5	3.8	14.9	18.4	7	11	37
413D	7	10.51	8	345.2	14.1	11.6	9.7	5	8	24
418B	8	75.81	6	342.9	6.6	4.7	5.0	3	4	6
433B	5	71.12	10	180.8	14.6	25.6	18.3	14	28	103

Fonte: Berger (2013).

n=intensidade de amostragem; n_d=intensidade de amostragem definitiva; CV%=coeficiente de variação; E_r%=erro de amostragem.

Os resultados da Tabela 12 mostram grande amplitude entre as médias de VTCC por talhão, com valores variando entre 34,9 m³.ha⁻¹ (talhão 401B, com três anos de idade) e 345,2 m³.ha⁻¹ (talhão 413D, com sete anos de idade), o que em maior parte poderia ser explicado pela variação de idades, sítios e espaçamentos.

O CV% também variou consideravelmente, sendo observados valores entre 0,9% (talhão 150A, com três anos de idade) e 48,7% (talhão 430B, com cinco anos de idade). Esta variação independe do tamanho da amostra (apesar de uma baixa intensidade de amostragem poder influenciar nos resultados) e da idade de plantio, porém é possível observar maior amplitude de CV% em plantios de cinco anos.

O erro padrão resultante variou entre $0,6 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ (talhão 150A, com três anos de idade) e $61,7 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ (talhão 163B, com cinco anos de idade). Estes resultados são altamente dependentes da idade, do sítio, da variância entre as médias e do tamanho da amostra, e têm influência direta no $E_r\%$, cujos valores mínimo e máximo (respectivamente 1,5% e 353,8%) ocorreram nos mesmos talhões (respectivamente 150A e 163B).

As intensidades de amostragem estimadas para os diferentes limites de erro variaram amplamente, desde uma UA para $LE\%=15\%$ (talhões 150A, 209D, 267A e 418B) até 367 UA para $LE\%=5\%$ (talhão 430B). As intensidades de amostragem muito baixas ($n=1$) foram ocasionadas principalmente por baixos $CV\%$ e influenciadas pelo maior $LE\%$ estabelecido (15%). Nos casos em que $n=1$, a intensidade de amostragem mínima adotada foi três UA. Em várias estimativas o valor de n ficou indefinido, oscilando entre valores de n ora muito baixos e ora muito altos, sem ocorrer a estabilização. Esse fato ocorre devido à influência do valor de t , que assume valores altos para um baixo número de graus de liberdade (GL), gerando um valor de n alto. Conseqüentemente, ao assumir um valor alto de GL originado da simulação anterior, o valor de t é mais baixo, gerando novamente um valor de n baixo. Nesses casos, o valor mínimo de $n=3$ foi estabelecido, até a estabilização.

Por outro lado, os valores de n muito altos foram ocasionados por altos $CV\%$ e influenciados pela maior precisão requerida ($LE=5\%$), gerando intensidades de amostragem muito grandes, inviáveis para aplicação no campo e sem sentido prático. Nessas condições de variabilidade, Cochran (1965) e Shiver e Borders (1996) sugerem que os requerimentos de erro sejam revistos, e que sejam aceitos maiores níveis de incerteza.

4.7 Intensidade de amostragem para talhões com estratos de IAF_{SR}

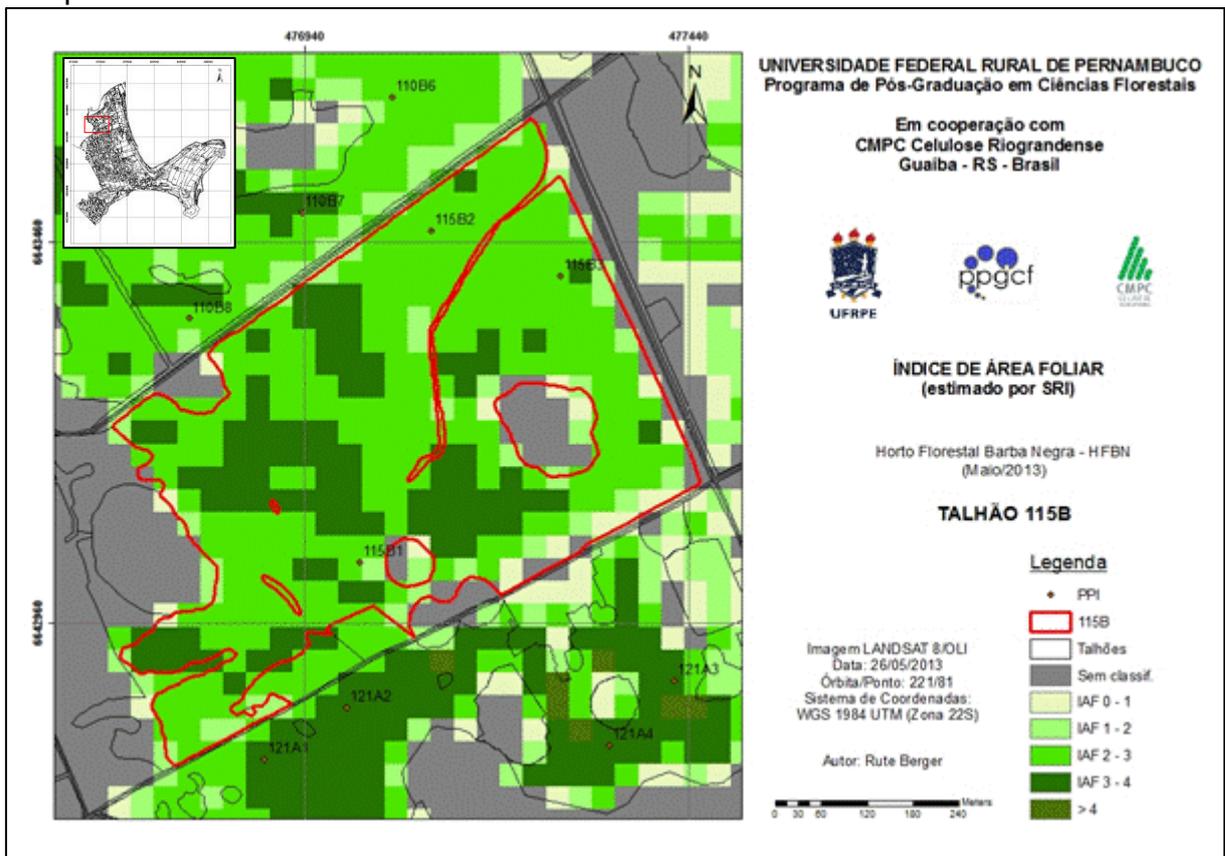
Dos 23 talhões analisados, 12 puderam ser estratificados por IAF_{SR} , conforme os critérios estabelecidos no item 3.8.1: 115B, 126A, 163B, 209D, 272C, 348A, 351A, 401B, 407D, 410A, 418B e 433B. O talhão 301A foi excluído da análise por conter inconsistências na relação do IAF_{SR} e o VTCC obtido no campo (ver item 4.5).

A Tabela 13 mostra as estatísticas de IAF_{SR} e os resultados de intensidade de amostragem estimados para os talhões com estratos. Os resultados da ANOVA para estratos por talhão são apresentados no Apêndice E (Tabelas 21 a 31).

Conforme os resultados da ANOVA para estratos de IAF_{SR} , todos os estratos estabelecidos por talhão trariam vantagens ao inventário, pois resultaram em diferenças significativas.

Na Figura 23 pode-se observar a imagem IAF para um dos talhões com estratos de IAF_{SR} (115B). Os demais talhões em que foi possível realizar a estratificação podem ser visualizados no Apêndice H (Figuras 32 a 42).

Figura 23 – Imagem IAF_{SR} do talhão 115B, com possibilidade de estratificação no campo.



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

Nessa figura pode-se observar nitidamente a diferença entre os setores de maior e menor valor de IAF , com a formação de agrupamentos (estratos) de pixels (classes de IAF 2 – 3 e IAF 3 – 4).

Tabela 13 – Estimativa da intensidade de amostragem estratificada (AE) com alocação ótima para o inventário dos talhões com estratos de IAF_{SR} no horto florestal Barba Negra.

Talhão	Estrato	Área (ha)*	N	W _h	\bar{X}_h	W _h · \bar{X}_h	S _h ²	S _h	W _h ·S _h	Intensidade de amostragem (P=0.95)**		
										n _{15%}	n _{10%}	n _{5%}
115B	IAF2	20.88	232	0.725	2.45	1.778	0.243	0.492	0.357	8	18	71
	IAF3	7.92	88	0.275	3.24	0.890	0.036	0.189	0.052	2(3)	3	11
	Total	28.80	320	1.000		2.668			0.409	10(11)	21	82
126A	IAF1	7.65	85	0.296	1.44	0.425	0.171	0.414	0.122	3	6	25
	IAF2	12.15	135	0.471	2.59	1.216	0.087	0.295	0.139	3	7	29
	IAF3	6.03	67	0.233	3.34	0.780	0.084	0.291	0.067	2(3)	4	14
	Total	25.83	287	1.000		2.422			0.329	8(9)	17	68
163B	IAF1	9.00	100	0.410	1.509	0.618	0.192	0.438	0.179	6	14	53
	IAF2	12.96	144	0.590	2.395	1.414	0.082	0.287	0.169	6	13	50
	Total	21.96	244	1.000		2.032			0.348	12	27	103
209D	IAF1	17.19	191	0.475	1.438	0.683	0.194	0.440	0.209	8	18	72
	IAF2	18.99	211	0.525	2.490	1.307	0.119	0.344	0.181	7	16	62
	Total	36.18	402	1.000		1.990			0.390	15	34	134
272C	IAF1	10.17	113	0.183	1.355	0.248	0.249	0.499	0.091	2(3)	4	16
	IAF2	33.21	369	0.598	2.562	1.532	0.072	0.268	0.160	3	7	28
	IAF3	12.15	135	0.219	3.243	0.709	0.050	0.224	0.049	1(3)	3	9
	Total	55.53	617	1.000		2.490			0.300	6(9)	14	53
348A	IAF1	7.38	82	0.381	1.548	0.590	0.171	0.413	0.158	5	11	44
	IAF2	11.97	133	0.619	2.418	1.495	0.094	0.307	0.190	6	14	53
	Total	19.35	215	1.000		2.086			0.348	11	25	97
351A	IAF1	12.78	142	0.333	1.573	0.523	0.141	0.375	0.125	4	8	30
	IAF2	25.65	285	0.667	2.494	1.664	0.090	0.300	0.200	6	12	47
	Total	38.43	427	1.000		2.188			0.325	10	20	77
401B	IAF1	27.09	301	0.502	1.422	0.715	0.209	0.457	0.230	10	21	84
	IAF2	26.82	298	0.497	2.489	1.238	0.119	0.345	0.172	7	16	63
	Total	53.91	599	1.000		1.953			0.402	17	37	147
407D	IAF2	19.53	217	0.413	2.320	0.957	0.498	0.706	0.291	6	14	53
	IAF3	27.81	309	0.587	3.445	2.024	0.084	0.291	0.171	4	8	31
	Total	47.34	526	1.000		2.981			0.462	10	22	84
410A	IAF1	11.79	131	0.227	1.300	0.295	0.317	0.563	0.128	4	8	31
	IAF2	40.23	447	0.773	2.535	1.960	0.079	0.282	0.218	6	13	52
	Total	52.02	578	1.000		2.255			0.346	10	21	83
418B	IAF2	69.21	769	0.919	2.223	2.043	0.059	0.243	0.223	4	9	36
	IAF3	6.12	68	0.081	3.277	0.266	0.062	0.249	0.020	1(3)	1(3)	4
	Total	75.33	837	1.000		2.309			0.243	5(7)	10(12)	40
433B	IAF1	10.17	113	0.144	1.519	0.219	0.214	0.463	0.067	1(3)	3	10
	IAF2	38.52	428	0.547	2.606	1.426	0.063	0.251	0.137	3	5	20
	IAF3	21.69	241	0.308	3.283	1.012	0.049	0.221	0.068	2(3)	3	10
	Total	70.38	782	1.000		2.657			0.272	6(9)	11	40

Fonte: Berger, 2014.

*Área obtida pelo somatório de pixels, excluídos aqueles com valores negativos. **Parcelas de 400m². Valores entre parênteses se referem ao valor mínimo estabelecido por estrato e, em negrito, o total ajustado. P=Probabilidade de Confiança; IAF_{SR}= índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

Alguns setores no interior do talhão apresentam valores de IAF_{SR} inferiores a zero (que neste caso específico se referem a uma APP), entretanto a área útil do

talhão não inclui esses setores, que não foram computados nas estimativas. Valores de IAF_{SR} nas classes IAF 0 – 1 (estrato IAF0) e IAF 1 – 2 (estrato IAF1) foram incorporados às classe imediatamente superiores, pois não somaram a quantidade mínima para formar um estrato (seis hectares) e tampouco formaram agrupamentos. Os pixels classificados nestas classes possivelmente sofreram influência de borda, tais como estradas, aceiros, talhões vizinhos ou sombra.

Desta maneira, conforme os resultados apresentados na Tabela 13, os setores definidos como estrato IAF2 (classificados na imagem com IAF_{SR} entre 2 e 3), somaram 20,88 ha (232 pixels). Os setores definidos como estrato IAF3 (classificados na imagem com IAF_{SR} entre 3 e 4), somaram 7,92 ha (88 pixels).

Apesar de ser necessária uma análise visual na avaliação da viabilidade de estratificação, esse processo se mostrou consideravelmente ágil quando da contagem de pixels por estrato, sendo rapidamente eliminados os talhões que não atenderam ao tamanho mínimo de estrato.

Na Tabela 13, pode-se observar também que alguns estratos resultaram em intensidade de amostragem igual a um ($n=1$): talhão 272C, estrato IAF3; 418B, estrato IAF3 e 433B, estrato IAF1. Este resultado foi ocasionado por influência do menor peso na ponderação do estrato no talhão, pois o valor de S_h foi semelhante entre todos os estratos de cada talhão com essa condição, com exceção do talhão 433B, cujo S_h do estrato IAF1 ($S_h=0,463$) foi maior que o S_h dos estratos IAF2 e IAF3 ($S_h=0,251$ e $S_h=0,221$, respectivamente). Apesar do maior valor de S_h , a pequena representatividade do estrato IAF1 levou a um baixo valor de intensidade de amostragem nesse estrato. Nesses casos, elevou-se o número mínimo de UA para três unidades, caso contrário as análises estatísticas ficariam comprometidas.

Para fins de comparação teórica entre os processos de amostragem inteiramente aleatória (AIA) e estratificada (AE) por IAF_{SR} , foi estimada a intensidade de amostragem por $CV\%_{IAF}$ para AIA, sendo apresentada na Tabela 14.

O $CV\%_{IAF}$ para AIA dos talhões analisados (Tabela 14) variou entre 16,6% (talhão 418B) e 33,0% (talhão 209D). Conseqüentemente, ambos os talhões mencionados apresentaram, respectivamente, as menores e as maiores intensidades de amostragem para os três níveis de erro estabelecidos. Nessa análise, o valor de t tabelar diferiu pouco entre os talhões, pois foi considerada a população para a obtenção dos graus de liberdade.

Tabela 14 – Estimativa da intensidade de amostragem para o inventário florestal de talhões com estratos de IAF_{SR} , para o processo de amostragem inteiramente aleatória.

Talhão	Área (ha)*	N	Média	Desvio padrão	CV% _{IAF}	Intensidade de amostragem (P=0.95)**		
						n _{15%}	n _{10%}	n _{5%}
115B	28.80	320	2.668	0.555	20.8	23	43	156
126A	25.83	287	2.422	0.781	32.2	48	97	367
163B	21.96	244	2.032	0.563	27.7	36	72	273
209D	36.18	402	1.990	0.656	33.0	48	102	383
272C	55.53	617	2.490	0.680	27.3	36	72	266
348A	19.35	215	2.086	0.549	26.3	34	68	248
351A	38.43	427	2.188	0.543	24.8	30	61	221
401B	53.91	599	1.953	0.670	26.3	34	66	246
407D	47.34	526	2.981	0.750	25.1	32	61	225
410A	52.02	578	2.255	0.633	28.1	36	75	279
418B	75.33	837	2.309	0.382	16.6	16	30	102
433B	70.38	782	2.657	0.625	23.5	27	54	198

Fonte: Berger, 2014.

*Área obtida pelo somatório de pixels, excluídos aqueles com valores negativos. **Parcelas de 400m². IAF_{SR} =índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto; N=total da população (número de pixels); CV%_{IAF}=coeficiente de variação entre pixels IAF_{SR} ; P=Probabilidade de Confiança; n=intensidade de amostragem estimada para o inventário florestal.

A intensidade de amostragem foi de 16, 20 e 102 UA para o talhão 418B, respectivamente para 15%, 10% e 5% de erro máximo admitido. Para o talhão 209D, a intensidade de amostragem foi de 48, 102 e 383, respectivamente para 15%, 10% e 5% de erro máximo admitido. Esses valores são consideravelmente altos quando comparados aos valores estimados para a AE por IAF_{SR} , bem como com os resultados do inventário florestal (Tabela 12, item 4.6). Em alguns casos chegam a extrapolar o tamanho da população, como pode ser observado para os talhões 126A, 163B e 348A (ver comentários anteriores sobre esse problema, no item 4.6).

A intensidade de amostragem estimada para os diferentes limites de erro (LE%) e processo de amostragem (AIA e AE) nos talhões com estratos de IAF_{SR} pode ser melhor visualizada na Figura 24.

Pode-se observar nas Figuras 24a à 24l três importantes tendências na estimativa da intensidade de amostragem. A primeira se refere à natural diminuição da intensidade de amostragem com o aumento do limite de erro aceitável, para ambos os processos (SHIVER; BORDERS, 1996). O fator de maior influência para esse contraste é o CV%_{IAF} de cada talhão, uma vez que os valores de t são muito próximos e não produziram uma diferença tão marcante entre os talhões.

Figura 24 – Intensidade de amostragem estimada para os processos de amostragem inteiramente aleatória (AIA) e amostragem estratificada (AE), a partir do IAF_{SR} , para os talhões com estratos do HFBN, para os LE% de 5%, 10% e 15%. Continua...

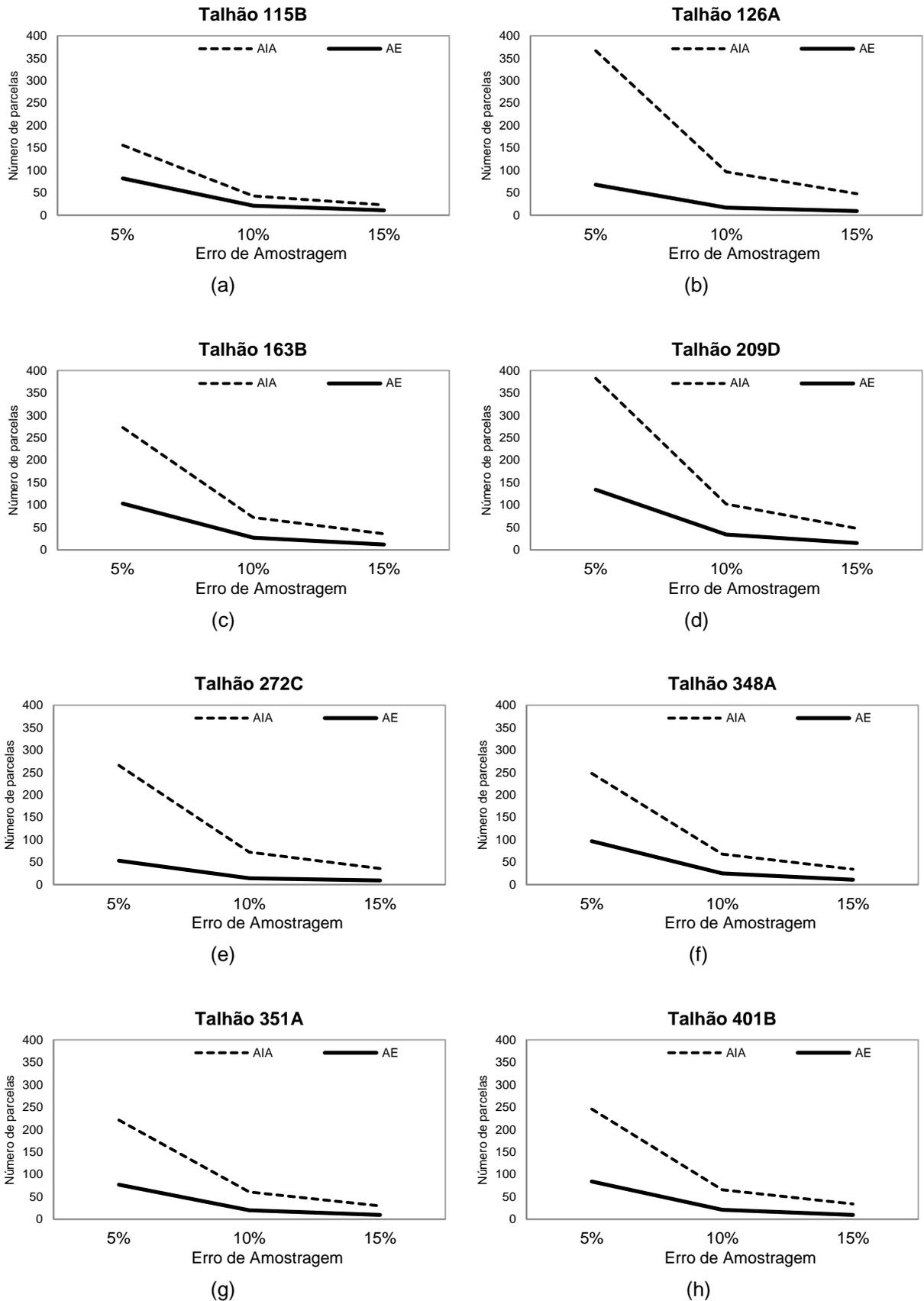
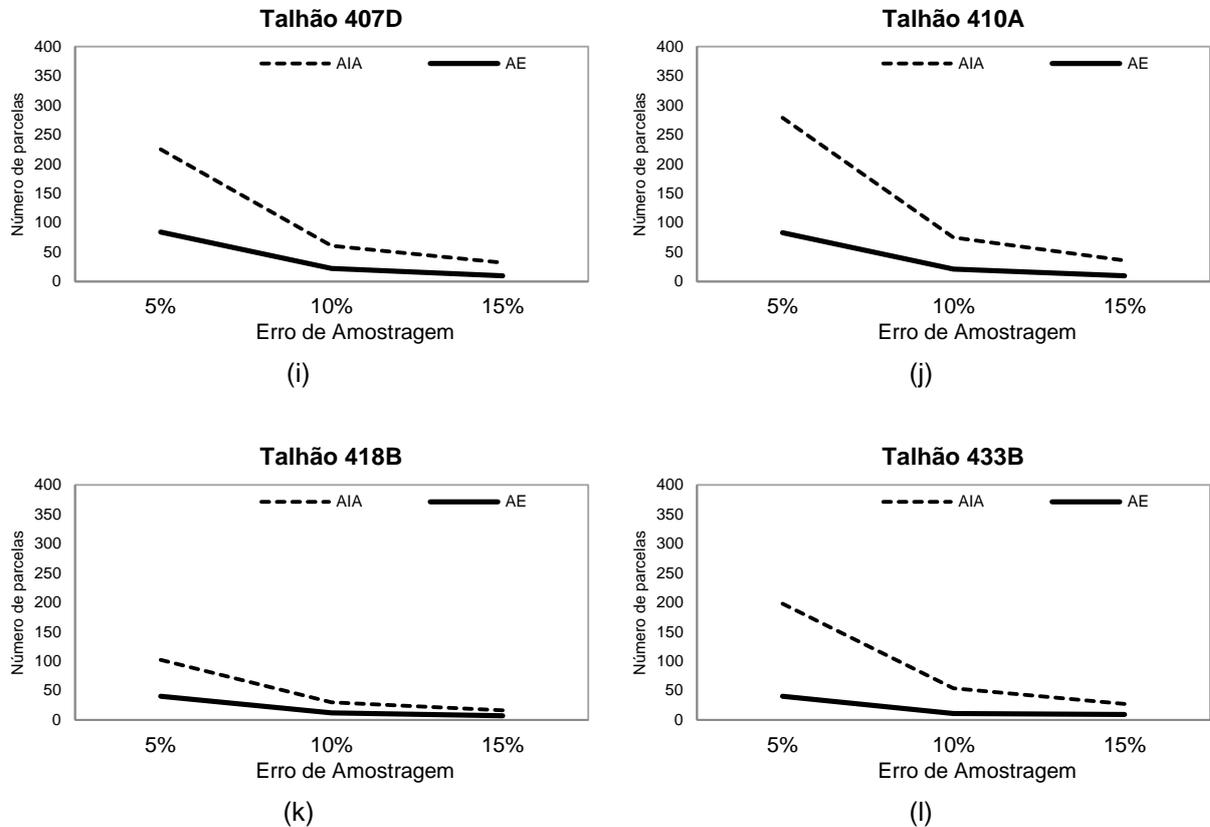


Figura 24– Intensidade de amostragem estimada para os processos de amostragem inteiramente aleatória (AIA) e amostragem estratificada (AE), a partir do IAF_{SR} , para os talhões com estratos do HFBN, para os LE% de 5%, 10% e 15%. (Termina)



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

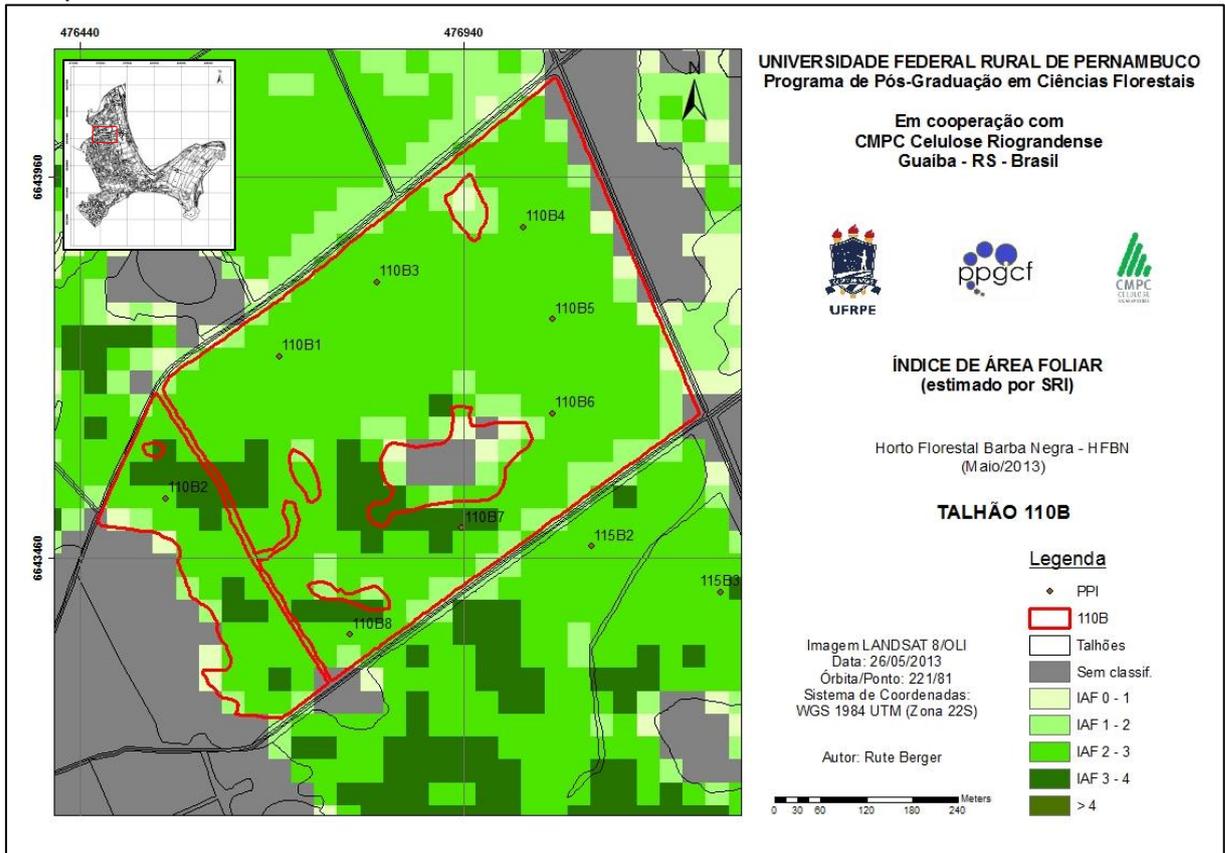
Outra tendência é a importante diferença na intensidade de amostragem entre AIA e AE, principalmente para limite de erro de amostragem de 5%, em todos os talhões avaliados. Essa tendência mostra que a estratificação pode ser altamente benéfica para o IF, principalmente quando a população apresenta alta variabilidade e os requerimentos de precisão são altos.

Na medida em que a porcentagem de erro admitida aumenta, as diferenças entre os dois processos tendem a diminuir, principalmente nos casos em que o $CV\%_{IAF}$ é menor. Esse fato resulta da aproximação entre a variabilidade da população e o maior erro admitido, o que interfere nas vantagens que a AE poderia ocasionar quando a variabilidade é alta.

4.8 Intensidade de amostragem para talhões sem estratos de IAF_{SR}

Na Figura 25, pode-se observar a imagem IAF_{SR} para um dos talhões em que não foi possível a estratificação (110B). Os demais talhões nessa condição podem ser visualizados no Apêndice I (Figuras 43 a 51).

Figura 25 – Imagem IAF_{SR} de um talhão sem possibilidade de estratificação no campo.



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

Para os talhões em que não foi possível a formação de agrupamentos de mesma classe de IAF_{SR}, a intensidade de amostragem foi obtida utilizando unicamente o processo AIA. Os talhões correspondentes a esta categoria foram: 110B, 121A, 122A, 129A, 147A, 150A, 341A, 406B, 407C e 413D. O talhão 301A foi excluído da análise por conter inconsistências na relação do IAF_{SR} e o VTCC obtido no campo (ver item 4.5).

Nesse talhão é possível observar regiões com diferentes classes de IAF_{SR}, que não alcançam os requisitos mínimos para a estratificação. A classe de IAF2 é predominante, e setores com classes de IAF0, IAF1 e IAF3 podem ser observados no interior e nas bordas do talhão. Setores sem classificação também estão

presentes nas bordas, e podem ter sido originados por influência de talhões vizinhos.

No interior do talhão aparecem pixels com clara influência de outros usos do solo, como pode ser observado próximo ao canto superior e no centro da imagem (Figura 25). Essa observação remete aos comentários anteriores sobre a possível interferência de borda nos resultados de IAF_{SR} dos talhões.

Na Tabela 15 podem ser observados os resultados de intensidade de amostragem obtidos para LE% de 15%, 10% e 5%, considerando AIA.

O $CV\%_{IAF}$ dos talhões sem estratos (Tabela 15) variou amplamente entre os mesmos. O valor mais baixo foi observado para o talhão 406B, com $CV\%_{IAF}=13,8\%$ e o maior valor foi encontrado para o talhão 122A, com $CV\%_{IAF}=53,2\%$. Desta maneira, ambos os talhões mencionados apresentaram, respectivamente, as menores e as maiores intensidades de amostragem para os três níveis de erro estabelecidos.

Tabela 15 - Intensidade de amostragem calculada para o processo de amostragem inteiramente aleatória (AIA), a partir do IAF_{SR} , para os talhões sem estratos do HFBN, para os LE% de 5%, 10% e 15%.

Talhão	Área (ha)*	N	Média	Desvio-padrão	CV% _{IAF}	Intensidade de amostragem (P=0.95)**		
						n _{15%}	n _{10%}	n _{5%}
110B	29.43	327	2.489	0.518	20.8	23	45	158
121A	17.55	195	2.921	0.961	32.9	48	99	381
122A	20.61	229	2.074	1.104	53.2	115	252	986
129A	23.58	262	2.314	0.729	31.5	45	92	351
147A	21.51	239	2.132	0.674	31.6	45	93	354
150A	32.58	362	2.552	1.049	41.1	72	153	592
341A	23.40	260	2.629	0.533	20.3	23	43	149
406B	18.36	204	2.597	0.358	13.8	14	23	72
407C	28.53	317	2.586	0.477	18.5	21	36	124
413D	10.80	120	1.879	0.361	19.2	20	38	135

Fonte: Berger, 2014.

*Área obtida pelo somatório de pixels, excluídos aqueles com valores negativos. **Parcelas de 400m². IAF_{SR} =índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto; N=total da população (número de pixels); $CV\%_{IAF}$ =coeficiente de variação entre pixels IAF_{SR} ; P=Probabilidade de Confiança; n=intensidade de amostragem estimada para o inventário florestal.

A intensidade de amostragem foi de 14, 23 e 149 UA para o talhão 406B, respectivamente para 15%, 10% e 5% de erro máximo admitido.

Para o talhão 122A, a intensidade de amostragem foi de 115, 252 e 986 UA, respectivamente para 15%, 10% e 5% de erro máximo admitido. Esses valores são muito altos, e são decorrentes do alto $CV\%_{IAF}$ (53,2%) no talhão. Por outro lado, a

intensidade de amostragem obtida para os limites de erro de 5% extrapola o número total de pixels do talhão (ver comentários anteriores no item 4.6).

Para os demais talhões, pode-se observar que alguns (121A, 122A, 129A, 150A e 413D) apresentaram setores formando agrupamentos (estratos) de IAF_{SR} , sendo que o tamanho mínimo do estrato não foi alcançado (Apêndice I, Figuras 43, 44, 45, 47 e 51, respectivamente). Outros apresentaram condições mais homogêneas (341A, 406B e 407C), apesar de haver um nítido efeito de borda (Apêndice I, Figuras, 48, 49 e 50, respectivamente). Essa influência ficou muito evidente para o talhão 147A (Figura 46), e nesse caso, a contribuição da forma do talhão é inegável.

Ao analisar esses resultados, pode-se inferir que a influência das respostas espectrais dos talhões vizinhos, das estradas florestais ou outros fatores poderia interferir nas estimativas de $CV\%_{IAF}$ do talhão. Apesar de ser notável em quase todos os talhões, em alguns deles se pode observar mais facilmente essa influência. Este efeito e sua implicância para o uso do sensoriamento remoto no inventário florestal já foi apontado por Mäkelä e Pekkarinen (2004), onde os autores indicaram o uso dos pixels centrais dos talhões nas estimativas como solução.

Entretanto, essa alternativa pode não ser viável em todos os talhões, pois depende principalmente do formato desses. Neste estudo, um caso típico de inviabilidade de uso dos pixels centrais seriam os talhões 122A e 129A (Apêndice I, Figuras 44 e 45), cujo formato longilíneo e estreito resultaria em uma pequena área útil para as estimativas de intensidade de amostragem.

4.9 Validação de campo

Um resumo dos resultados do IF de validação de campo realizado em julho de 2014 é apresentado na Tabela 16, para os três talhões com estratos de IAF_{SR} (126A, 401B e 418B) e para o talhão sem estratos de IAF_{SR} (406B). Para maiores detalhes, ver Apêndice F. Os estimadores de inventário para os talhões com estratos de IAF_{SR} foram obtidos para AIA e AE, e para AIA no talhão sem estratos.

Tabela 16 – Estimadores de inventário (volume total com casca, em $m^3 \cdot ha^{-1}$) para os talhões de validação de IAF_{SR} , pelo processo de amostragem aleatória simples (AIA) e amostragem estratificada (AE).

Estatística	Talhão			
	126A*	401B*	406B	418B*
n	12	20	13	12
Área (ha)	25.83	53.91	18.45	75.33
AMOSTRAGEM INTEIRAMENTE ALEATÓRIA				
\bar{x}	394.03	108.99	344.97	434.09
s_x^2	789.80	216.57	796.03	1025.42
s_x	28.10	14.72	28.21	32.02
$s_{\bar{x}}^2$	65.82	10.83	61.23	85.45
$s_{\bar{x}}$	8.11	3.29	7.83	9.24
CV%	7.13	13.50	8.18	7.38
t	2.201	2.093	2.179	2.201
E_a	17.86	6.89	17.05	20.35
E_r (%)	4.53	6.32	4.94	4.77
IC (média)				
LI	376.17	102.10	327.92	413.75
LS	411.89	115.87	362.02	454.44
IC (Total)				
LI	9716.57	5504.18	6050.20	31167.59
LS	10639.02	6246.80	6679.33	34232.91
AMOSTRAGEM ESTRATIFICADA				
\bar{x}_{st}	393.02	107.39		426.28
$s_{\bar{x}(st)}^2$	78.85	9.03		60.82
$s_{\bar{x}(st)}$	8.88	3.01		7.80
n.e.g.l.	6	16		9
t	2.447	2.120		2.262
E_a	21.73	6.37		17.64
E_r (%)	5.53	5.93		4.14
IC (média)				
LI	371.30	101.00		408.60
LS	414.75	113.76		443.92
IC (Total)				
LI	9590.45	5445.76		30782.72
LS	10712.90	6132.72		33440.78
F (ANOVA)	1.261 ^{ns}	6.903 ^{**}		7.411 ^{**}
Eficiência Relativa	0.835	1.198		1.405

Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto; * Talhões com estratos de IAF; ^{ns}=não significativo para $\alpha=5\%$; ^{**}Significativo para $\alpha=5\%$. Notação: n=intensidade de amostragem; \bar{x} =média; s_x^2 =variância; s_x =desvio padrão; $s_{\bar{x}}^2$ =variância da média; $s_{\bar{x}}$ =erro padrão; CV%=coeficiente de variação; t=valor de t tabelar (P=95%); E_a =erro de amostragem; E_r =erro de amostragem relativo; IC=intervalo de confiança; LI=limite inferior; LS=limite superior; \bar{x}_{st} =média estratificada; $s_{\bar{x}(st)}^2$ =variância da média estratificada; $s_{\bar{x}(st)}$ =erro padrão; n.e.g.l.=número efetivo de graus de liberdade; F (ANOVA)=valor de F calculado na análise de variância para efeito de estratos de IAF ($\alpha=5\%$).

Observa-se na Tabela 16 que a eficiência relativa da estratificação foi de 0,835 para o talhão 126A, o que indica que essa não foi eficiente. Para os talhões 401B e 418B, a estratificação foi respectivamente 19,8% e 40,5% mais eficiente que o processo aleatório simples.

Nas Figuras 26 a 29 são apresentados os mapas enviados ao campo para a instalação das UA de validação do uso do IAF_{SR} como inventário piloto, com as suas respectivas localizações. Os talhões 126A, 401B e 418B tiveram as UA alocadas aleatoriamente nos estratos (Figuras 26, 27 e 28, respectivamente), em intensidade definida conforme a Tabela 15. O talhão 406B teve as UA alocadas aleatoriamente em toda sua extensão (Figura 29). Não foram remedidas todas as UA do inventário anterior porque algumas estavam localizadas em locais limítrofes entre os estratos, sendo instaladas novas UA até completar a intensidade de amostragem estimada pelo IAF_{SR} (Tabela 13).

Podem-se observar no talhão 126A (Figura 26) os três estratos de IAF_{SR} claramente definidos, ainda que em formação de agrupamentos em diferentes regiões no talhão. As classes de IAF_0 e de IAF_4 não atenderam ao requisito de tamanho mínimo estabelecido, e foram incorporadas, respectivamente, aos estratos IAF_1 e IAF_3 . Esta fusão pode ter contribuído para o aumento da variação nesses estratos, e pode ter ocasionado um aumento na intensidade de amostragem estimada por IAF . As UA foram alocadas em número de três (estratos de IAF_1 e IAF_3) e seis (estrato de IAF_2). Ao todo foram remedidas cinco PPI e instaladas sete novas UA.

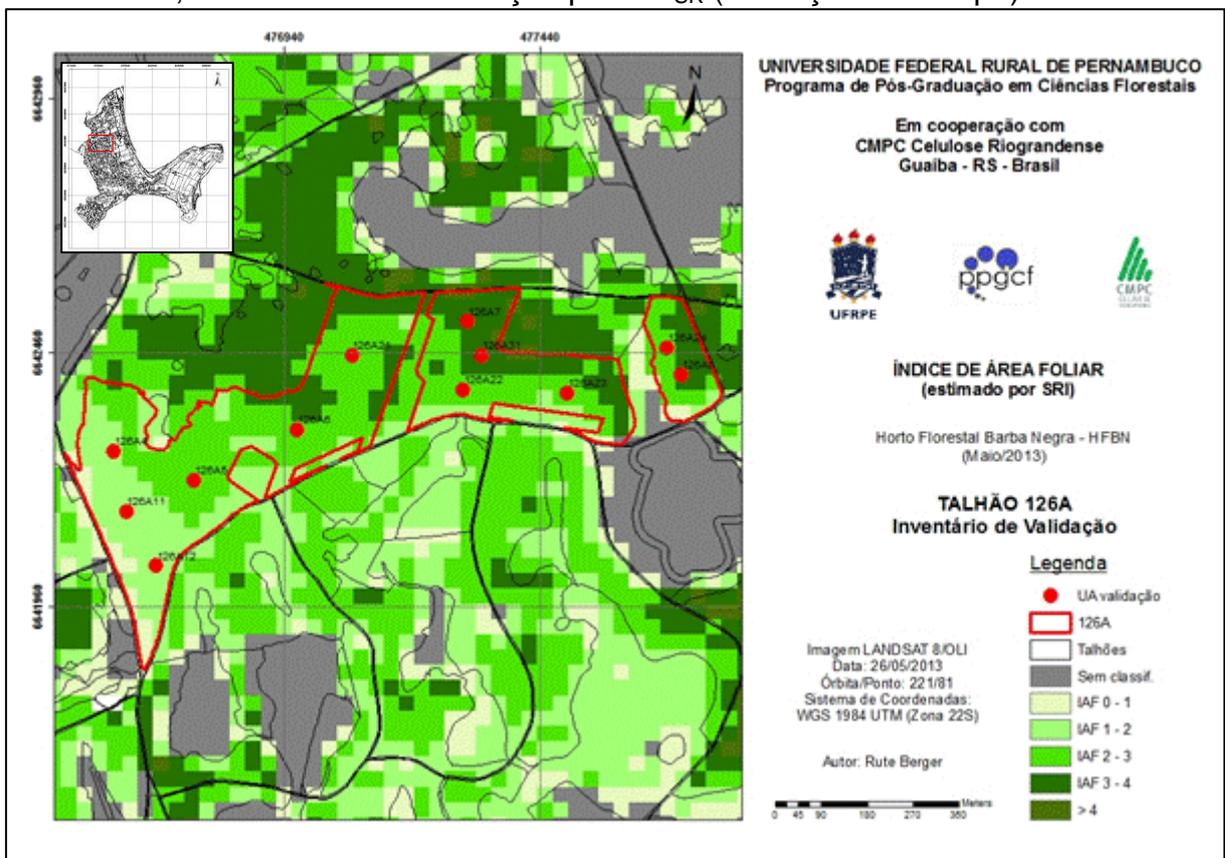
Nesse talhão também é possível perceber que há continuidade de estratos de IAF que se conectam com outros talhões, o que poderia constituir uma vantagem para o planejamento de um inventário contínuo, caso os talhões atendessem inicialmente aos critérios de estratificação tipológica ou administrativa, considerando que o IAF pode variar com a idade (ver item 4.2) e possivelmente com o material genético.

Para o talhão 126A, a média por estrato resultou em $378,04 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, $391,75 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ e $414,59 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente para os estratos IAF_1 , IAF_2 e IAF_3 . A variância por estrato no IAF_1 foi de $1554,19 (\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1})^2$, no estrato IAF_2 foi de $676,36 (\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1})^2$ e no estrato IAF_3 foi de $465,93 (\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1})^2$ (Apêndice F). A distribuição dos dados que geraram essa variação pode ser melhor visualizada na Figura 30a, na

qual se percebe a grande diferença entre o VTCC obtido nas UA, principalmente no estrato IAF1 em relação às demais médias.

A maior variabilidade foi encontrada entre as UA do estrato IAF1 e a menor entre as UA do estrato IAF3. Ao analisar a localização das UA no estrato IAF1, não se nota a possível influência de pixels vizinhos, mesmo porque a UA 126A4, localizada em local mais próximo ao estrato IAF2 (supostamente de maior produção), apresentou o menor VTCC do estrato.

Figura 26 – Mapa com a localização de unidades amostrais do inventário florestal do talhão 126A, baseado na estratificação por IAF_{SR} (validação de campo).



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

Como consequência da alta variabilidade dentro dos estratos, a estratificação realizada a partir do IAF_{SR} não resultou efetiva na validação de campo, pois não houve diferença significativa entre os estratos estabelecidos a partir das classes de IAF_{SR} (Apêndice G, Tabela 32). Neste sentido, ao comparar os processos de amostragem AE e AIA, este último resultou em menor erro de amostragem (AIA=4,53% e AE=5,53%) (Tabela 16).

Uma possível explicação para a alta variabilidade entre UA do IF no estrato IAF1 poderia estar baseada no fato de que os levantamentos de IAF_{campo} não contemplaram maior quantidade de amostras que pudessem estar inseridas na classe IAF1. Foram realizadas apenas quatro medições de IAF nessa classe, em um total de 40 medições de IAF_{campo} . O menor valor de IAF_{campo} no talhão 126A foi 2,15 na classe IAF1 e os maiores valores de IAF_{campo} foram obtidos no estrato de maior IAF (2,82). Este fator pode ter contribuído para a falta de ajuste do modelo para estimar IAF_{SR} , provocando maiores erros. Por outro lado, esse problema não foi encontrado em outro talhão avaliado, que também continha estratos de IAF1 (401B). A diferença entre ambos se refere à idade e ao tipo de solo.

Outra possibilidade é que nesse talhão a metodologia de estratificação adotada não tenha alcançado detectar as possíveis diferenças entre estratos, sendo que neste caso se poderia avaliar o número de classes ideal e sua viabilidade de implementação.

A Figura 27 mostra os estratos de IAF (IAF1 e IAF2) claramente definidos no talhão 401B. As classes de IAF0 e de IAF3 não atenderam ao requisito de tamanho mínimo estabelecido, e foram incorporadas, respectivamente, aos estratos IAF1 e IAF2, o que pode ter contribuído para o aumento da variação nesses estratos, ocasionando aumento na intensidade de amostragem estimada por IAF_{SR} . Foram instaladas 10 UA em cada estrato, sendo que apenas duas PPI foram remediadas do inventário anterior e as restantes foram novas UA.

Esse talhão apresentou alta variabilidade entre UA no IF anterior (junho 2013), com um $CV_{INV}=20,3\%$, o que pode ter sido ocasionado pela presença de estratos não considerados quando do planejamento do inventário, aumentando a variabilidade entre as PPI.

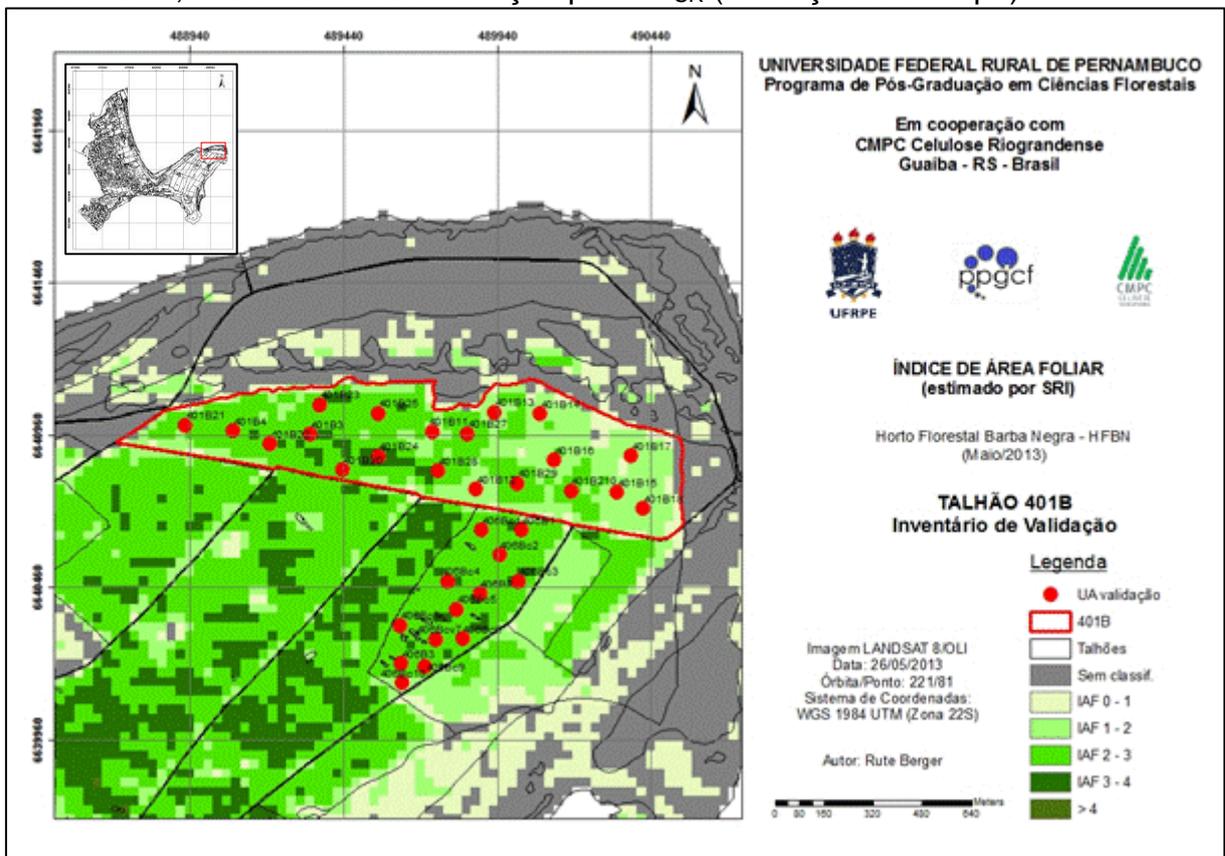
As médias por estrato do talhão 401B foram $99,62 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ e $115,23 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, respectivamente para os estratos IAF1 e IAF2. As médias por UA apresentaram certa variação dentro dos estratos (Figura 30b), porém essa foi menor do que aquela encontrada entre os estratos (Apêndice G, Tabela 33), resultando em diferença significativa pela ANOVA. Desta maneira, pode-se afirmar que a AE por IAF_{SR} foi benéfica para o IF, resultando em uma amostra mais precisa que aquela obtida para o processo AIA.

O erro de amostragem foi $E_r=5,95\%$ para AE e $E_r=6,32\%$ para AIA, mostrando o aumento da precisão pela estratificação por IAF_{SR} . Entretanto, além

dessa diferença ser pequena, a precisão do método de IAF_{SR} foi muito superior àquela estabelecida na estimativa da intensidade de amostragem por IAF_{SR} ($LE=15\%$). Este resultado indica que a variabilidade de IAF_{SR} foi maior que a variabilidade entre UA do IF, superestimando a intensidade de amostragem.

Os benefícios da estratificação são mais evidentes quando analisado o intervalo de confiança (IC) para o total de VTCC. Para AIA, a amplitude dos limites inferior e superior foi de $742,61 \text{ m}^3$ e para AE essa amplitude foi reduzida para $686,97 \text{ m}^3$ (Tabela 16).

Figura 27 – Mapa com a localização de unidades amostrais do inventário florestal do talhão 401B, baseado na estratificação por IAF_{SR} (validação de campo).

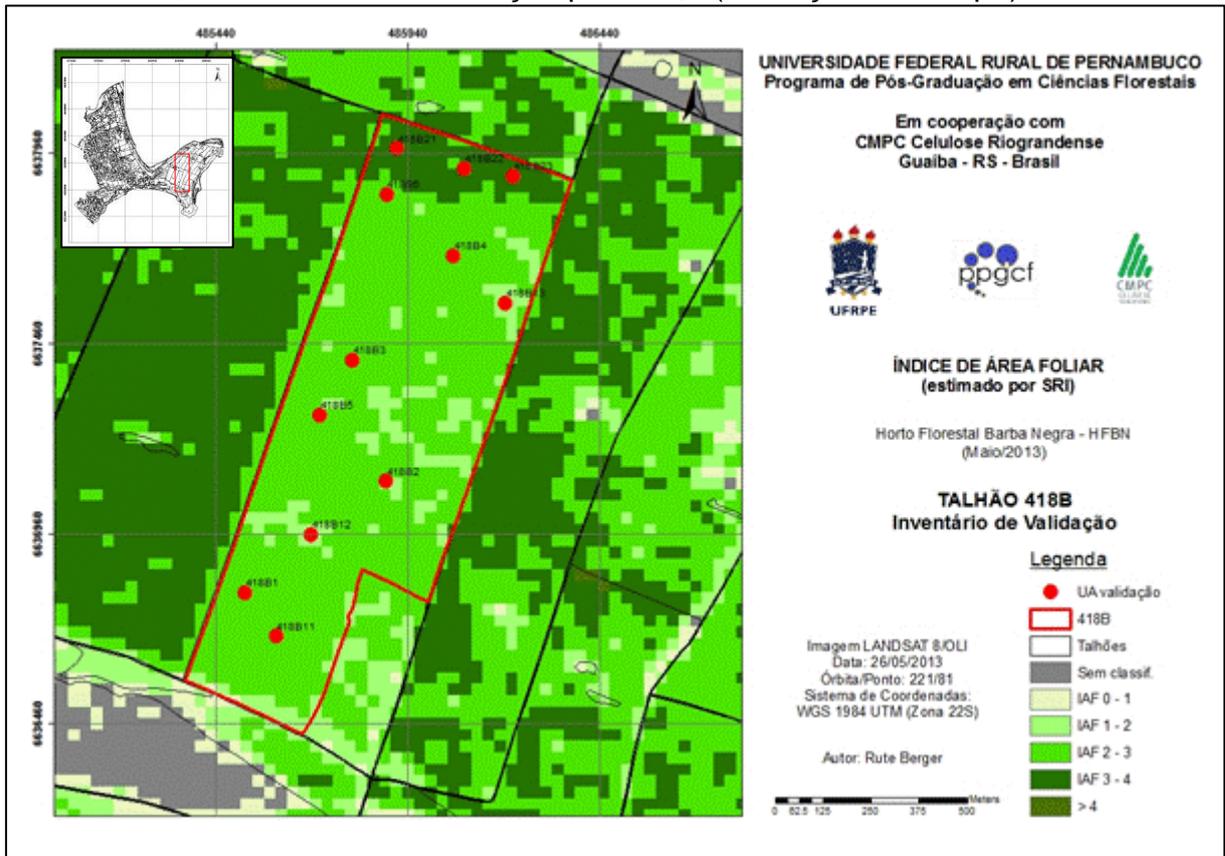


Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

Para o talhão 418B, a Figura 28 mostra a existência de dois estratos de IAF_{SR} : IAF2 e IAF3. O estrato IAF1 não alcançou o tamanho mínimo estabelecido, e foi incorporado ao estrato IAF2.

Figura 28 – Mapa com a localização de unidades amostrais do inventário florestal do talhão 418B, baseado na estratificação por IAF_{SR} (validação de campo).



Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR}= índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

No inventário inicial realizado em junho de 2013, este talhão apresentou baixo CV% (4,7) e baixo erro de amostragem (5%), para uma intensidade de amostragem $n=6$ (Tabela 15). Entretanto, como pode ser observado na Figura 41 (Apêndice H), todas as PPI estavam concentradas no estrato IAF2, o que pode justificar a baixa variabilidade encontrada.

As médias por estrato foram $422,52 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ e $468,81 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$, respectivamente para os estratos IAF2 e IAF3. O erro de amostragem para AE foi $E_r=4,14\%$, sendo que no caso de AIA foi encontrado um valor de $E_r=4,77\%$, mostrando leve superioridade de precisão para a AE. É importante considerar que a amostra estratificada foi acrescida de duas UA adicionais para compor o estrato IAF1, que havia resultado em $n=1$.

A amplitude de VTCC entre os limites superior e inferior do IC foi de $3.065,31 \text{ m}^3$ para AIA e de $2.658,06 \text{ m}^3$ para AE, mostrando que este último método reduziu a margem de erro esperado em um valor correspondente a aproximadamente 0,95 ha.

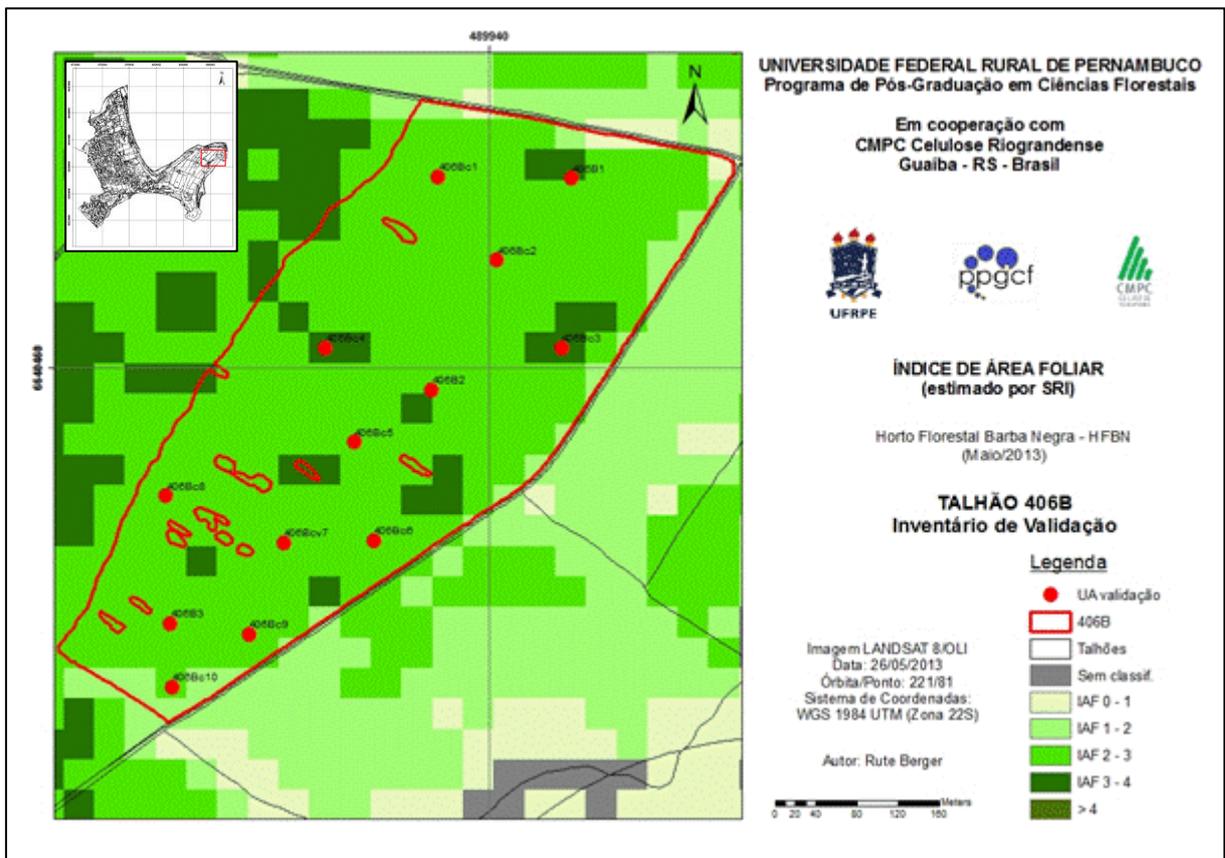
Os resultados do IF de validação (Apêndice F) e a ANOVA mostraram que houve diferença significativa entre as médias dos estratos de IAF (Apêndice G, Tabela 34), evidenciando a importância da diferenciação dos setores detectados pelo IAF_{SR} . Este resultado mostra que os estimadores do IF, mesmo que as amostras sejam distribuídas sem tendências e que resultem em baixa variação, podem não indicar a verdade de campo. Cochran (1965) já alertava sobre essa possibilidade quando se trabalha com amostragem. Neste sentido, os mapas de IAF_{SR} poderiam ser uma oportunidade única de obtenção da espacialização da variável de interesse antes do IF.

McRoberts et al. (2006) comentam que a redução da variância e o aumento da precisão pelo uso do SR em IF ocorrem quando: (a) a classificação ou as variáveis de predição estão estreitamente relacionadas com as variáveis a serem estimadas (como no caso do IAF e produção); (b) quando as UA estão localizadas com boa precisão na imagem; (c) as datas das imagens estão próximas às datas de medição; (d) quando a classificação tem poucos desvios ocasionados por erros nas amostras de treinamento (classificação supervisionada). O único efeito dos erros de classificação de imagens seria a diminuição da eficiência da estratificação. Desde que sejam consistentes, os erros de classificação não induzem a tendências, mas sim podem ocasionar o aumento da variância.

A Figura 29 (talhão 406B) mostra a predominância de pixels com IAF_{SR} variando entre 2 e 3 (classe IAF2). Esporadicamente aparecem pixels classificados como IAF3, em número e localização insuficientes para a geração de um estrato. Pode-se notar a possibilidade de influência de pixels de talhões vizinhos nas bordas, classificados com IAF0 e IAF1, que podem ter contribuído para o aumento da variabilidade entre IAF_{SR} de pixels, gerando maior intensidade de amostragem.

A média resultante para o talhão foi $344,97 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, com $CV=8,18\%$ e erro de amostragem $E_r=4,94\%$. Da mesma maneira que o ocorrido para os talhões com estratos, o E_r resultante foi muito inferior ao máximo estabelecido para o cálculo da intensidade de amostragem por IAF_{SR} ($LE=15\%$), confirmando a tendência da ferramenta em superestimar a variabilidade.

Figura 29 – Mapa com a localização de unidades amostrais do inventário florestal do talhão 406B, baseado no IAF_{SR} (validação de campo). Mapa para talhão sem estratos de IAF.



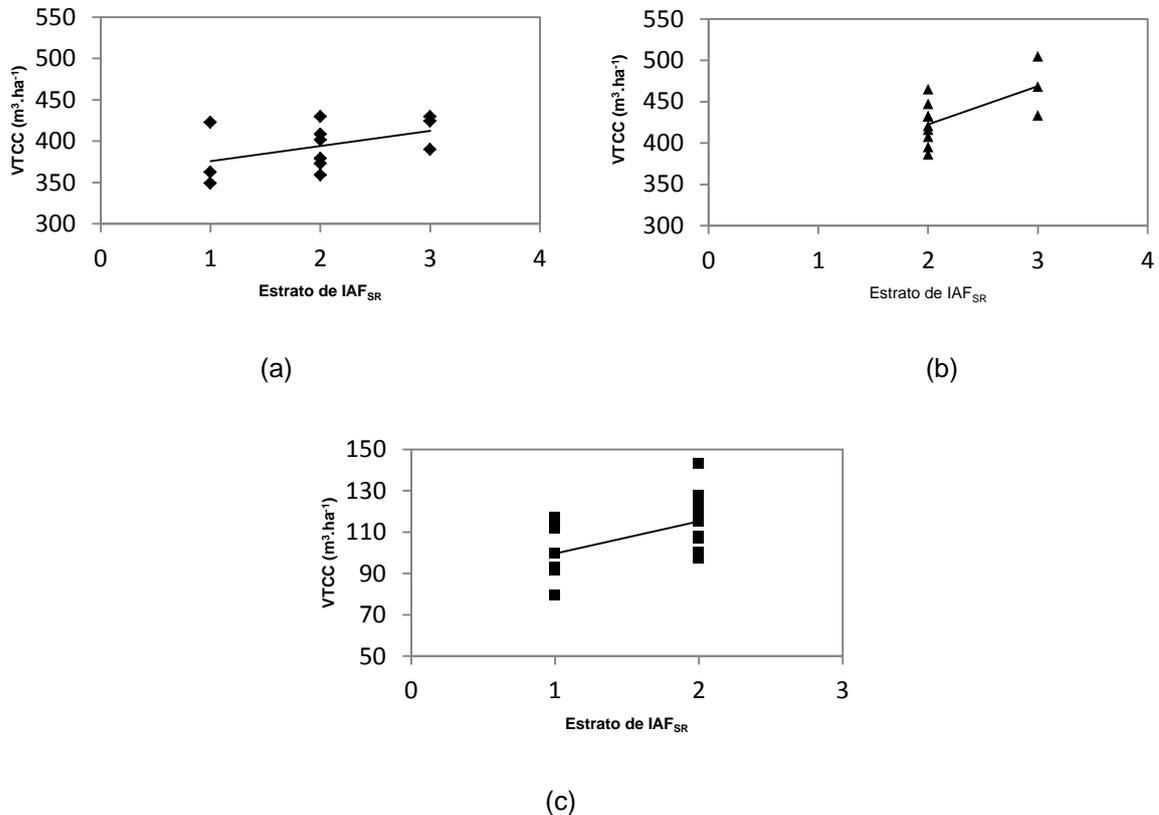
Fonte: Berger, 2014.

IAF_{SR} = índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

Em geral, o erro de inventário estimado em todos os talhões validados foi inferior ao máximo estabelecido (10% para os talhões 126A e 418B, e 15% para os talhões 401B e 406B). Isso indica que a variabilidade entre pixels de IAF_{SR} foi maior que a variabilidade entre as UA do inventário de campo. Para a mesma intensidade de amostragem, a amostra estratificada mostrou menor erro quando comparada à amostra inteiramente aleatória, com exceção do talhão 126A, onde não houve diferença significativa entre os estratos.

Apesar da considerável variabilidade entre UA de um mesmo estrato, principalmente aquela observada no estrato IAF1 do talhão 126A, nas Figuras 30a, 30b e 30c é possível perceber a tendência de aumento do VTCC com o aumento do IAF, o que sugere um bom potencial de uso do IAF_{SR} para a espacialização da produção dentro dos talhões (condições homogêneas de espécie e idade).

Figura 30 – Distribuição dos valores observados de VTCC por unidade amostral no inventário de validação para os talhões com estratos: 126A (a), 418B (b), 401B (c). A linha sólida representa uma equação de tendência.



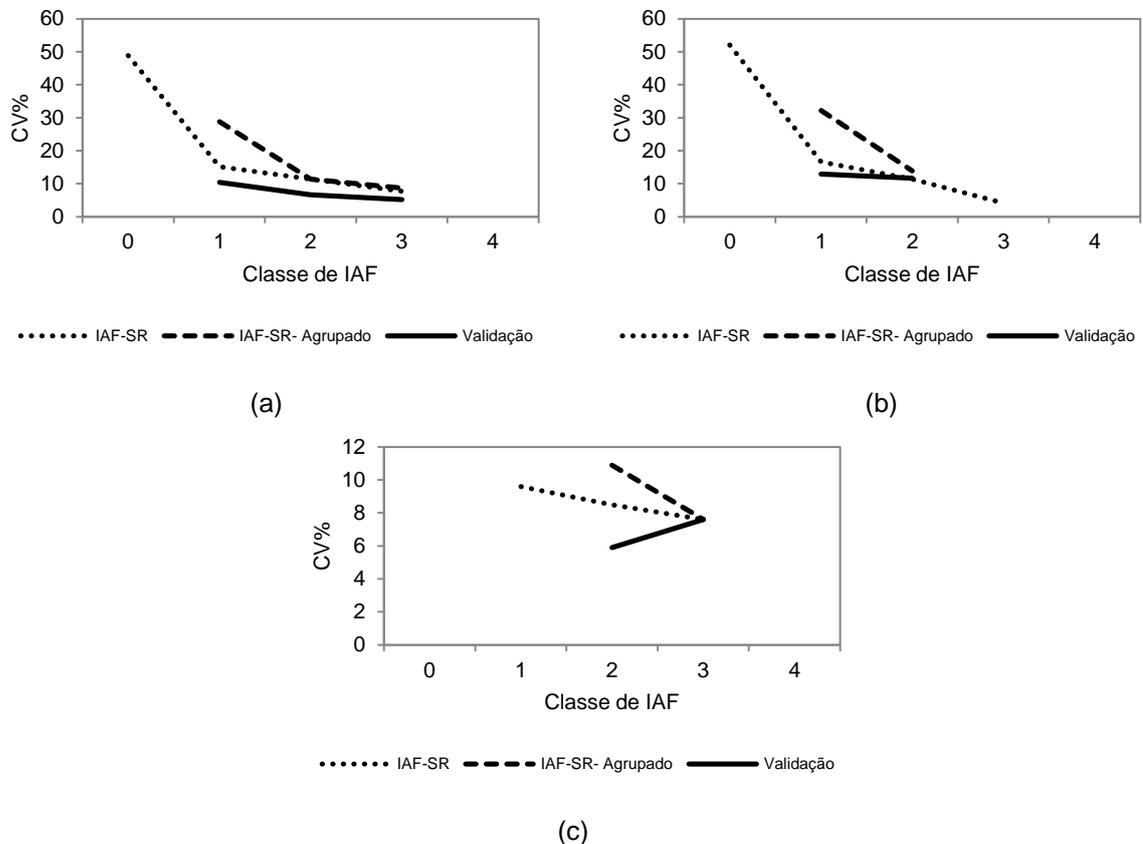
Fonte: Berger, 2014.

VTCC=volume total com casca; IAF_{SR}=índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

De maneira não tão evidente, observa-se uma tendência de diminuição da variabilidade na medida em que aumenta a classe de IAF_{SR}, tanto para o CV_{%IAF} quanto entre as UA do inventário de validação, com exceção do inventário de validação do talhão 418B (Figura 31). Ao analisar os estratos originais, antes da fusão, verifica-se também que a maior variabilidade encontra-se nos pixels classificados com valor zero, com valores em torno de 50% para os talhões 126A e 401B.

Existem vários fatores que podem ter contribuído para que a variabilidade de IAF_{SR} entre pixels resultasse alta. Canavesi, Ponzoni e Valeriano (2010), ao estudarem a influência da topografia na geometria de iluminação de imagens hiperespectrais na precisão de modelos de previsão de volume por SR, encontraram que os erros foram maiores quando essa não foi considerada.

Figura 31 – Comportamento do coeficiente de variação (CV%) para classes de IAF_{SR} , classes de IAF_{SR} agrupados e para o inventário de validação, para os talhões (a) 126A, (b) 401B e (c) 418B.



Fonte: Berger, 2014.

CV%=coeficiente de variação entre pixels; IAF_{SR} =índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto; IAF_{SR} agrupado=classes de IAF de tamanho inferior ao mínimo agrupadas ao estrato imediatamente inferior ou superior; Validação=unidades amostrais do inventário de validação.

Ponzoni (2001) também alerta para a influência do posicionamento e da altura da vegetação (em relação ao ângulo de elevação solar) na reflectância na região do visível, podendo esta ser reduzida pela absorção dos pigmentos das plantas e pelo sombreamento do solo. Na região do infravermelho próximo, a orientação das fileiras exerce menor influência do que na região do visível.

Jensen (2011) enumera uma lista de fatores que podem influenciar na função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF) de um dossel, cujo comportamento anisotrópico interfere na energia incidente sobre este e consequentemente na energia refletida e captada pelo sensor remoto. Os fatores englobam variáveis associadas às fontes de iluminação e de visada, assim como as características dos alvos que podem influenciar na reflectância: vegetação, sub-bosque e solos. Apesar da orientação sistemática das árvores nos talhões e da condição homogênea de espécies e idades, podem ocorrer diversos fatores que

influenciam na BRDF: forma e diâmetro das copas, IAF, DAF, número de árvores, falhas, presença de sub-bosque, tipo de solo (cor, textura, teor de umidade). Esses fatores aliados à resolução espacial do sensor podem aumentar a variação entre os pixels.

McRoberts et al. (2002a) comentam que podem existir erros de estimativas no inventário se os desvios das regressões utilizadas produzirem erros na distribuição das estimativas do atributo florestal utilizado para representar a variável de interesse. Os autores também ressaltam que os recursos necessários para a utilização de imagens orbitais e o desenvolvimento de técnicas de distribuição do atributo florestal devem ser contundentes. Neste sentido, é possível que a falta de ajuste do modelo possa ter contribuído para erros nas estimativas do IAF_{SR} , e para o aumento da variabilidade entre pixels.

Conforme já comentado anteriormente, o efeito de borda pode ter contribuído significativamente para o aumento do $CV\%_{IAF}$ nos talhões (MÄKELÄ; PEKKARINEN, 2004) e deveria ser considerado nas análises.

McRoberts, Liknes e Domke (2014) destacam uma série de fatores que podem ter influenciado na variabilidade de um indicador de cobertura florestal obtido por imagens Landsat 7, utilizado como variável auxiliar para melhorar as estimativas do inventário nacional americano. Alguns deles corroboram os fatores mencionados anteriormente, e outros os complementam: mudanças devidas às diferentes datas das imagens e do inventário; erros de classificação da imagem; erros de estimativas da variável auxiliar; erros de localização das UA; erros de georreferenciamento; erros relacionados às diferenças entre o tamanho das UA de inventário e o tamanho do pixels; erros do banco de dados cadastral.

Por outro lado, os resultados do inventário de campo ou de validação não necessariamente devem ser considerados como a verdade de campo, pois se tratam de amostras, e mesmo em condições de baixa variabilidade podem não representar a população (ver caso do talhão 418B). Cochran (1965) já alertava sobre essa possibilidade, ao ressaltar que não há maneira de garantir o erro esperado com exatidão absoluta. No caso de uma amostra “infeliz” o limite de erro estabelecido pode ser ultrapassado. Segundo Shiver e Borders (1996), todos os procedimentos de cálculo de IF são e devem ser considerados como estimativas e, conforme a probabilidade de confiança estabelecida, existem possibilidades de erro.

Nesse sentido, pode-se inferir que na medida em que aumentou o valor de IAF_{SR} , o $CV\%_{IAF}$ tendeu a igualar-se ao $CV\%_{INV}$, o que indica que a ferramenta poderia gerar melhor desempenho para o IF em condições de maior IAF.

Essa condição pode estar influenciada pela diminuição da presença de outros elementos no pixel, pois em condições de maior IAF a mistura espectral tende a ser menor (maior cobertura do solo, menor reflectância do solo), desde que não exista influência de talhões vizinhos. Ponzoni (2001) comenta que o efeito do solo em condições de $IAF > 3$ é baixo e exerce pouca influência sobre a reflectância da vegetação. De maneira inversa, com a diminuição do IAF há tendência de que a reflectância do dossel se aproxime à reflectância do solo.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, os resultados obtidos mostram que apesar da significativa variabilidade encontrada entre os distintos tipos de solo avaliados ($\alpha=5\%$), o comportamento do IAF_{campo} de acordo com a idade seguiu o padrão típico de variação para o gênero *Eucalyptus*. O ponto de máxima área foliar foi observado em idade próxima aos três anos (IAF_{campo} médio de 3,28), e coincidiu com o maior incremento em volume observado no período ($IP=45,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, aos 3,5 anos).

A correlação entre IP e IAF_{campo} foi positiva ($r=0,63$) e significativa para $P=0,99$, indicando que o aumento do IAF pode explicar o aumento do incremento em volume. Apesar do baixo R^2 (39,3%) e do alto S_{yx} (16,3%), considerou-se a possibilidade de uso do IAF como indicador de produtividade em volume. Neste sentido, a espacialização de dados de IAF poderia ser utilizada para a geração de mapas indicadores de produtividade de sítios, bem como na melhoria da precisão de inventários florestais.

A melhor equação para estimar o IAF a partir dos índices de vegetação de uma imagem do sensor OLI/Landsat8 foi a que utilizou o índice da razão simples (SRI) como variável independente, com $R^2=67,8\%$ e $S_{yx}=12,5\%$. Entretanto, a equação mostrou tendência em superestimar o IAF_{SR} para valores menores a dois. Nos casos em que a reflectância e o IV resultaram baixos (ausência de vegetação), a equação gerou valores não reais de IAF_{SR} .

A utilização do IAF_{SR} para estratificar a população foi eficiente para dois dos três talhões analisados (19,8% e 40,5%), conforme os resultados do inventário de validação. Em geral, houve tendência de diminuição da variação entre pixels de IAF_{SR} e entre UA do inventário de validação na medida em que aumentava o valor da classe de IAF .

A metodologia de estratificação em classes de IAF_{SR} poderia ser considerada adequada, pois foi capaz de detectar diferenças entre estratos para dois dos talhões validados. Além disso, essa metodologia não requereu uma análise mais complexa e permitiu que o tamanho do estrato fosse obtido de uma maneira rápida e fácil pelo somatório dos pixels.

Para o talhão 126A a estratificação por IAF_{SR} não trouxe benefícios ao IF, pois a ANOVA não acusou diferença significativa entre estratos ($\alpha=5\%$), havendo maior variação dentro dos estratos do que entre os mesmos. A maior variação no estrato $IAF1$ pode ter sido ocasionada pela fusão com o estrato $IAF0$.

Para os talhões 401B e 418B, a estratificação por IAF_{SR} trouxe benefícios ao inventário, pois a ANOVA ($\alpha=5\%$) mostrou existir diferenças estatísticas significativas entre os estratos de cada talhão. Para uma mesma intensidade de amostragem, a AE gerou menor erro (5,93% e 4,14%) do que a AIA (6,32% e 4,77%), respectivamente para os talhões 401B e 418B.

A partir da análise do mapa de IAF_{SR} , em um dos talhões (418B) foi possível detectar a existência de um estrato em que não foram instaladas parcelas permanentes de inventário (PPI). A não inclusão das PPI nesse estrato resultou em uma menor variação e conseqüentemente em baixo erro de amostragem em inventário preliminar. Entretanto, na validação da estratificação por IAF_{SR} , a ANOVA mostrou diferenças significativas entre os estratos IAF2 e IAF3, indicando que os estimadores de IF da primeira ocasião foram tendenciosos. Este resultado demonstra que o uso do IAF_{SR} pode fornecer informações valiosas para a melhoria do planejamento e da eficiência do IF, permitindo a espacialização da informação e levando ao conhecimento de características que poderiam passar despercebidas em um inventário de campo convencional. A maior vantagem do processo de estratificação por IAF_{SR} é a possibilidade de diminuir os erros de amostragem ou os custos, pois evita abordagens iniciais às cegas e pode contribuir para diminuir os desvios.

Apesar da eficiência do uso do IAF_{SR} na estratificação de dois dos três casos analisados, o erro de amostragem obtido foi consideravelmente inferior ao estabelecido no planejamento do IF, indicando que a variabilidade do IAF_{SR} foi maior do que a variabilidade entre as amostras do inventário de validação. Esse comportamento também foi evidente para o talhão em que a intensidade de amostragem foi estimada pelo $CV_{IAF}\%$ (406B), resultando em erro de amostragem de 4,94%, consideravelmente inferior ao limite estabelecido ($LE=15\%$).

Nesse sentido, diante da eficiência da estratificação por IAF_{SR} para dois dos talhões avaliados, seria importante analisar as possíveis causas para a alta variabilidade de IAF_{SR} nos talhões. Sugere-se que sejam realizadas análises sobre a possível interferência de pixels de talhões vizinhos, eliminando-os das estimativas de variação entre pixels, definindo uma distância mínima de borda. Também é sugerida a melhoria das estimativas de IAF_{SR} , seja pelo aumento da amostra ou pela análise de outros modelos que pudessem estimar a variável com maior precisão.

Por outro lado, ocorreram algumas inconsistências quanto à relação entre os dados de inventário de campo e a reflectância e IAF_{SR} em alguns talhões. Possivelmente, a presença de nuvens ou outras interferências atmosféricas podem ter contribuído para os resultados de IAF_{SR} negativo em locais onde as estimativas de volume nas parcelas foram válidas, o que impreterivelmente impede o uso da ferramenta para os fins propostos. Desta maneira, destaca-se a importância de uso de imagens livres de nuvens ou outras interferências atmosféricas que possam comprometer as estimativas e o uso da ferramenta para o inventário florestal.

É importante também observar que as unidades amostrais alocadas no campo tenham um bom grau de precisão no georreferenciamento, para evitar problemas de alocação em estratos diferentes.

Ao se analisar o talhão em que a estratificação por IAF não trouxe benefícios ao inventário, considera-se interessante que novos métodos sejam testados. Simulações de novos limiares de IAF_{SR} ou o uso de ferramentas para o processamento de imagens, tais como a geoestatística ou a segmentação (supervisionada ou não supervisionada), poderiam contribuir para ajustar a metodologia e melhorar a eficiência dos estratos.

Sugere-se também o aprofundamento nos estudos sobre o comportamento da função (ou fator) de distribuição da reflectância bidirecional (BRDF) e sua influência sobre a reflectância obtida pelos sensores remotos. Análises da orientação das fileiras de plantio e da disposição das folhas sob diferentes ângulos de iluminação e visada dos sensores poderiam contribuir para o entendimento do comportamento diferenciado da reflectância nos diferentes talhões analisados.

A investigação mais aprofundada das propriedades espectrais da vegetação e suas respostas frente às diferentes condições edafoclimáticas e silviculturais, bem como o acompanhamento da dinâmica do IAF em diferentes idades e estações do ano, poderiam contribuir para a melhoria das estimativas do IF.

O estudo mais detalhado das propriedades das imagens hiperespectrais também poderia ser um caminho para encontrar respostas mais precisas sobre o comportamento da vegetação analisado por sensoriamento remoto. Nesse sentido, os resultados obtidos permitem concluir que ainda há muitas oportunidades em melhorar a eficiência de inventários florestais utilizando os conceitos básicos de amostragem e algumas ferramentas de SR, principalmente no que se refere às técnicas de estratificação. Esses conceitos deveriam ser melhor explorados antes de

serem utilizadas novas ferramentas tecnológicas de maneira indiscriminada, pois não necessariamente implicam em maiores custos e tempo.

REFERÊNCIAS

- ALBAUGH, T. J. et al. Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, v. 44, n. 2, p. 317-328, 1998.
- ALMEIDA, A. C. et al. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation of pulp production. **Forest Ecology and Management**, v. 251, p. 10-21, 2007.
- ALMEIDA, A. C. et al. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1730-1740, 2010.
- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 179–195, 2004.
- ÁLVAREZ, J. et al. Factor influencing the growth of radiata pine plantations in Chile. **Forestry**, v. 86, p. 13-26, 2013.
- AMSKEPLER. Primeiras imagens do satélite Landsat 8, 2013. Disponível em: <<http://www.amskepler.com/2013/03/22/primeiras-imagens-do-landsat-8/>>. Acesso em: 11 Julho 2013.
- ARIAS, D.; CALVO-ALVARADO, J.; DOHRENBUSCH, A. Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 247, p. 185-193, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Conjuntura BRACELPA**. São Paulo, p. 1-5. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE CELULOSE E PAPEL. **Anuário estatístico ABRAF: ano base 2012**. São Paulo, p. 142. 2013.
- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest Measurements**. Singapore: McGraw-Hill, 1994. 408 p.
- BATTAGLIA, M. et al. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. **Tree Physiology**, v. 18, p. 521–528, 1998.
- BERGER, R. et al. **Utilización de índice de área foliar para optimización de inventários forestales**. FOREST WORLD CONGRESS, 13. Buenos Aires: FAO. 2009.
- BERGER, R. et al. Índices de vegetação obtidos de imagens satelitais como ferramenta para o planejamento do inventário florestal. In: CORTE, A. P. D., et al. **Atualidades em Mensuração Florestal**. 1. ed. Curitiba: [s.n.], 2014. p. 359-363.

BERNETT, L. G. Inventário florestal da Klabin. In: SANQUETTA, C. R., et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. p. 361-363.

BERRA, E. F. et al. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 853-864, 2012.

BINKLEY, D. et al. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology and Management**, v. 288, p. 5-13, 2013.

BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.

BULCOCK, H. H.; JEWITT, P. W. Spatial mapping of leaf area index using hyperspectral remote sensing of hydrological applications with a particular focus on canopy intersection. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, p. 383-392, 2010.

BURKHART, H. E. et al. Allocating inventory resources for multiple-use planning. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 8, p. 100-110, 1978.

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.

CANNELL, M. G. R. Physiological basis of wood production: a review. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 4, p. 459-490, 1989.

CHAVES, R. A. et al. Dinâmica de cobertura de dossel de povoamentos de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden submetidos a desrama artificial e desbaste. **Revista Árvore**, v. 31, n. 6, p. 989-998, 2007.

CHEN, J. M. et al. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques and measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D24, p. 29429–29443, 1997.

CHEN, J. M.; CIHLAR, J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. **Remote Sensing of Environment**, v. 55, p. 153-162, 1996.

COCHRAN, W. G. **Técnicas de amostragem**. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1965. 555 p.

COLOMBO, R. et al. Retrieval of leaf area index in different vegetation types using high resolution satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, p. 20-131, 2003.

COUTURIER, S. et al. A model-based performance test for forest classifiers on remote sensing imagery. **Forest Ecology and Management**, v. 257, p. 23-37, 2009.

CUTINI, A.; MATTEUCCI, G.; MUGNOZZA, G. S. Estimation of leaf area index with the Li-Cor 2000 in deciduous forests. **Forest Ecology and Management**, v. 105, p. 55-65, 1998.

DAVI, H. et al. Effect of thinning on LAI variance in heterogeneous forests. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 890-899, 2008.

DOUGHERTY, P. M. et al. Effects of stand development and weather on monthly leaf biomass dynamics of a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stand. **Forest Ecology and Management**, v. 72, p. 213-227, 1995.

DUVEMO, K.; LÄMÅS, T. The influence of forest data quality on planning processes in forestry. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 21, p. 327-339, 2006.

EID, T. Use of uncertain inventory data in forestry scenario models and consequential incorrect harvest decisions. **Silva Fennica**, v. 34, n. 2, p. 89-100, 2000.

EID, T.; GOBAKKEN, T.; NAESSET, E. Comparing stand inventories for large areas based on photo-interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analyses. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 19, p. 512-523, 2004.

ENVI 5.1. Downloads, 2014. Disponível em: <<http://www.envi.com.br/index.php/downloads>>. Acesso em: 26 Maio 2014.

FAN, L. et al. Investigating the relationship between NDVI and LAI in semi-arid grassland in the Inner Mongolia using in-situ measurements. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 95, p. 151-156, 2009.

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

FLORES, F. J. **Using remote sensing data to estimate leaf area index and foliar nitrogen of loblolly pine plantations**. Tese (PhD) – North Carolina State University, Raleigh. [S.l.], p. 102. 2003.

FLORES, F. J. et al. Using multispectral satellite imagery to estimate leaf area and response to silvicultural treatments in loblolly pine stands. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 36, p. 1587-1596, 2006.

FONSECA, A. F. C. Inventário florestal da Suzano. In: SANQUETTA, C. R., et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. p. 369-375.

FOREST NUTRITION COOPERATIVE. **Estimación de área foliar mediante el uso de imágenes satelitales Landsat 5**. [S.l.], p. 15. 2007. (FNC Research Note, 33).

FORRESTER, D. I.; COLLOPY, J. J.; MORRIS, J. D. Transpiration along an age series of Eucalyptus globulus plantations in southeastern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1754-1760, 2010.

GEBRESLASIE, M. T.; AHMED, F. B.; AARDT, J. A. N. Predicting forest structural attributes using ancillary data and ASTER satellite data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 12S, p. S23–S26, 2010.

HANSEN, M. H.; WENDT, D.G. Using classified Landsat Thematic Mapper data for stratification in a statewide forest inventory. In: McROBERTS, R. E.; REAMS, G. A.; VAN DEUSEN, P. C. **Proceedings of the First Annual Forest Inventory and Analysis Symposium**. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research, 2000. p. 20-27.

HERNÁNDEZ, C. et al. Data fusion for high spatial resolution LAI estimation. **Information Fusion**, v. 16, p. 59-67, 2014.

HIRAMATSU, N. A. Inventário florestal da Eucatex – unidade florestal. In: SANQUETTA, C. R., et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. p. 366-368.

HOLOPAINEN, M.; KALLIOVIRTA, J. Modern data acquisition for forest inventories. In: KANGAS, A.; MALTAMO, M. **Forest Inventory: methodology and applications**. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2009. p. 343-362.

HOLOPAINEN, M.; TALVITIE, M. Effect of data acquisition accuracy on timing of stand harvests and expected net present value. **Silva Fennica**, v. 40, n. 3, p. 531-543, 2006.

HOUBORG, R.; ANDERSON, M.; DAUGHTRY, C. Utility of an image-based canopy reflectance modeling tool for remote estimation of LAI and leaf chlorophyll content at the field scale. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 259-274, 2009.

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, 2002.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295-309, 1988.

HUETE, A. R.; JACKSON, R. D.; POST, D. F. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. **Remote Sensing of Environment**, v. 17, p. 37-53, 1985.

HUSCH, B. **Planning a forest inventory**. 1. ed. Rome: FAO, 1971. 121 p.

HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. New York: John Wiley, 1972. 401 p.

JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v. 11, p. 185-200, 1991.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução de J.C. NEVES. 1. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto da vegetação. In: JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução de J.C et al. NEVES. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011. Cap. 11, p. 357-410.

JONCKHEERE, I. et al. Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I: Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, p. 19–35, 2004.

JONCKHEERE, I.; MUYS, B.; COPPIN, P. Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. **Tree Physiology**, v. 25, p. 723–732, 2005.

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.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, p. 209-228, 1997.

LAW, B. E.; WARING, R. H. Remote sensing of leaf area index and radiation intercepted by understory vegetation. **Ecological Applications**, v. 2, n. 4, p. 272-279, 1994.

LE MAIRE, G. et al. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of Eucalyptus plantations. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 586–599, 2011.

LEBLANC, S. G.; CHEN, J. M. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 110, p. 125–139, 2001.

LENCINAS, J. D.; MOHR-BELL, D. Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. **Bosque**, v. 28, n. 2, p. 106-118, 2007.

LEONARDI, I. Imagens do novo satélite Landsat 8 são disponibilizadas. **Mundogeo**, 2013. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2013/06/03/imagens-do-novo-satelite-landsat-8-sao-disponibilizadas/>>. Acesso em: 11 Julho 2013.

LI-COR. **LAI-2000 Plant canopy analyser**. Lincoln, NE, USA: LI-COR Inc., 1992. 198 p.

LIMA, R. T. Inventário florestal da Valor Florestal Gestão de Ativos Florestais Ltda. In: SANQUETTA, C. R., et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. p. 363-366.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2007. 908 p.

LOETSCH, F. Die Waldinventur und ihre bedeutung für Forstpolitik, Betriebswirtschaft und Waldbau. **Silva Fennica**, v. 112, n. 2, p. 1-34, 1963.

LOETSCH, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV, v. 1, 1964. 436 p.

LU, D. The potencial and challenge of remote sensing-based biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 7, p. 1297-1328, 2006.

LU, D. et al. Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. **Forest Ecology and Management**, v. 198, p. 149–167, 2004.

MACIEL, M. N. M. et al. Uso de imagens orbitais na estimativa de parâmetros estruturais de uma floresta primária no município de Paragominas, estado do Pará. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, n. 52, p. 159-178, 2009.

MAHTO, B. **Quantification of forest growing stock using remote sensing data for planning and management: a case study of Tikauly forest in Chitawan district, Nepal**. Asian Conference on Remote Sensing, 21. Singapore: [s.n.]. 2001. p. Disponível em: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/337MAHTO>. Acesso em: 15 maio 2009.

MÄKELÄ, H.; PEKKARINEN, A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. **Forest Ecology and Management**, v. 196, p. 245-255, 2004.

MANDALLAZ, D. **Sampling techniques for forest inventories**. Boca Ratón: Chapman & Hall, 2008. 256 p.

McROBERTS, R. E. et al. Using a land cover classification based on satellite imagery to improve the precision of forest inventory area estimates. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, p. 36-44, 2002a.

McROBERTS, R. E. et al. Using satellite imagery as ancillary data for increasing the precision of estimates for the Forest Inventory and Analysis program of the USDA Forest Service. **Canadian Journal for Forest Research**, v. 36, p. 2968-2980, 2006.

McROBERTS, R. E.; LIKNES, G. C.; DOMKE, G. M. Using a remote sensing-based, percent tree cover map to enhance forest inventory estimation. **Forest Ecology and Management**, v. 331, p. 12–18, 2014.

McROBERTS, R. E.; NELSON, M. D.; WENDT, D. G. Stratified estimation of forest area using satellite imagery, inventory data, and the k-Nearest Neighbors technique. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, p. 457-468, 2002b.

MEUNIER, I. M. J.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. **Inventário florestal: programas de estudo**. Recife: Imprensa Universitária da UFRPE, 2001. 189 p.

MORATAYA, R. et al. Foliage biomass sapwood (area and volume) relationships of *Tectona grandis* L.F. and *Gmelina arborea* Roxb.: silvicultural implications. **Forest Ecology and Management**, v. 113, p. 231–239, 1999.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 4 ed. atual. e ampl. ed. Viçosa: UFV, 2011. 422 p.

NAESSET, E. Estimating timber volume of forest stand using airborne laser scanning data. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, p. 246-253, 1997.

NAESSET, E. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 88-99, 2002.

NAESSET, E.; BJERKNES, K. O. Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. **Remote Sensing of Environment**, v. 78, p. 328-340, 2001.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Landsat 8. Operational Land Imager, 2013. Disponível em: <http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/main/LDCM_OLI_intro.html>. Acesso em: 11 Julho 2013.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4ª Ed. ed. São Paulo: Blücher, 2010.

PEDUZZI, A. **Leaf area assessments of the overstory and understory vegetation in pine plantations located in south Georgia and North Florida, US**. Dissertação (Mestrado) – North Carolina State University, Raleigh. [S.l.], p. 42. 2007.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná e Universidade Federal de Santa Maria, 1993. 250 p.

PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: MENEZES, P. R.; NETTO, J. S. M. **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. 1. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2001. p. 155-199.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010. 127 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2ª ed. Atualizada e ampliada. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.

RAUTIAINEN, M. Retrieval of Leaf area index for a coniferous forest by inverting a forest reflectance model. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, p. 295-303, 2005.

RIBEIRO, J. R. D. P. **A detecção remota no inventário florestal: Análises das potencialidades da utilização das imagens de satélite**. Dissertação de Mestrado. Ciências e Sistemas de Informação Geográfica. Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa. [S.l.], p. 138. 2007.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto n. 42.099, de 31 de dezembro de 2002. Declara as espécies da flora nativa ameaçadas de extinção no Estado do Rio Grande do Sul e dá outras providências., 2002. Disponível em: <http://www.al.rs.gov.br/legis/M010/M0100099.ASP?Hid_Tipo=TEXTO&Hid_TodasNormas=320&hTexto=&Hid_IDNorma=320>. Acesso em: 1 Dezembro 2013.

RODRÍGUEZ, L. C. E. et al. Inventário florestal com tecnologia laser aerotransportada de plantios de Eucalyptus spp. no Brasil. **Ambiência**, v. 6, n. Ed. Especial, p. 67-80, 2010.

RUBILAR, R. A. et al. Influences of silvicultural manipulations on above- and belowground biomass accumulations and leaf area in young *Pinus radiata* plantations, at three contrasting sites in Chile. **Forestry**, v. 86, p. 27-38, 2013.

RUNNING, S. W. et al. Remote sensing of coniferous forest leaf area. **Ecology**, v. 67, n. 1, p. 273-276, 1986.

SALVADOR, R.; PONS, X. On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean forest inventories. **Forest Ecology and Management**, v. 104, p. 193-208, 1998.

SANQUETTA, C. R. et al. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. 406 p.

SANTOS, E. B. Inventário florestal da Arauco Florestal Arapotí. In: SANQUETTA, C. R., et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. p. 381-387.

SCHREUDER, H. T.; ERNST, R.; RAMÍREZ-MALDONADO, H. **Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources**. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2004. 111 p.

SCHREUDER, H. T.; GREGOIRE, T. G.; WOOD, G. B. **Sampling methods for multiresource forest inventory**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M. **Inventário Florestal**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1997.

SHIVER, B. D.; BORDERS, B. E. **Sampling techniques for forest resource inventory**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

SIVANPILLAI, R. et al. Estimation of managed loblolly pine stand age and density with Landsat ETM+ data. **Forest Ecology and Management**, v. 223, p. 247-254, 2006.

SMETHURST, P. et al. Fertilizer effects on LAI of four Eucalyptus nitens plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 176, p. 531-542, 2003.

SONG, C. Optical remote sensing of forest leaf area index and biomass. **Progress in Physical Geography**, v. 37, n. 1, p. 98-113, 2013.

STENBERG, P. et al. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in finnish pine and spruce stands. **Silva Fennica**, v. 38, n. 1, p. 3-14, 2004.

STORE, R.; ANTIKAINEN, H. Using GIS-based multicriteria evaluation and path optimization for effective forest field inventory. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 34, p. 153–161, 2010.

SYDOW, V. G. **Vegetação de sub-bosque em monocultura de Eucalyptus saligna Sm. (Myrtaceae)**. Dissertação (Mestrado). Ecologia. Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [S.l.], p. 76. 2010.

TROTTER, C. M.; DYMOND, J. R.; GOULDING, C. J. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 2209– 2223, 1997.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 8., 2013. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 17 Outubro 2013.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 8, 2014. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov>. Acesso em: 15 Abril 2014.

VAN TUYL, S. et al. Variability in net primary production and carbon storage in biomass across Oregon forests—an assessment integrating data from forest inventories, intensive sites, and remote sensing. **Forest Ecology and Management**, v. 209, p. 273-291, 2005.

WARING, R. H.; COOPS, N. C.; LANDSBERG, J. J. Improving predictions of forest growth using the 3-PGS model with observations made by remote sensing. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1722-1729, 2010.

WEBER, K. S. Inventário florestal da International Paper. In: SANQUETTA, C. R., et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2014. p. 375-381.

WEZYK, P. The integration of the terrestrial and airborne laser scanning technologies in the semi-automated process of retrieving selected trees and forest stands parameters. **Ambiência**, v. 8, n. Ed. Especial, p. 531-546, 2012.

XAVIER, A. C. et al. **Estimativa de IAF de plantações de eucaliptos a partir de dados TM/LANDSAT**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. Santos: INPE. 1998.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Variação do índice de área foliar de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002.

YAMANE, T. **Elementary sampling theory**. New York: [s.n.], 1967. 363 p.

APÊNDICE A – Análise de variância para o efeito de tipos de solo sobre o IAF_{campo} de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith

Tabela 17 - Análise de variância para o efeito de dois tipos de solo sobre o IAF_{campo} de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith, aos três anos de idade, em espaçamento 3 x 3m.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Prob > F
Tipo de solo	1	1.459	1.459	9.20	
Resíduo	8	1.269	0.159		
Total	9	2.729			

CV%=12.2%

Tabela 18 - Análise de variância para o efeito de dois tipos de solo sobre o IAF_{campo} de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith, aos cinco anos de idade, em espaçamento 3,5 x 2,14 m.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Prob > F
Tipo de solo	2	18.51	9.255	67.15	
Resíduo	11	1.52	0.138		
Total	13	20.03			

CV%=13.6%

Tabela 19 - Análise de variância para o efeito de dois espaçamentos (3,50 x 2,14m e 3,00 x 2,50m) sobre o IAF_{campo} de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith, aos cinco anos de idade, em solos do tipo AVADT.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Prob > F
Espaçamento	1	0.35	0.35	3.48	
Resíduo	4	0.40	0.10		
Total	5	0.75			

CV%=12.4%

Tabela 20 - Análise de variância para o efeito de dois espaçamentos (3,00 x 3,00m e 3,00 x 2,50m) sobre o índice de área foliar (IAF) de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith, aos seis anos de idade, em solos do tipo AVADT.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Prob > F
Espaçamento	1	0.252	0.252	2.33	
Resíduo	9	0.974	0.108		
Total	10	1.226			

CV%=12.4%

Em que: GL=graus de liberdade; SQ=soma de quadrados; QM=quadrado médio; F=valor de F calculado; Prob>F=valor de significância.

AVADT= Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico Típico; PHDA= Planossolo Hidromórfico Distrófico Arênico; IAF_{campo}= índice de área foliar medido no campo.

Fonte: Berger, 2014.

APÊNDICE B – Análise de variância para a relação entre o IAF_{campo} e a idade de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith.

Causa de Variação	GL	SQ	QM	F	Valor p
Regressão	3	11.225800	3.741935	17.89503	<0.001
Resíduo	40	8.364186	0.209105		
Total	43	19.589990			

Em que: GL=graus de liberdade; SQ=soma de quadrados; QM=quadrado médio; F=valor de F calculado; Valor p=valor de significância;

IAF_{campo}= índice de área foliar medido no campo.

Fonte: Berger, 2014.

APÊNDICE C – Análise de variância para a relação entre o incremento periódico em volume (IP) e o IAF_{campo} de plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith, em diferentes idades.

Causa de Variação	GL	SQ	QM	F	Prob>F
Regressão	1	348.1998	348.1998	11.66	0.0031
Resíduo	18	537.7253	29.87363		
Total	19	885.9251			

Em que: GL=graus de liberdade; SQ=soma de quadrados; QM=quadrado médio; F=valor de F calculado; Valor p=valor de significância;

IAF_{campo}= índice de área foliar medido no campo.

Fonte: Berger, 2014.

APÊNDICE D – Estimadores de Inventário Florestal para o Horto Florestal Barba Negra em junho de 2013. (continua).

Talhão	ÁREA	IDADE (anos)	UA	VTCC (m ³ .ha ⁻¹)	N (árvo.ha ⁻¹)	h _d (m)	h (m)	DAP (cm)	G (m ² .ha ⁻¹)
110B	30.05	5	1	291.86	1200	25.52	23.48	16.65	27.11
110B		5	2	327.63	1500	25.61	22.83	16.06	31.42
110B		5	3	263.53	1125	23.98	23.21	16.83	25.42
110B		5	4	320.61	1525	25.20	22.74	15.65	30.50
110B		5	5	295.5	1300	25.18	22.92	16.33	28.17
110B		5	6	236.33	1275	22.98	20.48	15.18	24.57
110B		5	7	204.07	1075	21.25	20.52	16.14	22.29
110B		5	8	225.77	1125	23.05	20.36	15.80	23.53
115B	29.28	5	1	280.17	1275	26.30	22.31	15.65	26.10
115B		5	2	238.79	950	22.88	21.76	17.83	24.28
115B		5	3	243.08	975	22.93	22.08	17.78	24.66
122A	24.79	3	1	75.24	925	15.13	14.38	12.59	11.71
122A		3	2	91.35	975	16.05	14.54	13.44	14.02
122A		3	4	99.91	900	16.75	15.74	13.98	14.11
121A	19.07	3	1	144.06	1250	17.53	17.20	13.78	18.87
121A		3	2	160.12	1300	18.32	17.57	14.17	20.58
121A		3	3	133.45	1150	17.70	16.70	14.00	17.94
121A		3	4	179.95	1475	19.40	17.92	13.75	22.36
121A		3	5	101.94	925	16.70	16.25	13.72	14.03
126A	26.3	6	1	312.44	1200	26.00	23.94	17.11	28.50
126A		6	2	323.59	1175	27.02	24.51	17.28	28.57
126A		6	3	324.16	1125	26.60	24.90	17.91	28.85
126A		6	4	268.83	925	25.10	24.40	18.40	24.84
126A		6	5	318.21	1200	26.15	23.57	17.29	29.30
126A		6	6	317.71	950	27.07	25.5	19.15	27.82
126A		6	7	354.11	1025	29.18	25.83	18.82	29.68
126A		6	8	344.07	1050	27.20	25.38	18.81	29.89
129A	24.83	5	1	184.45	1275	22.75	18.11	13.91	21.01
129A		5	2	246.6	1550	23.60	21.28	14.27	25.52
129A		5	3	284.28	1425	24.10	22.76	15.43	27.53
131D	12.44	3	3	128.17	1125	18.05	16.43	13.51	16.91

APÊNDICE D – Estimadores de Inventário Florestal para o Horto Florestal Barba Negra em junho de 2013. (continua)

Talhão	ÁREA	IDADE (anos)	UA	VTCC (m ³ .ha ⁻¹)	N (ár.v.ha ⁻¹)	h _d (m)	h (m)	DAP (cm)	G (m ² .ha ⁻¹)
147A	22.49	5	1	267.51	1250	23.90	21.33	16.21	27.11
147A		5	2	281.4	1175	25.43	22.50	16.63	26.62
147A		5	3	225.81	1300	22.48	21.01	15.01	23.75
150A	37	3	1	126	1050	17.27	16.64	14.36	17.10
150A		3	2	128.44	1100	17.23	16.52	14.19	17.51
150A		3	3	127.85	1100	16.82	16.44	14.22	17.57
150A		3	4	126.21	1075	17.18	16.32	14.29	17.33
163B	22.04	5	1	283.37	1575	24.88	22.74	14.70	27.54
163B		5	2	159.92	975	22.30	20.09	14.57	17.13
209D	36.29	6	1	288.82	1100	26.80	24.67	17.02	25.72
209D		6	2	325.43	1225	27.13	25.03	16.92	28.46
209D		6	3	303.32	1350	24.23	22.46	16.25	29.24
209D		6	4	337.78	1275	27.60	25.30	16.86	29.33
209D		6	5	319.69	1450	27.75	22.85	15.18	28.73
272C	56.81	6	1	350.01	1050	29.2	27.61	18.19	28.12
272C		6	2	300.26	1050	28.00	24.86	17.25	25.71
272C		6	3	430.27	1300	28.98	25.08	18.22	35.94
272C		6	4	402.32	1200	30.13	27.02	18.27	32.46
272C		6	5	390.51	1100	29.63	27.92	18.81	31.17
272C		6	6	389.34	1125	28.88	26.85	18.79	32.02
272C		6	7	274.08	1025	24.98	24.07	17.26	24.89
272C		6	8	185.28	1025	22.23	17.68	15.25	20.91
272C		6	9	281.87	1075	25.35	22.26	17.64	27.25
301A	21.2	8	1	458.6	900	33.08	29.28	21.10	33.34
301A		8	2	379.09	625	31.13	27.76	24.30	29.76
301A		8	3	497.06	875	31.75	30.32	22.71	36.42
341A	23.57	5	1	190.27	1275	22.27	19.81	14.42	21.33
341A		5	2	215.53	1350	22.10	20.55	14.75	23.46
341A		5	3	224.67	1275	20.11	20.68	15.57	24.58
341A		5	4	223.24	1350	22.05	21.07	14.82	23.72
348A	20.62	5	1	161.21	1000	20.40	19.28	14.82	18.07

APÊNDICE D – Estimadores de Inventário Florestal para o Horto Florestal Barba Negra em junho de 2013. (continua)

Talhão	ÁREA	IDADE (anos)	UA	VTCC (m ³ .ha ⁻¹)	N (árvo.ha ⁻¹)	h _d (m)	h (m)	DAP (cm)	G (m ² .ha ⁻¹)
348A		5	2	175.8	1075	22.32	19.25	14.74	19.43
348A		5	3	189.69	1075	21.48	20.46	15.46	20.59
348A		5	4	168.08	1025	21.50	19.71	14.85	18.48
351A	39.21	5	1	178.4	825	24.05	22.70	16.16	17.35
351A		5	2	255.27	1225	24.80	21.89	15.57	24.7
351A		5	3	217.29	1050	23.23	22.3	16.01	21.63
351A		5	4	225.09	900	24.65	22.54	17.07	21.38
401B	55.07	3	1	39.99	1100	11.30	10.48	9.86	8.52
401B		3	2	25.09	1150	9.05	8.72	8.34	6.40
401B		3	3	40.44	1150	11.75	10.61	9.52	8.42
401B		3	4	34.26	1175	11.25	9.73	8.85	7.59
406B	18.45	6	1	255.28	1150	23.95	21.39	16.60	25.95
406B		6	2	279.59	1300	24.27	21.97	15.93	27.51
406B		6	3	246.68	1175	23.95	22.25	15.73	24.03
407C	28.37	6	1	280.34	1325	24.63	21.66	15.9	27.72
407C		6	2	316.37	1250	25.20	23.17	17.23	30.00
407C		6	3	263.15	1350	23.88	21.17	15.41	26.6
407C		6	4	292.55	1325	24.80	21.64	16.06	28.5
407D	47.5	3	1	64.05	1100	13.57	12.75	11.24	11.15
407D		3	2	50.35	1000	13.18	12.21	10.74	9.24
407D		3	3	53.58	1050	13.82	12.54	10.57	9.48
407D		3	4	76.48	1150	13.93	13.21	11.87	12.94
407D		3	5	56.48	1000	13.48	12.39	11.34	10.22
407D		3	6	76.91	1125	13.55	13.28	12.08	13.05
407D		3	7	67.29	1175	13.68	12.82	11.19	11.73
407D		3	8	79.29	1225	14.10	13.44	11.57	13.15
407D		3	9	85.27	1225	14.7	13.48	11.97	14.08
410A	57.66	3	1	69.88	1075	13.32	12.65	11.98	12.36
410A		3	2	60.22	1025	14.03	12.76	11.35	10.52
410A		3	3	56.93	1125	12.72	12.05	10.88	10.60
410A		3	4	54.03	1025	12.85	12.13	11.02	9.97

APÊNDICE D – Estimadores de Inventário Florestal para o Horto Florestal Barba Negra em junho de 2013. (final)

Talhão	ÁREA	IDADE (anos)	UA	VTCC (m ³ .ha ⁻¹)	N (ár.v.ha ⁻¹)	h _d (m)	h (m)	DAP (cm)	G (m ² .ha ⁻¹)
410A		3	5	46.59	1075	12.57	11.57	10.14	8.92
413D	10.51	7	1	362.44	1075	32.70	26.77	18.00	28.67
413D		7	2	270.99	850	29.30	24.57	17.58	22.43
413D		7	3	322.94	1200	30.75	24.46	16.27	26.91
413D		7	4	329.46	1050	30.10	25.01	17.55	27.34
413D		7	5	399.17	975	30.68	26.32	19.60	31.54
413D		7	6	354.19	950	30.55	26.59	19.20	28.61
413D		7	7	385.13	1025	32.30	27.09	18.40	29.41
413D		7	8	336.97	1000	31.38	25.30	18.02	27.31
418B	75.81	8	1	333.15	1025	27.10	23.87	18.60	29.56
418B		8	2	366.28	1050	30.07	26.44	18.60	29.89
418B		8	3	352.9	975	30.10	26.75	18.91	28.55
418B		8	4	351.05	875	30.38	27.75	19.68	27.63
418B		8	5	329.19	875	29.01	25.78	19.67	27.59
418B		8	6	324.93	950	28.98	23.89	18.63	27.83
433B	71.12	5	1	167.64	1150	20.15	19.41	14.39	19.17
433B		5	2	71.84	1250	15.05	13.36	10.76	11.80
433B		5	3	204.4	1275	21.15	19.77	14.82	22.76
433B		5	4	224.28	1400	20.65	19.20	15.16	25.91
433B		5	5	203.43	1200	21.68	20.33	15.33	22.43
433B		5	6	197.78	1275	21.68	19.59	14.54	22.16
433B		5	7	161.08	1300	18.32	17.35	14.04	20.65
433B		5	8	225.13	1350	21.38	19.14	14.91	25.12
433B		5	9	203.73	1325	20.57	19.85	14.68	22.95
433B		5	10	148.57	1175	19.55	17.73	13.71	18.22

Em que: VTCC=volume total com casca; N=número de árvores; h_d=altura dominante; h=altura total; DAP=diâmetro a altura do peito; G=área basal.

Fonte: Berger, 2014.

APÊNDICE E – Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. (continua)Tabela 21 – Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 115B.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	1	589.8	589.88	3155.8	0.0001
Dentro dos Estratos	318	59.4	0.19		
Total	319	649.3			

CV%=16,2%

Tabela 22 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 126A.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	2	779.9	389.96	3461.9	0.0001
Dentro dos Estratos	284	32.0	0.11		
Total	286	811.9			

CV%=13,9%

Tabela 23 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 132B.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	1	224.8	224.83	2050.4	0.0001
Dentro dos Estratos	302	33.1	0.11		
Total	303	257.9			

CV%=19,7%

Tabela 24 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 163B.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	1	218.1	218.08	1700.2	0.0001
Dentro dos Estratos	242	31.0	0.13		
Total	243	249.1			

CV%=17,6%

Tabela 25 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 209D.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	1	404.1	404.12	2601.0	0.0001
Dentro dos Estratos	400	62.1	0.15		
Total	401	466.2			

CV%=19,8%

Tabela 26 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 272C.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	2	1396.3	698.15	1236.2	0.0001
Dentro dos Estratos	614	346.8	0.56		
Total	616	1743.1			

CV%=30,2%

Tabela 27 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 401B.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	1	616.9	616.89	3736.9	0.0001
Dentro dos Estratos	597	98.5	0.16		
Total	598	715.4			

CV%=20,8%

APÊNDICE E – Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. (Termina)

Tabela 28 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 407D.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	1	1027.4	1027.40	4010.1	0.0001
Dentro dos Estratos	524	134.2	0.26		
Total	525	1161.6			

CV%=17,0%

Tabela 29 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 410A.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	1	280.0	280.01	2091.1	0.0001
Dentro dos Estratos	576	77.1	0.13		
Total	577	357.1			

CV%=16,2%

Tabela 30 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 418B.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	1	641.6	641.62	10806.0	0.0001
Dentro dos Estratos	835	49.6	0.06		
Total	836	691.2			

CV%=10,5%

Tabela 31 - Análise de variância da estratificação do IAF_{SR}. para o talhão 433B.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr > F
Entre Estratos	2	2029.6	1014.80	12543.0	0.0001
Dentro dos Estratos	779	63.1	0.08		
Total	781	2092.7			

CV%=10,7%

Em que: GL=graus de liberdade; SQ=soma de quadrados; QM=quadrado médio; F=valor de F calculado; Prob>F=valor de significância.

IAF_{SR}= índice de área foliar estimado por sensoriamento remoto.

Fonte: Berger, 2014.

APÊNDICE F – Estimadores de inventário de validação de campo para os talhões com estratos de IAF_{SR}.

Estatística	TALHÃO									
	126A				401B			418B		
	IAF1	IAF2	IAF3	Total	IAF1	IAF2	Total	IAF2	IAF3	Total
Área (ha)	7.65	12.15	6.03	25.83	27.09	26.82	53.91	69.21	6.12	75.33
N _h	191.25	303.75	150.75	645.75	677.25	670.5	1347.75	1730.25	153	1883.25
n _h	3	6	3	12	8	12	20	9	3	12
f _h	0.016	0.020	0.020		0.012	0.018		0.005	0.020	
W _h	0.296	0.470	0.234	1	0.503	0.497	1	0.919	0.081	1
\bar{x}_h	378.03	391.75	414.59		99.62	115.23		422.52	468.81	
s _h ²	1554.19	676.36	465.93		166.30	183.47		618.67	1272.87	
s _h	39.42	26.01	21.58		12.90	13.54		24.87	35.68	
W _h · \bar{x}_h	111.96	184.27	96.79	393.02	50.06	57.33	107.39	388.19	38.09	426.28
W _h ²	0.088	0.221	0.054		0.252	0.247		0.844	0.007	
W _h ² · (s _h ² /n _h)	45.44	24.94	8.46	78.84	5.25	3.78	9.03	58.02	2.80	60.83
Erro padrão	8.88				3.01			7.80		
Estimativa negl										
g _h	1.2E+04	1.5E+04	7.4E+03		5.7E+04	3.7E+04		3.3E+05	7.6E+03	
g _h · s _h ²	1.9E+07	1.0E+07	3.5E+06	3.2E+07	9.4E+06	6.7E+06	1.6E+07	2.0E+08	9.7E+06	2.1E+08
g _h ²	1.4E+08	2.3E+08	5.5E+07		3.2E+09	1.4E+09		1.1E+11	5.8E+07	
g _h ² · (s _h ²) ²	3.5E+14	1.0E+14	1.2E+13		8.9E+13	4.5E+13		4.2E+16	9.5E+13	
[g _h ² · (s _h ²) ²] / (n _h - 1)	1.7E+14	2.1E+13	6.0E+12	2.0E+14	1.3E+13	4.1E+12	1.7E+13	5.2E+15	4.7E+13	5.3E+15
ngl	5.2 ≈ 6				15.5 ≈ 16			8.7 ≈ 9		
t (95%)	2.447				2.120			2.262		
E _a	21.73				6.37			17.64		
E _r (%)	5.53				5.93			4.14		
IC	371.30				101.00			408.60		
	414.75				113.76			443.92		
n										
W _h · s _h	11.67	12.23	5.04	28.95	6.48	6.74	13.22	22.85	2.90	25.75
W _h · s _h ²	460.30	318.15	108.77		83.57	91.27		568.41	103.41	
W _h · s _h ² / N	0.713	0.493	0.168	1.374	0.062	0.068	0.130	0.302	0.055	0.357
LE=10%										
n ₁	3				7			2		
n ₂	11				10			59		
n ₃	3				8			2		
n ₄	11				9			59		
n ₅										
n _d (Neyman)				5	5	5	9			4

Fonte: Berger, 2014.

APÊNDICE G – Análise de variância da estratificação da validação de campo.

Tabela 32 - Análise de variância da estratificação da validação de campo para o talhão 126A.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F _{calc.}	F _{crítico} (α=5%)
Entre Estratos	2	2079.8	1039.90	1.261 ^{ns}	4.26
Dentro dos Estratos	9	7422.1	824.67		
Total	11	9501.9			

Fonte: Berger, 2014.

* Significativo; ^{ns} Não significativo, ao nível α=5%.

Tabela 33 - Análise de variância da estratificação da validação de campo para o talhão 401B.

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F _{calc.}	F _{crítico} (α=5%)
Entre Estratos	1	1220.44	1220.44	6.903*	4.41
Dentro dos Estratos	18	3182.24	176.79		
Total	19	4402.68			

Fonte: Berger, 2014.

* Significativo; ^{ns} Não significativo, ao nível α=5%.

Tabela 34 - Análise de variância da estratificação da validação de campo para o talhão 418B.

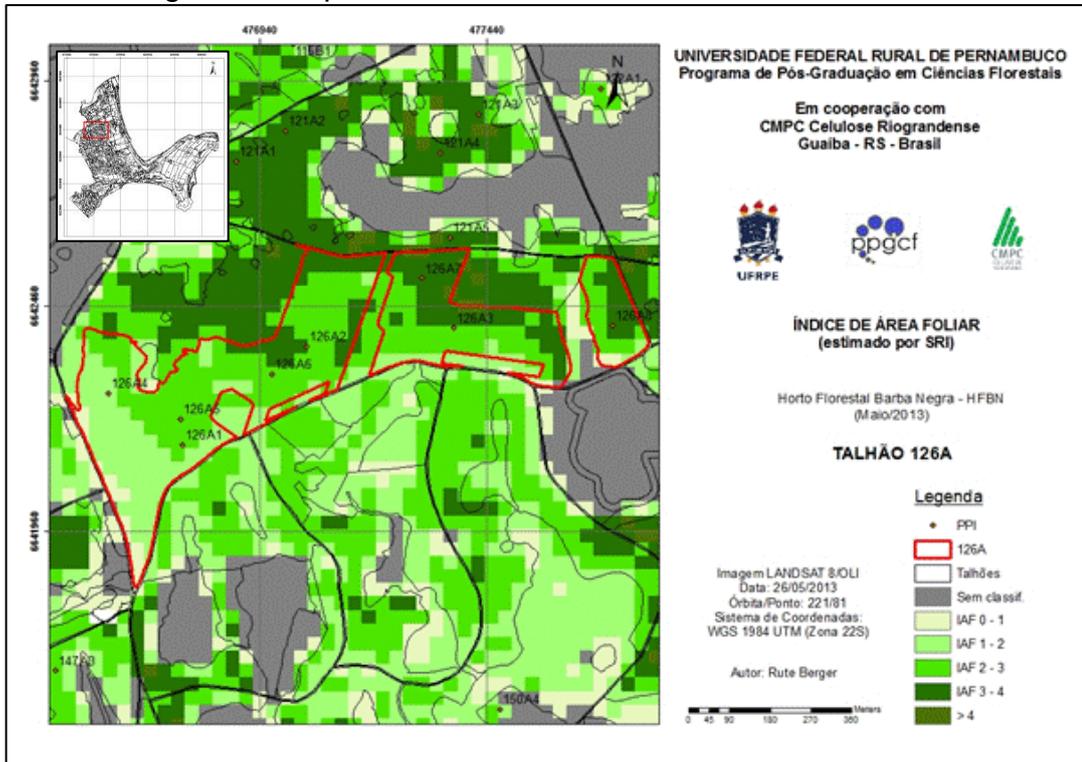
Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F _{calc.}	F _{crítico} (α=5%)
Entre Estratos	1	5554.31	5554.31	7.411*	4.96
Dentro dos Estratos	10	7495.10	749.51		
Total	11	13049.41			

Fonte: Berger, 2014.

* Significativo; ^{ns} Não significativo, ao nível α=5%.

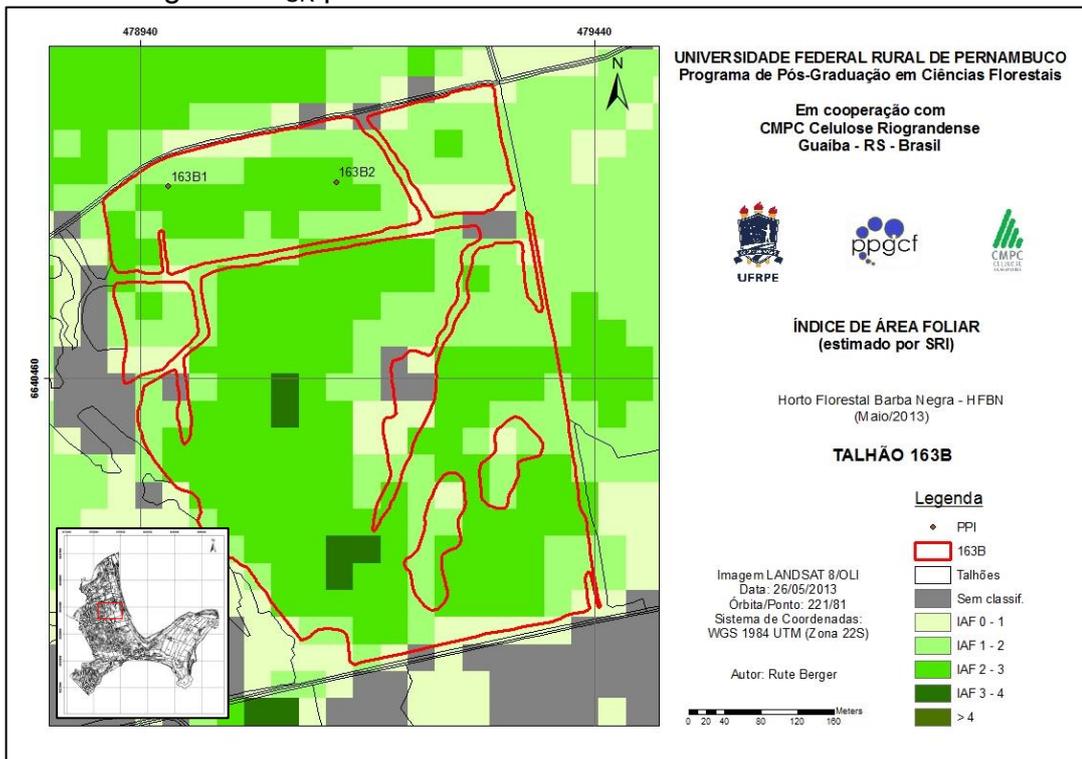
APÊNDICE H – Imagem IAF_{SR} dos talhões com possibilidade de estratificação no campo.

Figura 32 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 126A.



Fonte: Berger, 2014.

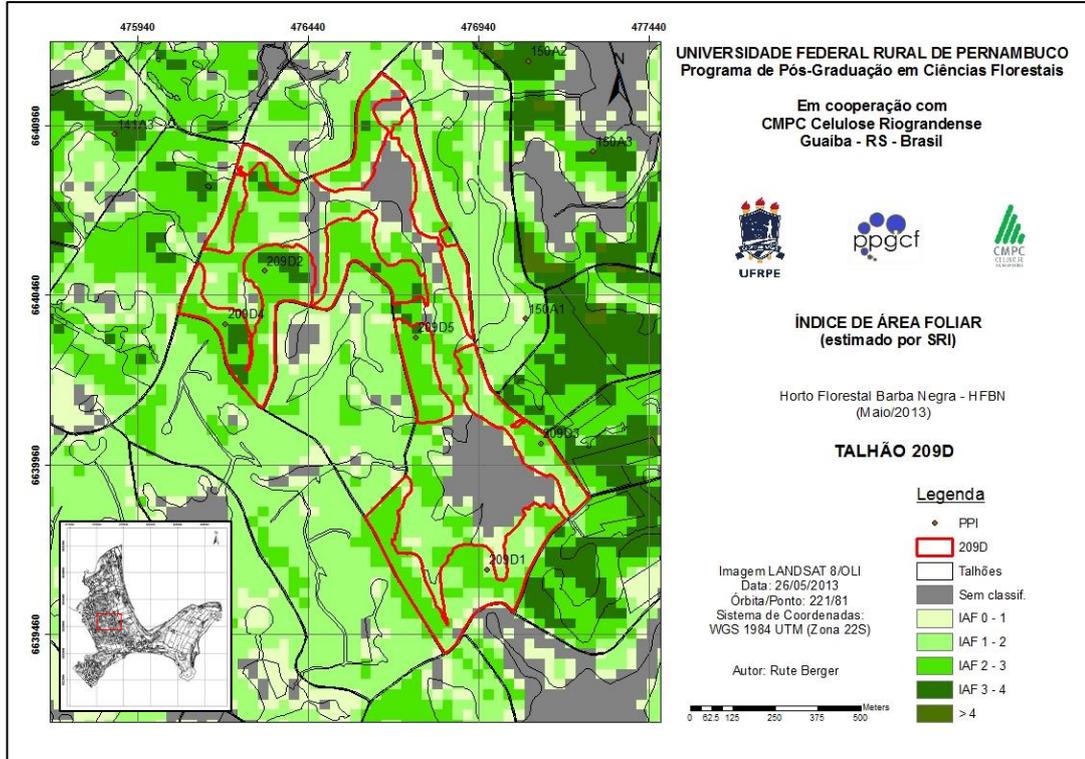
Figura 33 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 163B.



Fonte: Berger, 2014.

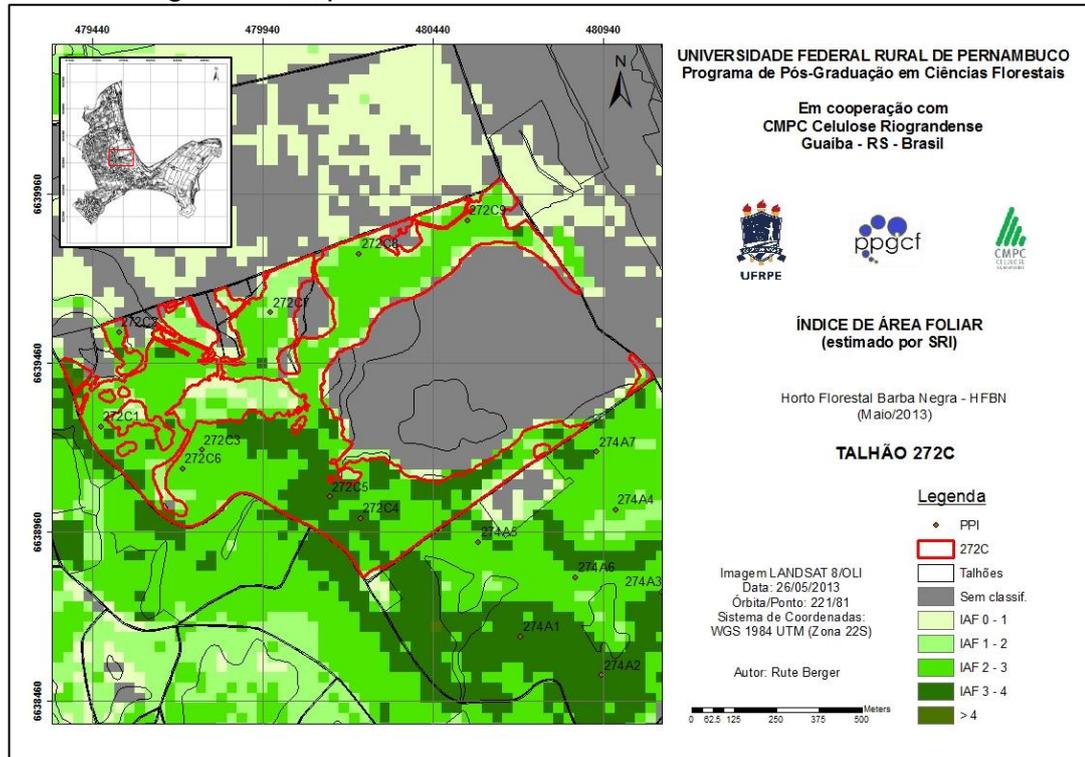
APÊNDICE H – Imagem IAF_{SR} dos talhões com possibilidade de estratificação no campo.

Figura 34 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 209D.



Fonte: Berger, 2014.

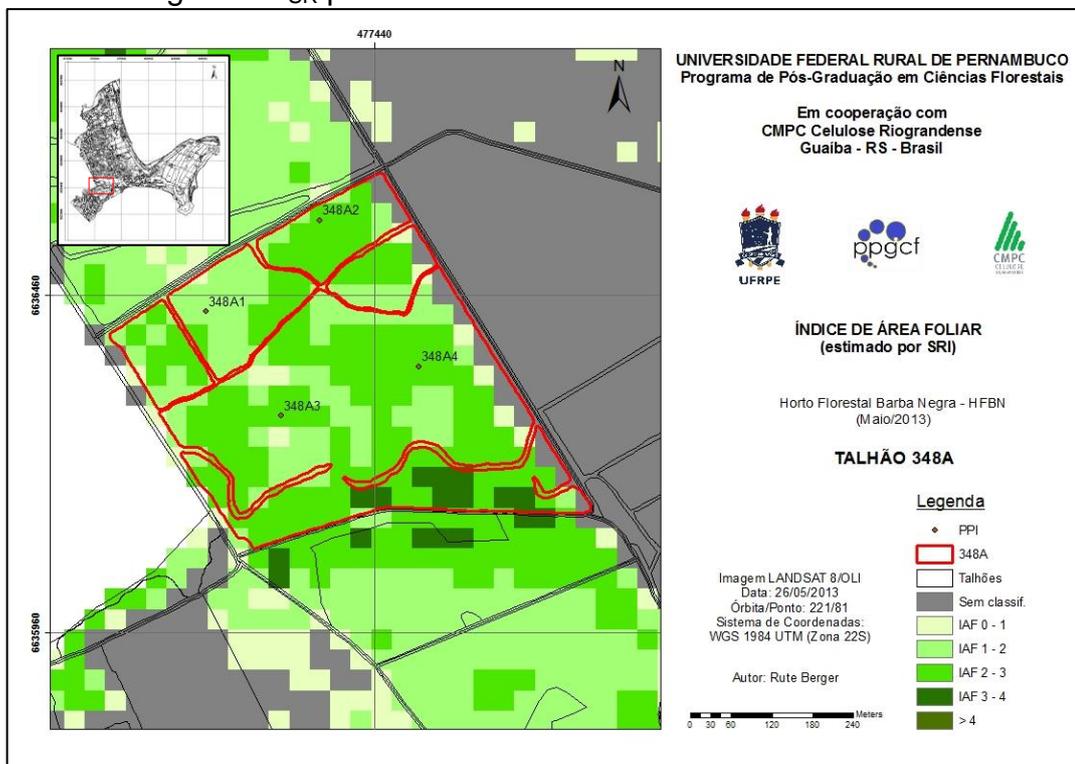
Figura 35 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 272C.



Fonte: Berger, 2014.

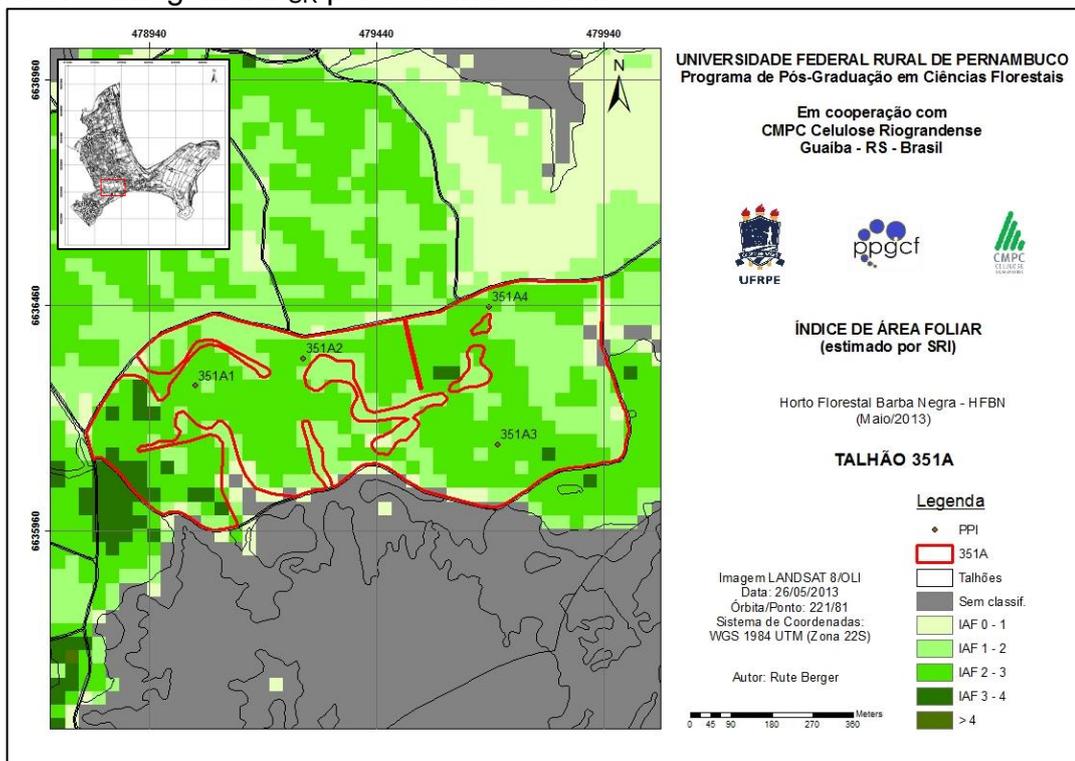
APÊNDICE H – Imagem IAF_{SR} dos talhões com possibilidade de estratificação no campo.

Figura 36 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 348A.



Fonte: Berger, 2014.

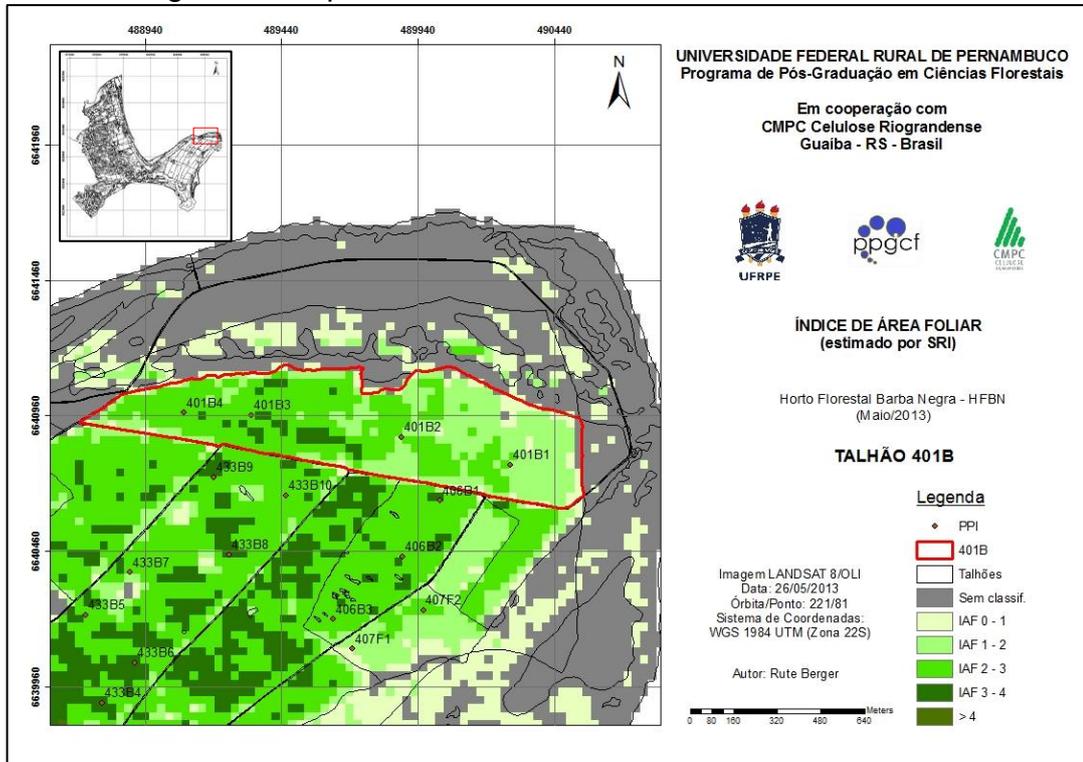
Figura 37 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 351A.



Fonte: Berger, 2014.

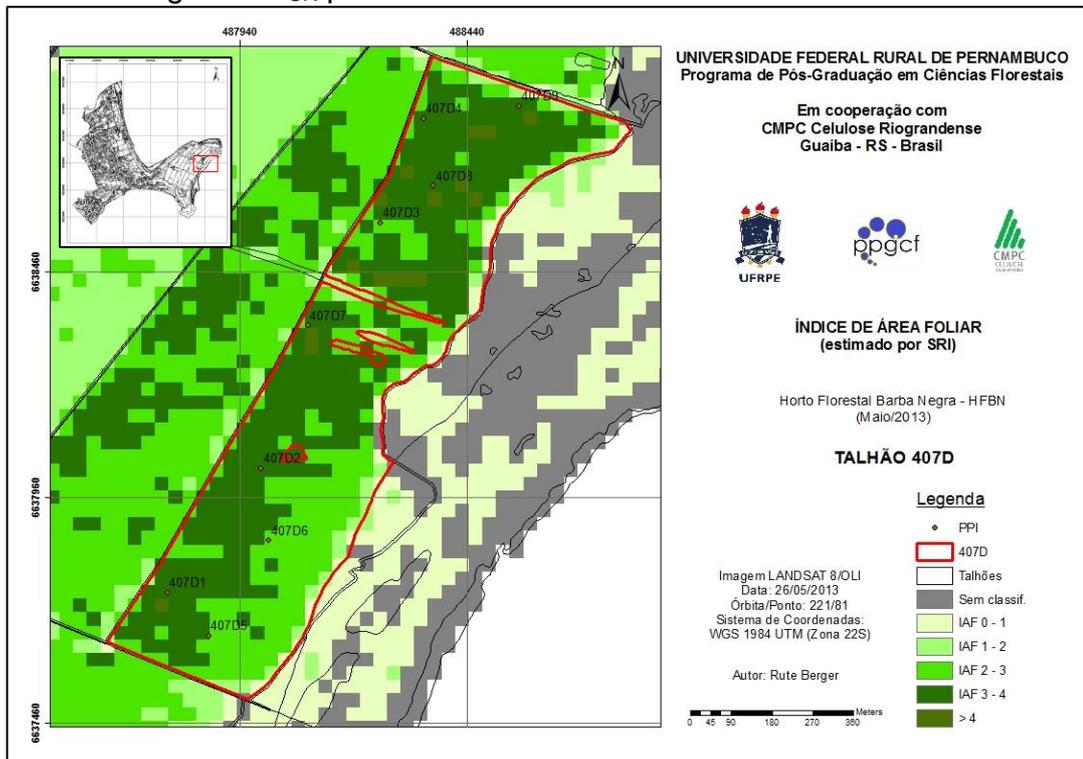
APÊNDICE H – Imagem IAF_{SR} dos talhões com possibilidade de estratificação no campo.

Figura 38 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 401B.



Fonte: Berger, 2014.

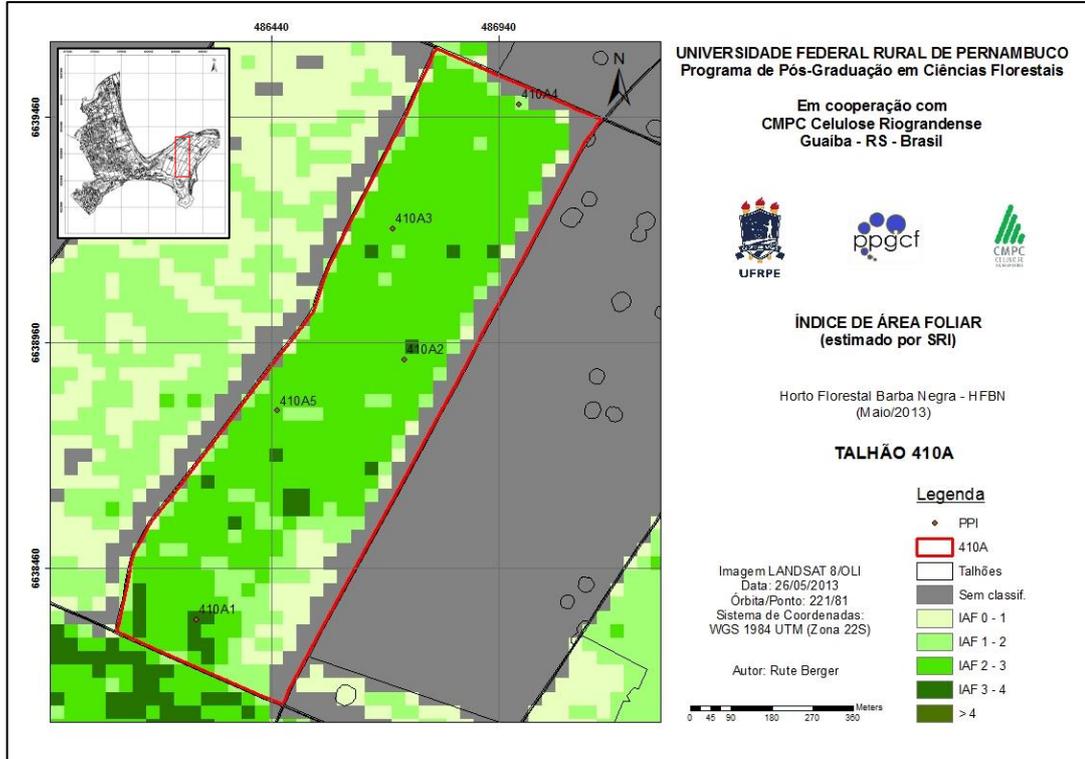
Figura 39 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 407D.



Fonte: Berger, 2014.

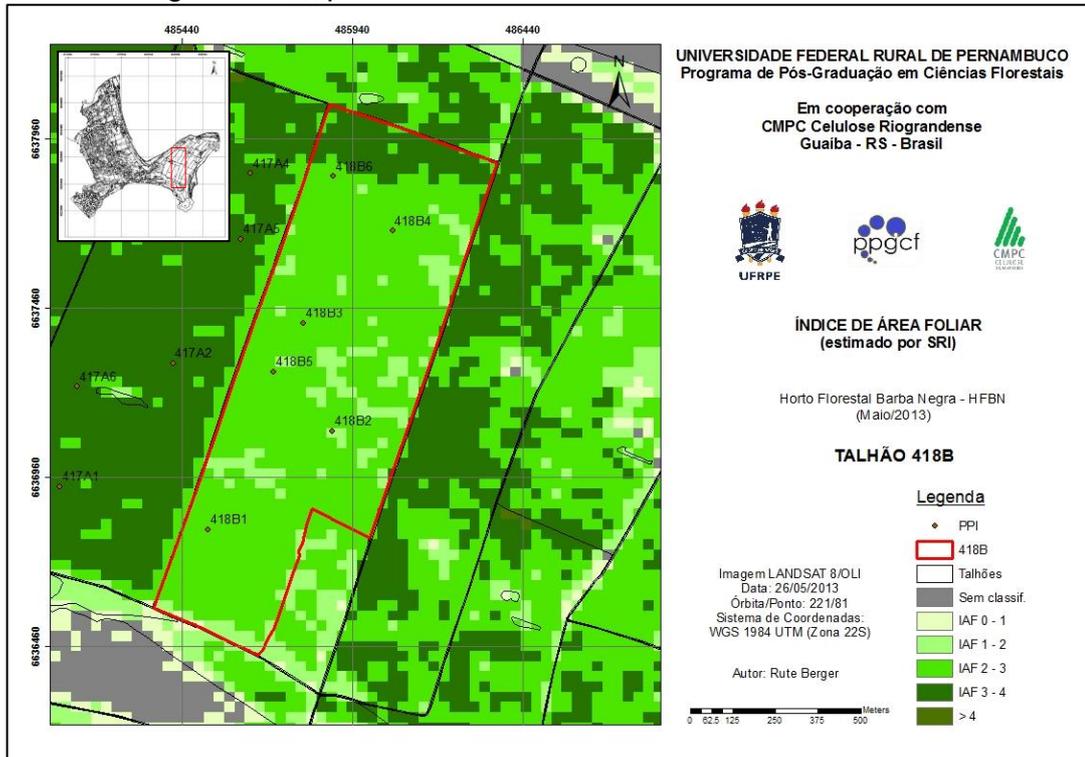
APÊNDICE H – Imagem IAF_{SR} dos talhões com possibilidade de estratificação no campo.

Figura 40 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 410A.



Fonte: Berger, 2014.

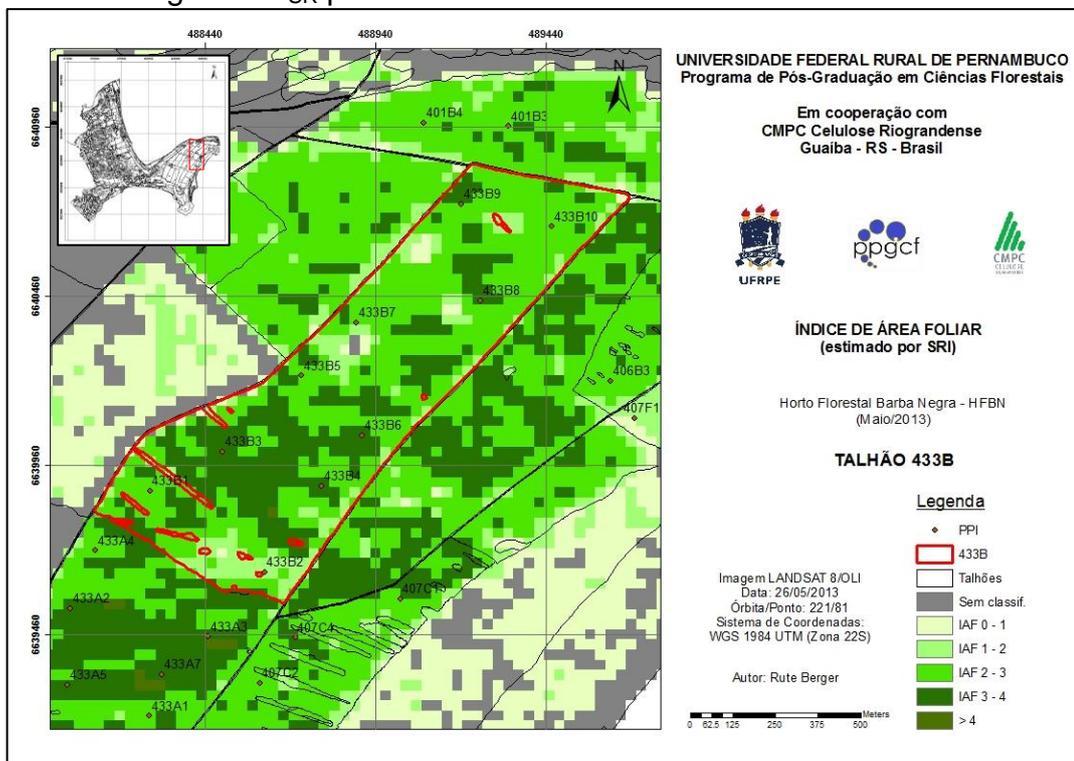
Figura 41 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 418B.



Fonte: Berger, 2014.

APÊNDICE H – Imagem IAF_{SR} dos talhões com possibilidade de estratificação no campo.

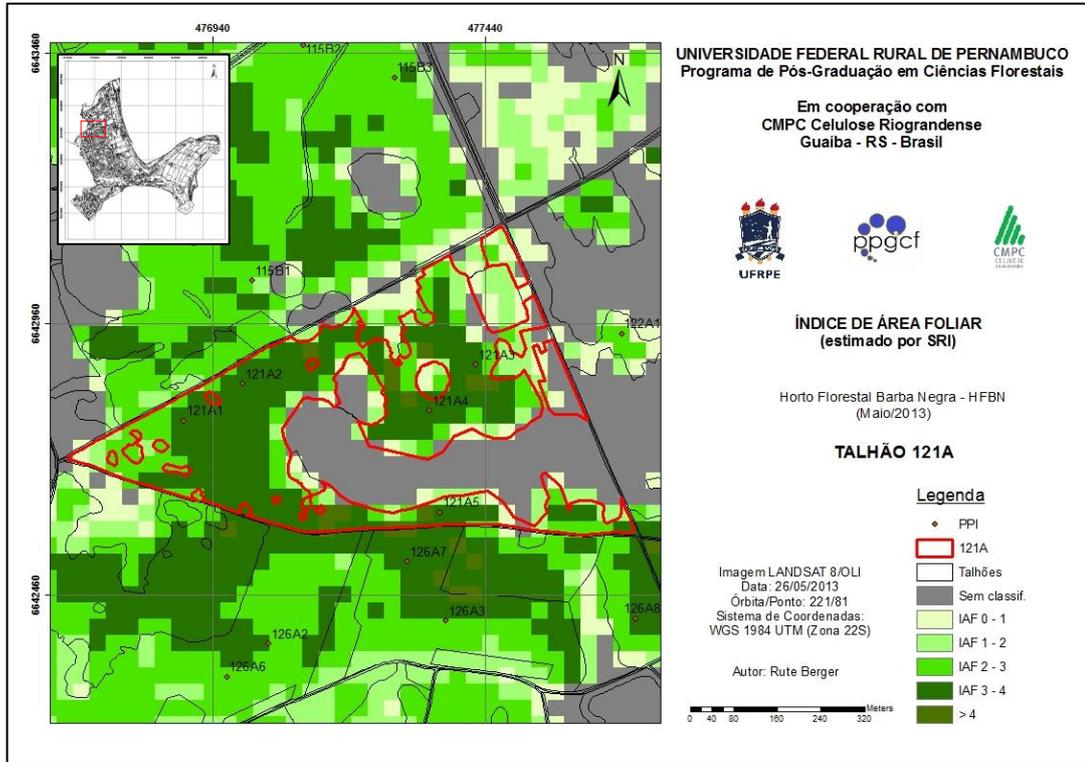
Figura 42 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 433B.



Fonte: Berger, 2014.

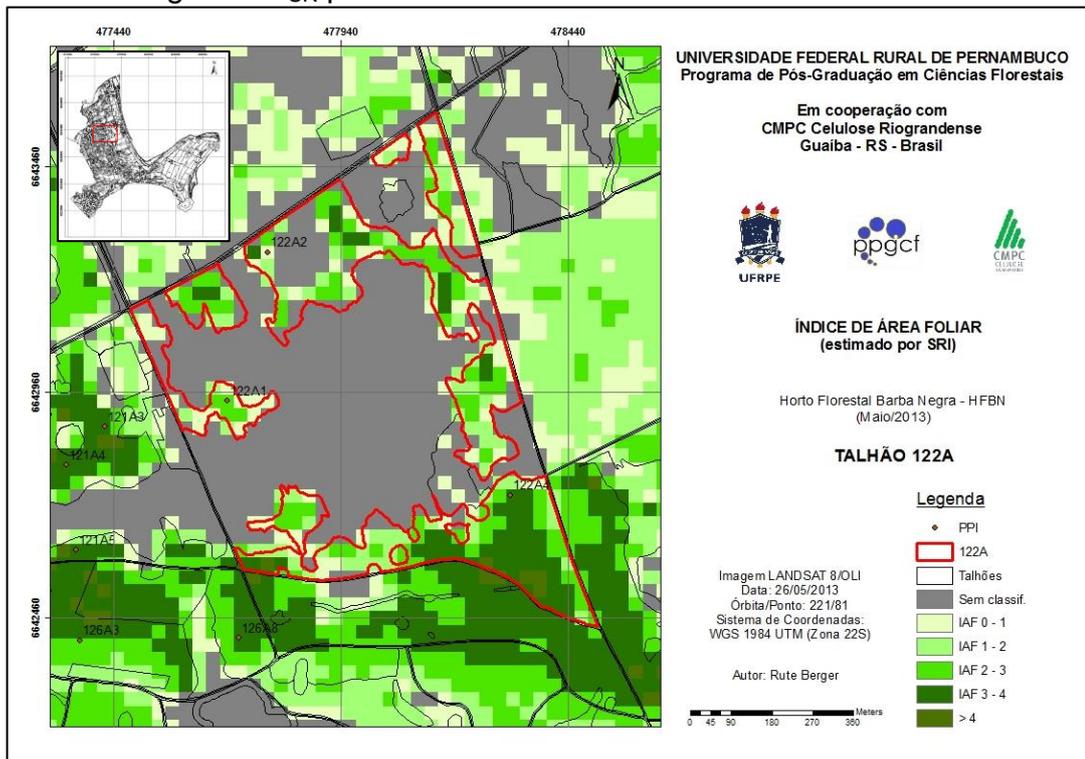
APÊNDICE I – Imagem IAF_{SR} dos talhões sem possibilidade de estratificação no campo.

Figura 43 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 121A.



Fonte: Berger, 2014.

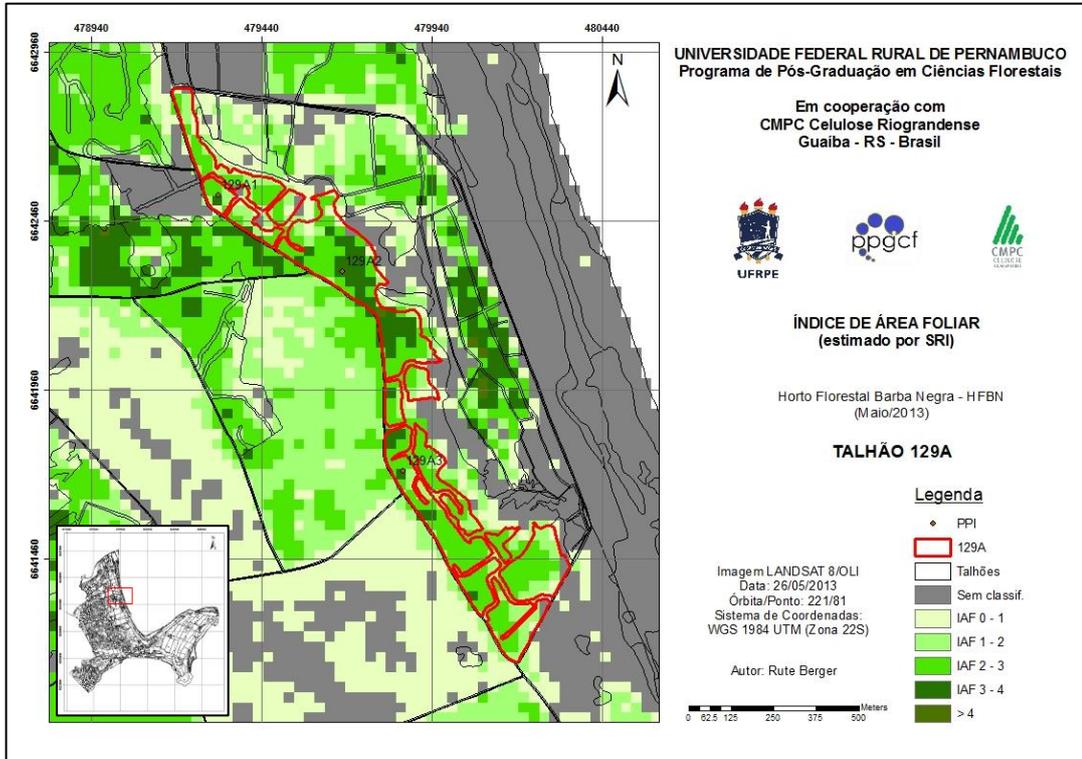
Figura 44 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 122A.



Fonte: Berger, 2014.

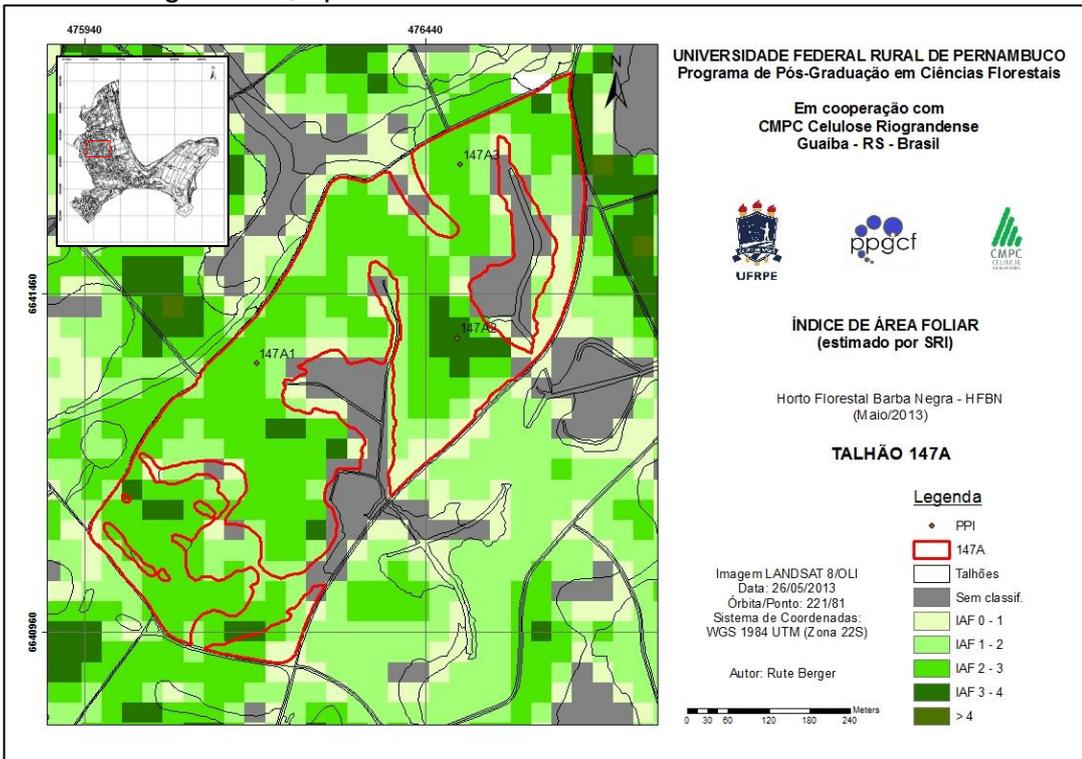
APÊNDICE I – Imagem IAF_{SR} dos talhões sem possibilidade de estratificação no campo.

Figura 45 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 129A.



Fonte: Berger, 2014.

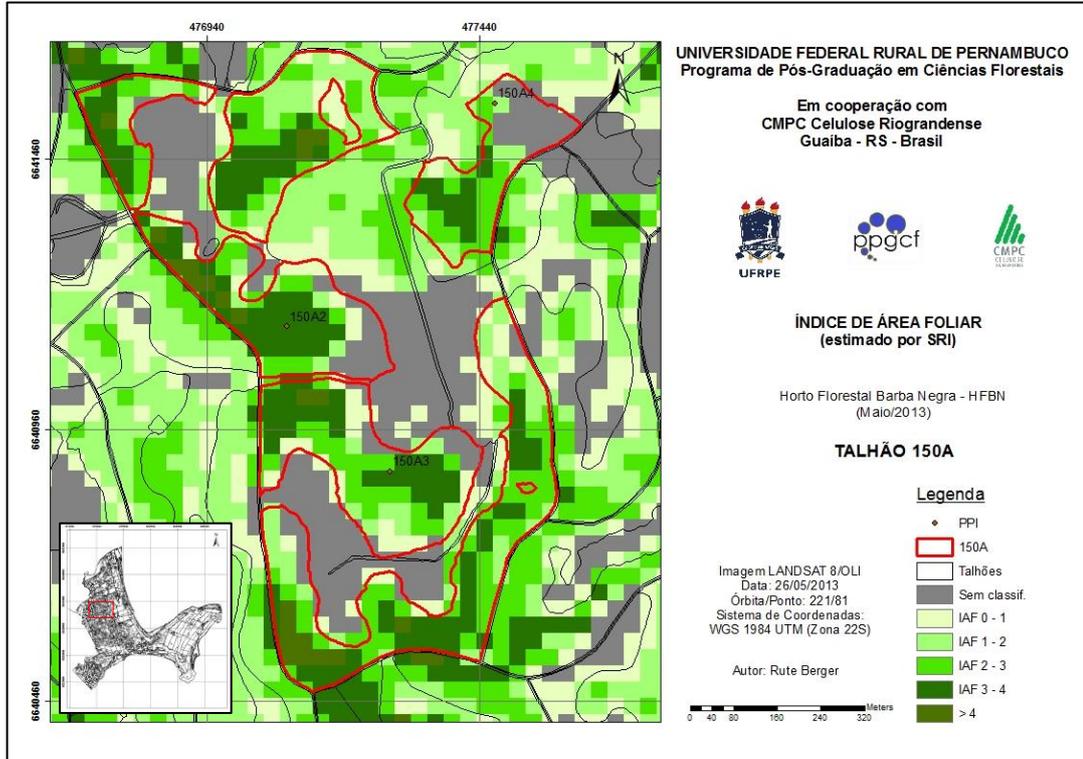
Figura 46 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 147A.



Fonte: Berger, 2014.

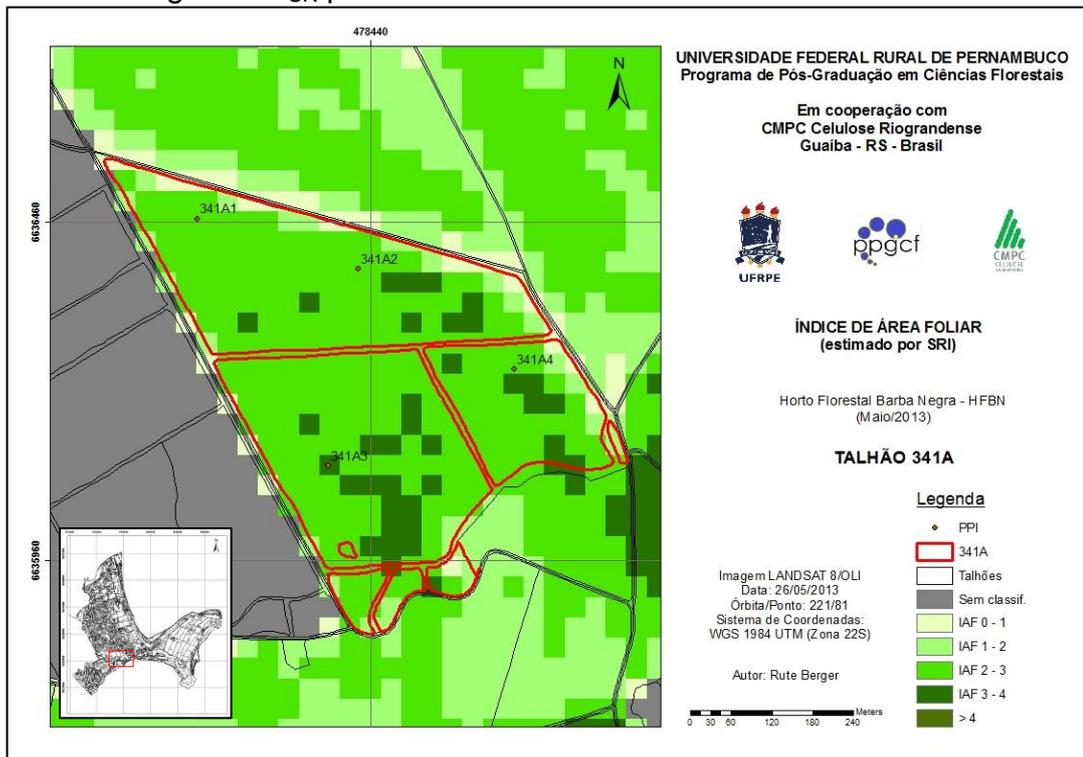
APÊNDICE I – Imagem IAF_{SR} dos talhões sem possibilidade de estratificação no campo.

Figura 47 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 150A.



Fonte: Berger, 2014.

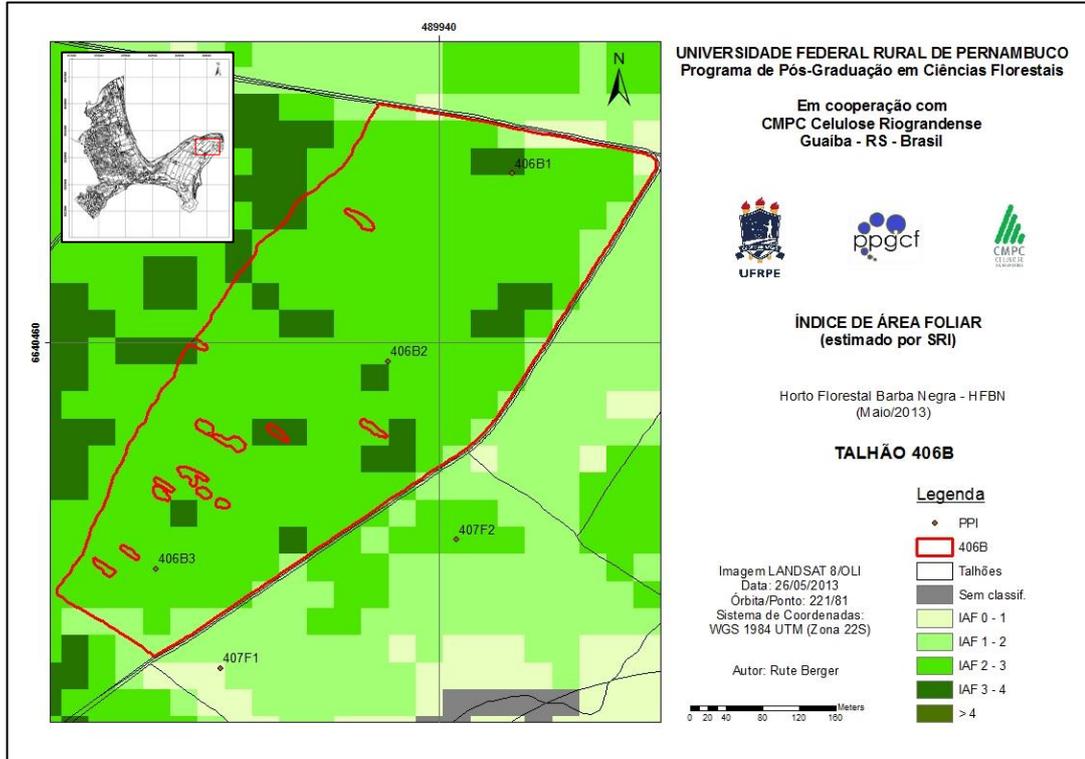
Figura 48 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 341A.



Fonte: Berger, 2014.

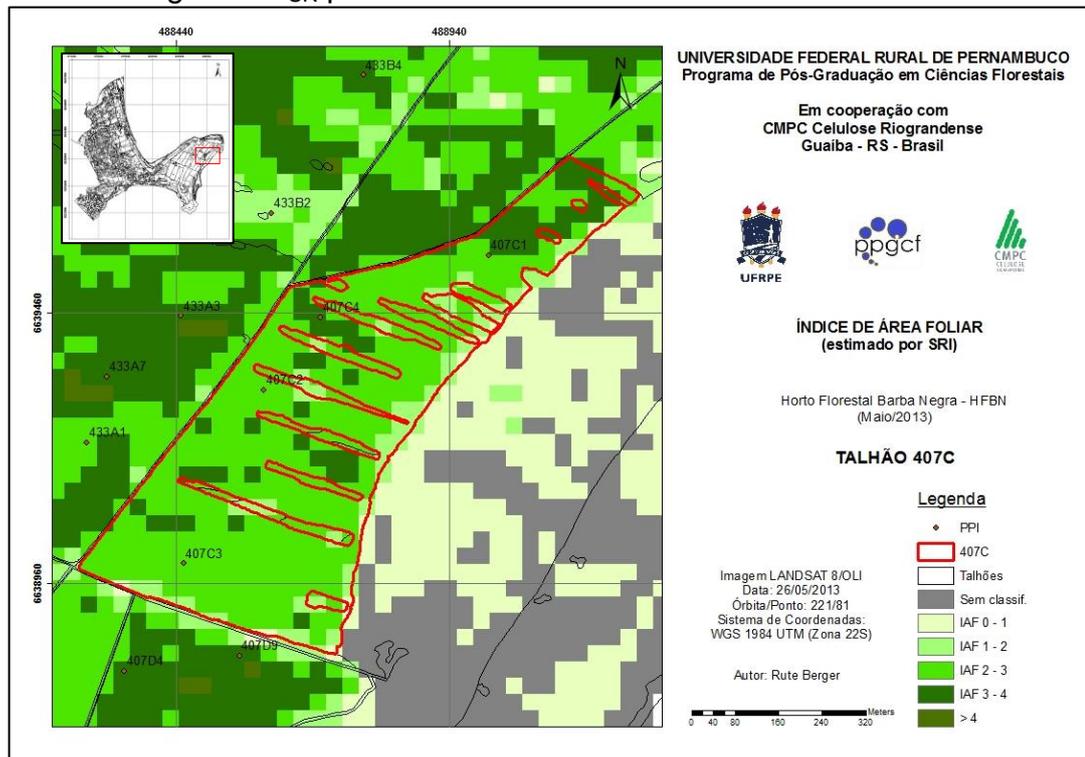
APÊNDICE I – Imagem IAF_{SR} dos talhões sem possibilidade de estratificação no campo.

Figura 49 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 406B.



Fonte: Berger, 2014.

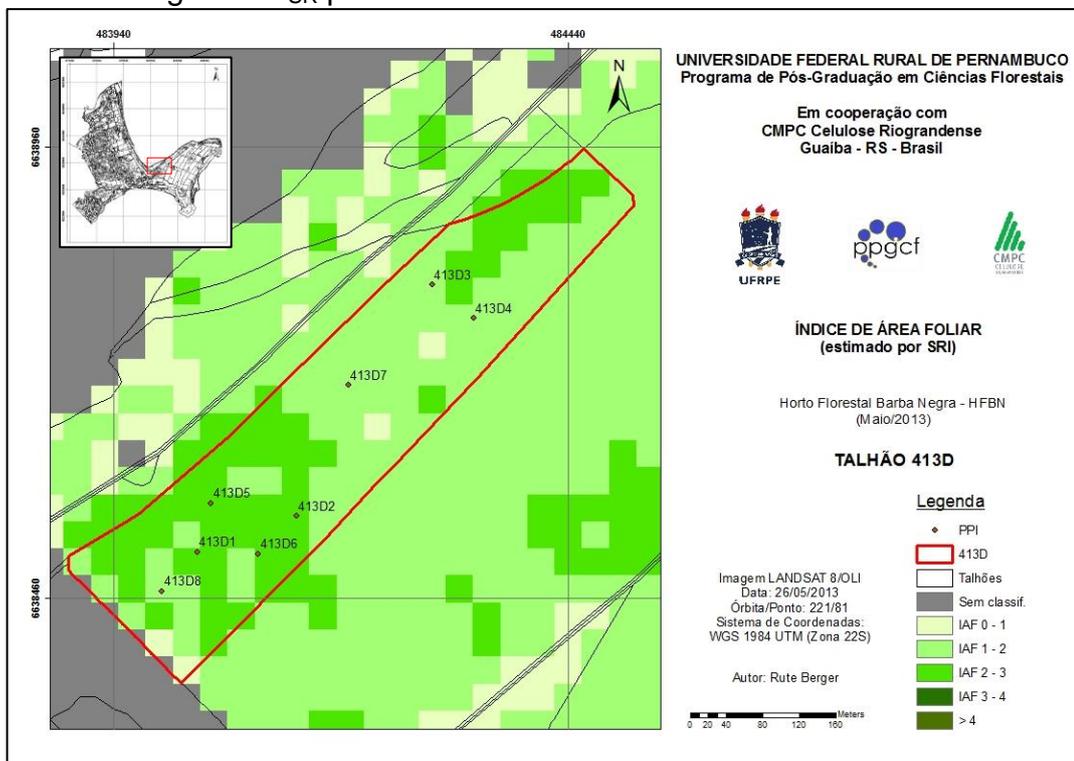
Figura 50 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 407C.



Fonte: Berger, 2014.

APÊNDICE I – Imagem IAF_{SR} dos talhões sem possibilidade de estratificação no campo.

Figura 51 – Imagem IAF_{SR} para o talhão 413D.



Fonte: Berger, 2014.