UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - *CAMPUS* DE CASCAVEL

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DINÂMICA ESPECTRO-TEMPORAL DA SOJA E DO FEIJÃO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO TERRESTRE

VICTOR HUGO ROHDEN PRUDENTE

CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL

FEVEREIRO – 2017

VICTOR HUGO ROHDEN PRUDENTE

DINÂMICA ESPECTRO-TEMPORAL DA SOJA E DO FEIJÃO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO TERRESTRE

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Biológicos e Agroindustriais.

Orientador: Prof. Dr. Erivelto Mercante.

Co-Orientador: Prof. Dr. Jerry Adriani Johann

CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL

FEVEREIRO - 2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

P966d

Prudente, Victor Hugo Rohden

Dinâmica espectro-temporal da soja e do feijão por meio de sensoriamento remoto terrestre./Victor Hugo Rohden Prudente. Cascavel, 2017.

122 f.

Orientador: Prof. Dr. Erivelto Mercante

Coorientador: Prof. Dr. Jerry Adriani Johann

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2017

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

1. Estimativas. 2. Índices de vegetação. 3. Parâmetros biofísicos. I.Mercante, Erivelto. II. Johann, Jerry Adriani. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 21.ed. 621.3678

630

CIP-NBR 12899

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Bejio – CRB 9ª/965

VICTOR HUGO ROHDEN PRUDENTE

Dinâmica Espectro-temporal da Soja e do Feijão por Meio de Sensoriamento Remoto Terrestre

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agricola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do titulo de Mestre em Engenharia Agricola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, linha de pesquisa Geoprocessamento, Estatistica Espacial e Agricultura de Precisão, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

Marcio Furlan Maggi
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Orientador(a) - Enivelto Mercante
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Carlos Henrique Wachholz de Souza
Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Cascavel, 9 de fevereiro de 2017

BIOGRAFIA

Victor Hugo Rohden Prudente, nascido em 28/08/1992, natural da cidade de Mingá Guazú, Paraguai, concluiu o curso de graduação em Bacharel em Engenharia Agrícola, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, no ano de 2014. No ano de 2015 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Engenharia de Sistemas Biológicos e Agroindustriais, sob orientação do Prof. Dr. Erivelto Mercante. Possui experiência em Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto.

“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”

Autor desconhecido

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter iluminado meu caminho e me abençoado com tantas graças, pois sem ele não teria conseguido superar todos os obstáculos para chegar onde hoje estou;

Agradeço aos meus pais, José e Marilene, e às minhas irmãs, Gilene e Eulalia, por todo o apoio nas vitórias e nas derrotas, todo o amor e a compreensão, sendo para mim meu porto seguro;

Agradeço ao Prof. Dr. Erivelto Mercante, meu orientador, pela sabedoria dividida, pela paciência e a compreensão e, principalmente, pela confiança e a amizade compartilhada;

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Jerry Adriani Johann, pela amizade, a confiança, por toda a ajuda e o conhecimento transmitido e pelo incentivo no desenvolvimento da pesquisa;

Aos meus amigos da Engenharia Agrícola, PGEAGRI e de demais cursos, pela amizade, o apoio e os risos compartilhados, pois, com vocês ao meu lado, tudo ficou mais fácil;

Às equipes do GeoLab e LEA, pelo apoio em todos os levantamentos. Graças aos sacrifícios de vocês que tudo se tornou possível. Obrigado, Carlos, Lucas, Luiz, Ivã, Bruno, Alex, Willyan, Isaque, Marcus, Leonardo, Douglas, Thiago;

Aos antigos companheiros de GeoLab, Carlos Henrique, Suzana, Rafaela, Diego, Paulo e Luiz Peruzzo, por todo o conhecimento transmitido, muito obrigado;

Às empresas Cooperativa Agroindustrial de Cascavel e Plantar Agrícola, que juntamente com os produtores Hilário e Valter disponibilizaram as áreas para os monitoramentos;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pela infraestrutura, a oportunidade e o auxílio na formulação deste trabalho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro (bolsa) concedido.

DINÂMICA ESPECTRO-TEMPORAL DA SOJA E DO FEIJÃO POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO TERRESTRE

RESUMO

A dinâmica espaço-temporal das culturas agrícolas pode ser monitorada por meio de Índices de Vegetação (IV) em múltiplas datas. A utilização do IV, em um determinado período do desenvolvimento das culturas, ou, ainda, em todo o seu ciclo, possui boas relações com parâmetros agronômicos. Há diversos IVs, sendo o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) um dos mais utilizados. O NDVI possui relação com algumas variáveis agronômicas como altura de planta, Índice de Área Foliar (IAF), matéria seca, índice de clorofila (IC), grau de cobertura do solo, altura de planta e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI). Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi comparar perfis espectro-temporais NDVI obtidos por diferentes sensores remotos terrestres, e utilizar esses perfis para estimar parâmetros biofísicos (IAF, IC, RFAI e altura de planta) para a soja e o feijão, além de estimar/estudar a produtividade da soja por meio de modelos com dados espectro-temporais obtidos por diferentes sensores remotos terrestres. Utilizou-se o sensor ativo GreenSeeker 505 Handheld e o sensor passivo hiperespectral *FieldSpec4* modelo *Standard-Res*. Os valores de NDVI dos sensores passivos (NDVI FS) e ativos (NDVI GS) apresentaram alta correlação (soja rs = 0,90 e feijão rs = 0,93), e os modelos lineares respondem bem a um ajuste, ao se considerar todo o ciclo fenológico da soja (R^2 = 0,83, RMSE = 0,0161 e d_r = 0,85) e feijão (R^2 = 0,92, RMSE = 0,0038 e d_r = 0,89). A saturação dos valores de NDVIs nas datas de levantamento que se situam durante o pico vegetativo das culturas e a presença de eventos climáticos adverso diminuíram a precisão dos modelos em determinados períodos do ciclo fenológico das culturas. As variáveis IAF e altura para a soja e o feijão e IC para a soja obtiveram melhores resultados ao ser estimadas por meio dos valores de NDVI GS. RFAI para ambas as culturas e IC para o feijão obtiveram melhores ajustes por meio dos modelos que se utilizavam de valores de NDVI FS. Para a produtividade, não houve correlação significativa com os NDVI GS e NDVI FS. Entretanto, apresentou relações com o acúmulo de refletância observados nas bandas RED e NIR para ambos os sensores em diferentes datas de coleta. As melhores relações da produtividade foram com o acúmulo de refletância das bandas do espectroradiômetro nas datas DAS76 e DAS71.

Palavras-chave: Estimativas, Índices de vegetação, parâmetros biofísicos.

SPECTRUM-TEMPORAL DYNAMICS OF SOYBEAN AND BEAN USING TERRESTRIAL REMOTE SENSING

ABSTRACT

The spatio-temporal dynamics of agricultural crops can be monitored through Vegetation Indices (VI) on multiple dates. The use of IV in a given period of crop development or throughout its cycle, has generated good relations with agronomic parameters. There are several IV, the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) being one of the most used. NDVI correlates with some agronomic variables such as plant height, leaf area index (LAI), dry matter, chlorophyll index (CI), soil cover degree, plant height and photosynthetically active intercepted radiation (PAIR). Hence, the objective of this work is to compare and intercalibrate NDVI spectral-temporal profiles obtained by different terrestrial remote Sensors, and to use these profiles to estimate biophysical parameters (LAI, CI, PAIR, and Plant Height) for soybean and bean, in addition to estimating and studying soybean yield through models with spectral-temporal data obtained by different terrestrial remote sensors. The ground sensors used are the GreenSeeker 505 Handheld active sensor and the passive hyperspectral FieldSpec4 Standard-Res model. The NDVI values of the passive (NDVI FS) and active (NDVI GS) sensors presented high correlation (soybean rs = 0.90 and bean rs = 0.93) and the linear models respond well to an intercalibration considering the entire phenological cycle of soybean (R^2 = 0.83, RMSE = 0.0161 e d_r = 0.85) and beans (R^2 = 0.92, RMSE = 0.0038 e d_r = 0.89). The saturation of the NDVI values at the survey dates that are located during the vegetative peak of the crops and the presence of adverse climatic events decreased the precision of the models in certain periods of the phenological cycle of the crops. The variables LAI and Height for both crops and CI for the soybean crop obtained better results when estimated by the values of NDVI GS. PAIR for both crops and CI for bean obtained better adjustments considering the models using NDVI FS values. For the variable productivity, there was no significant correlation with the NDVI GS and NDVI FS. However, it presented relations with the accumulation of reflectance observed in the RED and NIR bands for both sensors as a result of different collection dates. The best relations of productivity were with the accumulation of reflectance values of the spectroradiometer bands on DAS76 and DAS71 dates.

Keywords: Estimates, vegetation indexes, biophysical parameters.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 OBJETIVOS 3
2.1 Objetivo geral 3
2.2 Objetivos específicos 3
2.3 Organização da dissertação 3

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
3.1 A cultura da soja 4
3.1.1 Exigências climáticas e aspectos biológicos da cultura da soja 6
3.2 A cultura do feijão 8
3.2.1 Exigências climáticas e aspectos biológicos da cultura do feijão 10
3.3 Sistema de acompanhamento de safras 11
3.4 Sensoriamento Remoto 12
3.5 Sensoriamento Remoto Terrestre 13
3.5.1 Assinaturas espectrais 14
3.5.2 Perfis espectro-temporais 15
3.5.3 Parâmetros biofísicos 17
3.6 Estimativa de parâmetros biofísicos 19

4 MATERIAL E MÉTODOS 20
4.1 Fluxograma da dissertação 20
4.2 Áreas de estudo 21
4.3 Manejo das culturas 21
4.3.1 Soja 21
4.3.2 Feijão 22
4.4 Pontos de amostragem 22
4.5 Calendário de levantamentos a campo 23
4.6 Levantamentos a campo 24
4.6.1 FieldSpec4 24
4.6.2 GreenSeeker 26
4.6.3 Medidor de área foliar 27
4.6.4 LI-191R Line Quantum Sensor 28
4.6.5 Clorofilômetro 29
4.6.6 Altura das plantas 29
4.6.7 Produtividade 29
4.7 Comparação entre os dados 30

4.7.1 Análises estatísticas 31

5 REFERÊNCIAS 32

6 ARTIGOS 39

6.1 ARTIGO 1: Comparação entre índice de vegetação obtido por sensores remotos terrestres ativos e passivos 39

6.1.1 Introdução 39

6.1.2 Material e Métodos 41

6.1.3 Resultados e Discussão 43

6.1.4 Conclusões 50

6.1.5 Referências 51

6.2 ARTIGO 2: Utilização de sensoriamento remoto terrestre para estimar parâmetros biofísicos de soja e feijão 54

6.2.1 Introdução 54

6.2.2 Material e Métodos 57

6.2.3 Resultados e Discussão 60

6.2.4 Conclusões 75

6.2.5 Referências 76

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 81

APÊNDICE A - Assinaturas espectrais da soja e do feijão 84

APÊNDICE B – Estatísticas descritivas 85

APÊNDICE C – Diagramas de dispersão entre NDVI GS observados e ajustados 88

APÊNDICE D – Teste de normalidade por Shapiro - Wilk 90

APÊNDICE E – Estatística de concordância 92

APÊNDICE F – Diagramas de dispersão entre valores observados e ajustados (IAF, IC, RFAI e Altura) 95

APÊNDICE G – Variáveis confeccionadas 103

APÊNDICE H – Dispersão entre variáveis confeccionadas e produtividade 105

APÊNDICE I – Dados meteorológicos 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Estádios de desenvolvimento da soja e suas descrições 7
Tabela 2 Estádios de desenvolvimento do feijão e suas descrições 11
Tabela 3 Dias programados para coleta a campo 24
Tabela 4 Estatística descritiva dos valores de NDVI para a soja 44
Tabela 5 Estatística descritiva dos valores de NDVI para o feijão 45
Tabela 6 Correlação entre os valores de NDVI FS e NDVI GS monitorados a campo 45
Tabela 7 Estatística de comparação entre os valores de NDVI GS e NDVI FS para ambas as culturas 46
Tabela 8 Estatística de comparação entre os valores de NDVI GS ajustados e observados para soja e feijão 47
Tabela 9 Estatística de comparação entre os valores estimados e os observados de NDVIs para cada coleta de dados na soja 48
Tabela 10 Estatística de comparação entre os valores estimados e os observados de NDVIs para cada coleta de dados no feijão 49
Tabela 11 Estatística descritiva dos IVs e parâmetros biofísicos para a soja 64
Tabela 12 Estatística descritiva dos IVs e parâmetros biofísicos para o feijão 64
Tabela 13 Correlação entre IVs e parâmetros biofísicos para a soja 65
Tabela 14 Correlação entre IVs e parâmetros biofísicos para o feijão 65
Tabela 15 Estatística de comparação entre os valores de IAF observados e preditos para ambos os sensores para soja e feijão 66
Tabela 16 Estatística de comparação entre os valores de IC observados e preditos para ambos os sensores para soja e feijão 67
Tabela 17 Estatística de comparação entre os valores de RFAI observados e preditos para ambos os sensores para a soja e o feijão 69
Tabela 18 Estatística de comparação entre os valores de Altura observados e preditos para ambos os sensores para a soja e o feijão 70
Tabela 19 Correlação entre Produtividade e demais parâmetros analisados para a soja 73
Tabela 20 Correlação significativa entre Produtividade e variáveis para a soja 73
Tabela 21 Estatística de comparação entre os valores de Produtividade de soja observados e os preditos 74
Tabela 22 Estatística descritiva dos valores de NDVI para a soja 85
Tabela 23 Estatística descritiva dos valores de NDVI para o feijão 85
Tabela 24 Estatística descritiva dos valores de IAF para a soja e o feijão 86
Tabela 25 Estatística descritiva dos valores de IC para a soja e o feijão 86
Tabela 26 Estatística descritiva dos valores de RFAI para a soja e o feijão 87
Tabela 27 Estatística descritiva dos valores de Altura para a soja e o feijão 87

Tabela 28 Teste de normalidade por Shapiro-Wilk para os dados da soja..... 90
Tabela 29 Teste de normalidade por Shapiro-Wilk para os dados do feijão..... 91
Tabela 30 Estatística de concordância dos valores de IAF ajustado e observado para a soja por DAS..... 92
Tabela 31 Estatística de concordância dos valores de IC ajustado e observado para a soja por DAS..... 92
Tabela 32 Estatística de concordância dos valores de RFAI ajustado e observado para a soja por DAS..... 92
Tabela 33 Estatística de concordância dos valores de Altura ajustada e observada para a soja por DAS..... 93
Tabela 34 Estatística de concordância dos valores de IAF ajustado e observado para o feijão por DAS..... 93
Tabela 35 Estatística de concordância dos valores de IC ajustado e observado para o feijão por DAS..... 93
Tabela 36 Estatística de concordância dos valores de RFAI ajustado e observado para o feijão por DAS..... 94
Tabela 37 Estatística de concordância dos valores de Altura observada e ajustada para o feijão por DAS..... 94
Tabela 38 Correlação entre Produtividade e variáveis correlacionadas para a soja..... 103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Valores de produção (toneladas) para os cinco maiores produtores de soja do mundo. Adaptado de FAOSTAT (2016) 5
Figura 2 Valores de produção (toneladas) para os cinco estados com as maiores produções de soja do Brasil. Adaptado de CONAB (2016)..... 5
Figura 3 Estádios de desenvolvimento da soja. Fonte: Adaptado de University of Illinois (2004). 6
Figura 4 Períodos em dias dos estádios vegetativos e reprodutivos da soja. Fonte: ABPPF (2004) 8
Figura 5 Valores de produção (toneladas) para os cinco maiores produtores de feijão do mundo. Adaptado de FAOSTAT (2016). 9
Figura 6 Valores de produção (toneladas) para os cinco estados com as maiores produções de feijão. Adaptado de CONAB (2016). 10
Figura 7 Estádios de desenvolvimento da soja. Fonte: Adaptado de Quintela (2001). 10
Figura 8 Assinatura espectral da folha verde. Fonte: Adaptado de Swain (1978). 15
Figura 9 Exemplo de perfil espectro-temporal com índice de vegetação da soja. Fonte: Esquerdo (2007). 16
Figura 10 Fluxograma da dissertação. 20
Figura 11 Localização das áreas de estudo. 21
Figura 12 Localização e distribuição dos pontos monitorados. 23
Figura 13 Método de levantamento do sensor FieldSpec. 25
Figura 14 Método de levantamento do sensor GreenSeeker 26
Figura 15 Método de levantamento do LAI2200-C e LI-191R. 27
Figura 16 Esquema de repetições para as culturas com ACF maior que 90% (A) e ACF menor que 90% (B). Fonte: Adaptado de LI-COR (2014)..... 28
Figura 17 Clorofilômetro Clorofilog CFL1030 29
Figura 18 Pontos onde realizou-se a colheita da produtividade da soja. 30
Figura 19 Perfis espectro-temporal do IV NDVI para a soja. 43
Figura 20 Perfis espectro-temporal de IV NDVI para o feijão. 44
Figura 21 Perfis espectro-temporal médios de NDVI para a soja e o feijão. 44
Figura 22 Dispersão entre NDVIs de diferentes sensores para a soja e o feijão. 47
Figura 23 Dispersão entre NDVIs simulados e observados a campo para a soja e o feijão. 48
Figura 24 Perfis espectro-temporal de NDVI, IAF, IC, RFAI e Altura de plantas para a soja.61
Figura 25 Perfis espectro-temporal de NDVI, IAF, IC, RFAI e Altura de plantas para o feijão. 62
Figura 26 Perfis espectro-temporal médios de NDVI, IAF, IC, RFAI e Altura média das plantas para a soja. 63

Figura 27 Perfis espectro-temporal médios de NDVI, IAF, IC, RFAI e Altura média das plantas para o feijão..... 63
Figura 28 Relação entre NDVI e IAF para a soja. 66
Figura 29 Relação entre NDVI e IAF para o feijão. 67
Figura 30 Relação entre NDVI e IC para a soja. 68
Figura 31 Relação entre NDVI e IC para o feijão. 68
Figura 32 Relação entre NDVI e RFAI para a soja. 69
Figura 33 Relação entre NDVI e RFAI para o feijão. 70
Figura 34 Relação entre NDVI e Altura para a soja. 71
Figura 35 Relação entre NDVI e Altura de plantas para o feijão. 72
Figura 36 Relação entre valores de Produtividade e Soma NIR FS DAS 71 e 76, Soma RED FS DAS 71 e 76 e RED FS DAS 76. 74
Figura 37 Assinaturas espectrais obtidas pelo FieldSpec 4 para a soja e o feijão. 84
Figura 38 Gráficos de dispersão entre NDVI GS ajustados e observados a campo para a soja. 88
Figura 39 Gráficos de dispersão entre NDVI GS ajustados e observados a campo para o feijão. 89
Figura 40 Relação entre IAF observado e ajustado para a soja. 95
Figura 41 Relação entre IAF observado e ajustado para o feijão. 96
Figura 42 Relação entre IC observado e ajustado para a soja. 97
Figura 43 Relação entre IC observado e ajustado para o feijão. 98
Figura 44 Relação entre RFAI observado e ajustado para a soja. 99
Figura 45 Relação entre RFAI observado e ajustado para o feijão. 100
Figura 46 Relação entre Altura observada e ajustada para a soja. 101
Figura 47 Relação entre Altura observada e ajustada para o feijão. 102
Figura 48 Relação entre Produtividade observada e ajustada para a soja. 107
Figura 49 Dados meteorológicos para o período de monitoramento. 108

1 INTRODUÇÃO

A base econômica do Brasil é composta principalmente pelo agronegócio, destacando-se neste contexto a agricultura, cada vez mais tecnificada e voltada para a exportação. Deste modo, a cultura da soja é o carro chefe do meio agrícola, estando presente de maneira predominante nos principais polos da agricultura nacional. Outra cultura relevante é a de feijão, que está presente diretamente na base alimentar brasileira, possuindo assim um grande apelo socioeconômico.

Assim, o acompanhamento técnico destas atividades é essencial, a fim de se maximizar os lucros, evitar perdas e gerenciar o fluxo de produção. Atualmente, o acompanhamento de safras para a agricultura nacional é feito por meio de pesquisas aplicadas por órgãos de gerenciamento do setor. Isso torna o levantamento subjetivo, sem a confiança de um método técnico-cientifico, acarretando uma grande demora no processamento e na divulgação dos dados.

Nesse sentido, uma ferramenta que visa melhorar o processo de aquisição de dados para o levantamento de safras é o Sensoriamento Remoto (SR). Essa ferramenta, aliada com métodos estatísticos, apresenta perspectivas espaciais em diferentes escalas (visão sinóptica), assim como o monitoramento de regiões remotas ou de acesso restrito.

Na aplicação das técnicas do SR deve-se conhecer o comportamento espectro-temporal das culturas a serem acompanhadas. Para isto, é necessária a realização de um acompanhamento periódico, já que as culturas apresentam uma alta dinâmica temporal.

Para levantamentos de dados *in loco,* os sensores remotos terrestres colaboram para o entendimento das respostas espectro-temporais das culturas a serem analisadas. Os dados obtidos por meio destes sensores permitem compreender os princípios físicos e químicos das refletâncias dos distintos alvos e a obtenção dos padrões espectrais puros dos alvos.

Por este motivo, a dinâmica espaço-temporal das culturas agrícolas tem sido monitorada com Índices de Vegetação (IV) em múltiplas datas, traduzindo as condições de seu ciclo fenológico, por meio do seu perfil espectro-temporal. Esta dinâmica pode ser correlacionada com a biomassas durante o desenvolvimento fenológico das culturas.

Há diversos IV, sendo que os mais utilizados são o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). O IV NDVI pode ser obtido pelos sensores mais comuns; porém, há variação entre os comprimentos de ondas das bandas utilizados. Este IV possui relação com diversas variáveis agronômicas das culturas agrícolas.

Assim, o SR terrestre traz informações confiáveis sobre o desenvolvimento da cultura, disponibilizando parâmetros sobre o vigor vegetativo. As informações provindas do SR terrestre são passíveis de serem utilizadas em modelos que estimem valores referentes a parâmetros biofísicos das culturas, tais como altura de planta, índice de área foliar, radiação fotossinteticamente ativa interceptada e absorvida, índice de clorofila, produtividade, etc.

No SR terrestre, os sensores podem ser ativos ou passivos. Sensores passivos geralmente são hiperespectrais (espectroradiômetro), possuindo a capacidade de se calcular diversos IVs, e os sensores ativos possuem a vantagem de serem utilizados sob qualquer condição solar, até mesmo à noite, por emitirem luz própria.

Além das diferenças entre a fonte de radiação eletromagnética, sensores ativos e passivos possuem variações quanto ao comprimento de onda central, largura da banda e custos de aquisição. Assim, a comparação entre estes sensores é importante para verificar se as informações espectro-temporais são semelhantes, mesmo sob diferentes dosséis e culturas. Desta maneira, é possível a substituição parcial ou total de um sensor, motivado por problemas técnicos ou econômicos.

Estimar parâmetros biofísicos por meio de sensores terrestres passivos ou ativos possui a vantagem de aquisição de dados sem interferência atmosférica e em resolução temporal variável. Estas estimativas servem para acompanhar em tempo real e *in-loco*, inferindo conhecimento sobre o desenvolvimento das plantas e servindo como base para tomadas de decisões em nível local. Além disso, este conhecimento serve como base para calibração de dados provindos de SR orbital.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Comparar perfis espectro-temporais de índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obtidos por diferentes sensores remotos terrestres e utilizar estes perfis para estimar parâmetros biofísicos (Índice de Área Foliar – IAF, Índice de Clorofila – IC, Radiação Fotossinteticamente Ativa Interceptada – RFAI e Altura de planta) para a soja e o feijão, além de estimar/estudar a produtividade da soja por meio de modelos com dados espectro-temporais obtidos por diferentes sensores remotos terrestres.

2.2 Objetivos específicos

a) Comparar e ajustar os perfis espectro-temporais de NDVI para cada cultura, obtidos por diferentes sensores terrestres;

b) Estimar os valores de IAF, IC, RFAI e Altura por meio dos NDVIs dos diferentes sensores para as diferentes culturas monitoradas;

c) Comparar e determinar qual dos NDVIs dos diferentes sensores é melhor para estimar os diferentes parâmetros biofísicos para cada cultura monitorada;

d) Estimar/correlacionar os valores de produtividade da soja com os IVs e parâmetros biofísicos.

2.3 Organização da dissertação

O presente estudo está dividido em três partes, sendo a primeira dotada de uma introdução, revisão bibliográfica e metodologia geral utilizada. Nas segunda e a terceira partes constam os resultados das pesquisas, divididos em dois artigos científicos. Cada artigo cientifico é dotado dos itens básicos de um artigo (Resumo, Palavras-chave, Introdução, Material e Métodos, Resultados e Discussão, Conclusões, Agradecimentos e Referências).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A cultura da soja

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*) teve início há mais de cinco mil anos, na costa leste da Ásia, principalmente ao longo do Rio Amarelo, localizado na China. Porém, somente na segunda metade do século XX é que a soja começou a ser cultivada no ocidente. Inicialmente foi cultivada nos Estados Unidos como forrageira e posteriormente como grão (EMBRAPA SOJA, 2004a).

O desenvolvimento da soja no Brasil iniciou-se em 1882, com a introdução dos primeiros materiais genéticos provindos dos Estados Unidos para o estado da Bahia. Porém, a sua melhor adaptação ocorreu para o estado do Rio Grande do Sul, no ano de 1900, por possuir condições climáticas mais semelhantes às dos Estados Unidos (EMBRAPA SOJA, 2004b).

Até a década de 1960 o cultivo da soja permaneceu como marginal no sul do Brasil, sendo cultivada em pequenas propriedades, como feno para alimentar o gado leiteiro, ou como grão para alimentar a cadeia suína de subsistência destas propriedades. O grande incentivo para a produção da soja se deu em meados dos anos 50, com a decisão de incentivos fiscais para a produção de trigo, a qual beneficiou a soja, por ser uma combinação técnica e econômica perfeita com o trigo (EMBRAPA SOJA, 2004b).

Assim, o explosivo crescimento da produção de soja no Brasil, cerca de 320 vezes de 1961 a 2014, determinou uma cadeia de mudanças sem precedentes na história brasileira. A soja, inicialmente auxiliada pelo trigo, foi a grande responsável pelo surgimento da agricultura moderna no Brasil (EMBRAPA SOJA, 2004b; FAOSTAT, 2016)

Segundo dados da Divisão de Estatística da Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas – FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations – Satistic Division) o Brasil se mantém como um dos principais produtores de soja no mundo. Considerando os valores de produção de 1961 a 2014, a liderança mundial está com os Estados Unidos, seguido pelo Brasil. Para o ano de 2014, Estados Unidos e Brasil apresentaram produções médias de aproximadamente 107 e 87 milhões de toneladas de soja, respectivamente (Figura 1) (FAOSTAT, 2016).

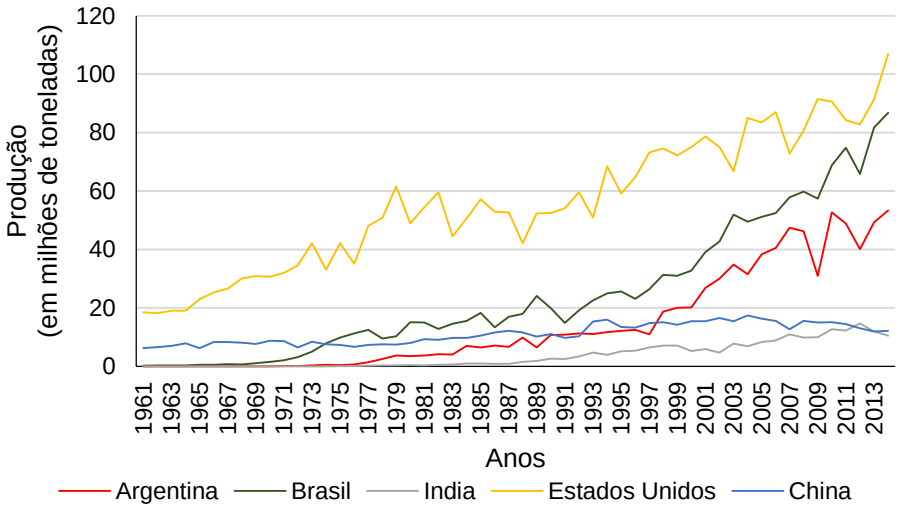


Figura 1 Valores de produção (toneladas) para os cinco maiores produtores de soja do mundo. Adaptado de FAOSTAT (2016)

A soja, como lavoura comercial, chegou no Paraná em meados dos anos 50. Inicialmente, seu cultivo era realizado em pequenas lavouras e seu consumo era destinado ao consumo doméstico. A partir dos anos 50, com a chegada de colonos vindos do Rio Grande do Sul, o desenvolvimento da soja no estado do Paraná foi explosivo (EMBRAPA SOJA, 2004b).

No cenário nacional atual, o estado do Paraná está consolidado como o segundo estado maior produtor de soja. Segundo dados da Companhia Brasileira Nacional de Abastecimento – CONAB, considerando a série histórica do ano 1976 a 2015 (CONAB, 2016), o estado do Paraná está atrás apenas do estado do Mato Grosso. No ano safra de 2014/2015 a produção aproximada dos estados de Mato Grosso e Paraná foi de 27970 e 17160 mil toneladas respectivamente (Figura 2).

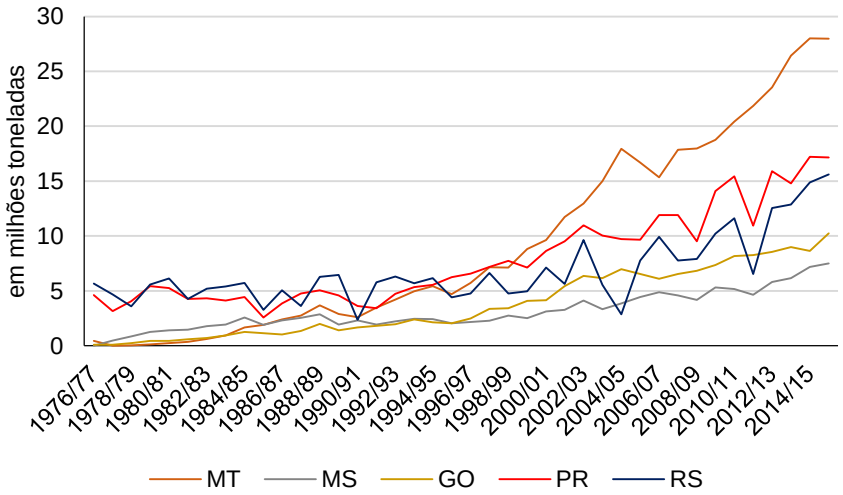


Figura 2 Valores de produção (toneladas) para os cinco estados com as maiores produções de soja do Brasil. Adaptado de CONAB (2016)

3.1.1 Exigências climáticas e aspectos biológicos da cultura da soja

A soja é uma planta dicotiledônea tipicamente herbácea, pertencente à família Leguminosa. Apresenta grande diversificação genética e morfológica devido ao elevado número de variedades e cultivares (MENOSSO, 2000).

O ciclo médio da soja é de 120 dias, variando de 75 a 210 dias desde sua germinação até a maturação. De acordo com a EMBRAPA SOJA (2004a), o ciclo de vida da soja pode ser classificado em 5 grupos de maturação: precoce (75 a 115 dias), semiprecoce (116 a 125 dias), médio (126 a 137 dias), semitardio (138 a 150 dias) e tardio (mais que 150 dias). O desenvolvimento da soja se divide em dois estádios ou fases de desenvolvimento: o vegetativo (V) e reprodutivo (R).

Alvares Filho (1988) relata que o estádio vegetativo da soja apresenta subdivisões (Tabela 1), designadas numericamente como V1, V2, V3,..., Vn, com exceção dos dois primeiros estádios, denominados como VE (emergência) e VC (estádio de cotilédone). O último estádio é designado como Vn, onde o “n” representa o número do último nó vegetativo formado por um cultivar específico.

No estádio reprodutivo estão apresentadas oito subdivisões. Estas são agrupadas em florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento da semente (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8) (INPI, 2009).

A Figura 3 apresenta a ilustração gráfica do aspecto da planta da soja para os diferentes estádios vegetativos e reprodutivos. A relação dos dias ciclo com os estádios pode ser visto na Figura 4.

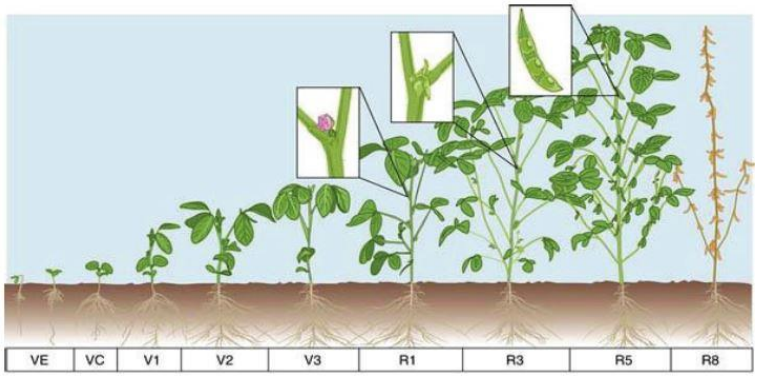


Figura 3 Estádios de desenvolvimento da soja. Fonte: Adaptado de University of Illinois (2004).

Tabela 1 Estádios de desenvolvimento da soja e suas descrições

Estádio Vegetativo		
Estádios	**Denominação**	**Descrição**
VE	Emergência	Os cotilédones estão acima da superfície do solo.
VC	Cotilédone desenvolvido	As margens das folhas unifoliadas e opostas não se tocam.
V1	Primeiro nó	Folhas unifoliadas desenvolvidas
V2	Segundo nó	Folhas trifoliadas completamente desenvolvidas no nó acima aos das folhas unifoliadas.
V3	Terceiro nó	Três nós sobre a haste principal com folhas completamente desenvolvidas, iniciando-se com nós de folhas unifoliadas.
...	...	...
Vn	Enésimo nó	“n” números de nós sobre a haste principal com folhas completamente desenvolvidas, iniciando-se com nós das folhas unifoliadas.
Estádio Reprodutivo		
Estádios	**Denominação**	**Descrição**
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó da haste principal.
R2	Pleno Florescimento	Uma flor aberta no último nó da haste principal, com folha completamente desenvolvida.
R3	Início da formação das vagens	Vagem com 0,5 cm de comprimento desenvolve-se em um dos quatro últimos nós da haste principal, com folha completamente desenvolvida.
R4	Plena formação das vagens	Vagem com 2,0 cm de comprimento desenvolve-se em um dos quatro últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida.
R5	Inicio do enchimento das sementes	Semente com 3 mm de comprimento em uma vagem, localizada em um dos quatro últimos nós da haste principal, com a folha completamente desenvolvida.
R6	Pleno enchimento das vagens	Vagem contendo semente verde que preencha a sua cavidade, localizada em um dos quatro últimos nós da haste principal, com folha completamente desenvolvida.
R7	Maturação fisiológica	Uma vagem normal sobre a haste principal que tenha atingido a cor da vagem madura.
R8	Maturação Plena (colheita)	95% das vagens atingindo a cor de vagem madura.

Fonte: Adaptado de Alvares Filho (1988), INPI (2009)

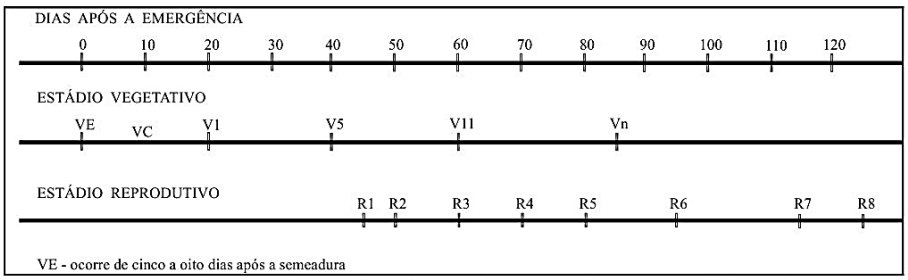


Figura 4 Períodos em dias dos estádios vegetativos e reprodutivos da soja. Fonte: ABPPF (2004)

Na prática, o crescimento, o desenvolvimento e o rendimento da soja resultam da interação dentre o potencial genético de um determinado cultivar com o ambiente. Em condições de campo a natureza proporciona a maior parte das influências ambientais sobre o desenvolvimento e o rendimento da soja (MERCANTE, 2007).

De acordo com a EMBRAPA SOJA (2008) a disponibilidade de água é a exigência mais expressiva para a soja. A necessidade total de água para a soja obter máxima produtividade varia entre 450 a 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo. Os dois períodos mais críticos da soja são germinação-emergência e floração-enchimento.

A temperatura e o fotoperíodo também afetam o desenvolvimento e a produtividade da soja. Temperaturas na faixa de 20 a 30 ºC permitem a melhor adaptação da cultura, sendo que temperaturas mais próximas aos 30 ºC permitem o ideal desenvolvimento da soja. O fotoperíodo é uma característica variável entre cultivares, ou seja, cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, acima do qual o florescimento é atrasado (EMBRAPA SOJA, 2007).

3.2 A cultura do feijão

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris L*.) é uma planta anual herbácea, trepadora ou não, pertencente à família Leguminosae, subfamília Papipilionoideae, gênero *Phaseolus.* Está classificado como *Phaseolus vulgaris L*.

Sua origem é nas Américas, mas não possui um centro específico de localização. Devido à diversidade de faseolina (proteína especifica do feijão), há três possíveis centros de origem localizados na América Latina, sendo centro mesoamericano, centro norte andino e centro sul andino (CHIORATO, 2004).

Pompeu (1987) menciona que o feijão é um dos alimentos mais básicos de vários povos e um dos componentes básicos da dieta dos brasileiros, constituindo a sua principal fonte de proteína. Seu teor proteico pode chegar a 33%, com valor

energético de 341 cal.100g^{-1}. Combinado com o arroz, o feijão constitui um prato rico em nutrientes e típico na mesa da população brasileira (GONÇALVES, 2013).

Além da sua importância na alimentação das populações brasileira e mundial, a cadeia de produção, beneficiamento e comercialização do feijão geram ocupação e renda. Desta forma, essa leguminosa torna-se um dos produtos agrícolas de maior importância econômico-social (GONÇALVES, 2013).

A produção brasileira se destaca como a segunda maior do mundo (Figura 5), alcançando 3,29 milhões de toneladas no ano de 2014, ficando atrás apenas da Índia, com 4,11milhões de toneladas (FAOSTAT, 2016).

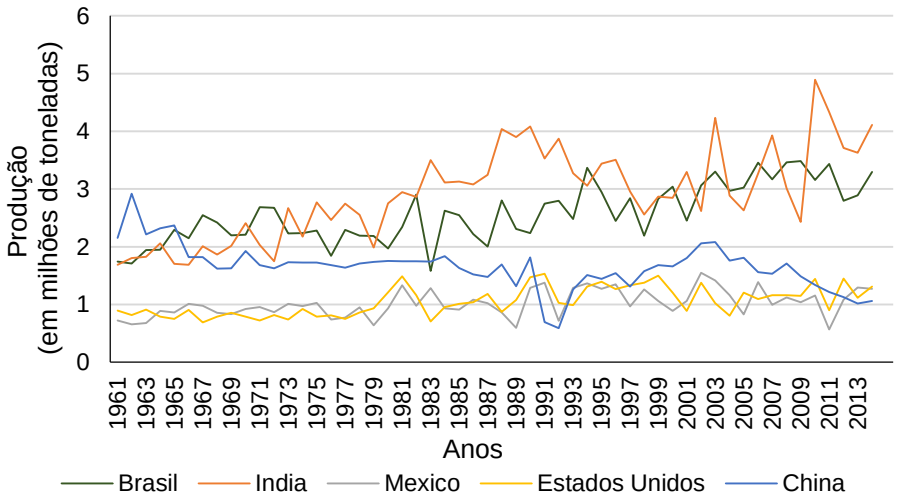


Figura 5 Valores de produção (toneladas) para os cinco maiores produtores de feijão do mundo. Adaptado de FAOSTAT (2016).

A produção brasileira de feijão, é realizada por diversos tipos de produtores, em diversas regiões do país, utilizando diferentes níveis tecnológicos. Dentre estes produtores, a agricultura familiar é apontada como a grande responsável pela produção de feijão no país (SILVA; WANDER, 2013).

O estado do Paraná se destaca com a maior produção nacional do grão de feijão (Figura 6). Sua produção entre os anos 2014/2015 foi de aproximadamente 707 mil toneladas do grão. Minas Gerais, segundo colocado, para o mesmo período, possui produção de 555 mil toneladas (CONAB, 2016).

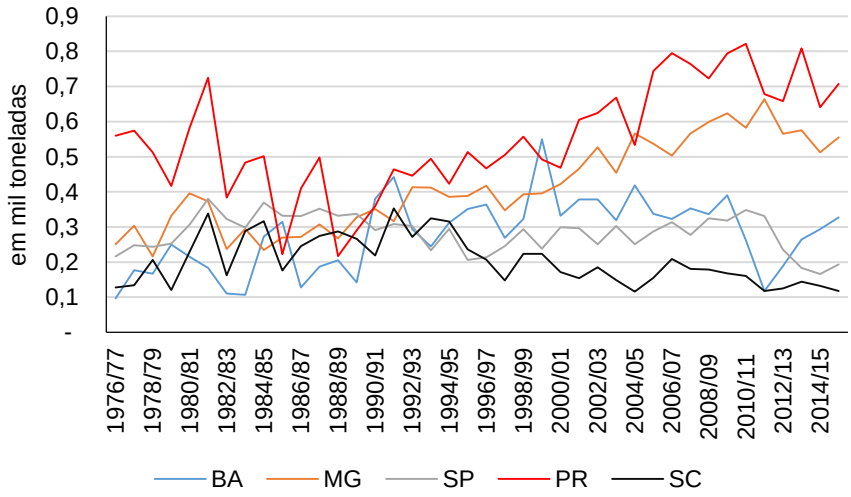


Figura 6 Valores de produção (toneladas) para os cinco estados com as maiores produções de feijão. Adaptado de CONAB (2016).

3.2.1 Exigências climáticas e aspectos biológicos da cultura do feijão.

O ciclo do feijão varia de 70 a 110 dias, sendo que mais comumente se encontre entre 90 e 100 dias (EMBRAPA FEIJÃO E ARROZ, 2012). De acordo com Silva; Wander (2013), o feijoeiro-comum é considerando uma cultura atípica por se conseguir três safras anuais (safra das águas, da seca e irrigada).

No cenário nacional, a safra das águas (ou 1ª safra) possui semeadura entre os meses de agosto e outubro, chegando a atingir os meses de novembro e dezembro em alguns casos. A colheita desta safra tem maior intensidade em dezembro, com janela de novembro a março. Colhida entre os meses de abril e maio até junho e julho, a safra da seca (ou 2ª safra), é semeada entre os meses de janeiro e abril. Já a safra irrigada (ou 3ª safra) possui semeadura a partir de março e colheita entre agosto e outubro (EMBRAPA FEIJÃO E ARROZ, 2012; SILVA; WANDER, 2013).

O feijão apresenta duas fases, uma vegetativa (V) e outra reprodutiva (R). Estas fases estão divididas em 10 estádios (Tabela 2 e Figura 7). Por meio destes caracteres morfológicos é que se identifica os cultivares de feijão (QUINTELA, 2001).

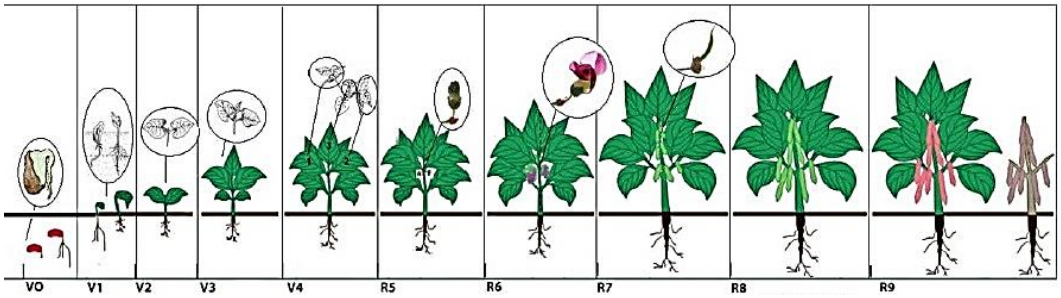


Figura 7 Estádios de desenvolvimento da soja. Fonte: Adaptado de Quintela (2001).

Tabela 2 Estádios de desenvolvimento do feijão e suas descrições

Fase Vegetativa	
Estádio	**Descrição**
V0	Germinação: absorção de água pela semente; emergência da radícula e sua transformação em raiz primária.
V1	Emergência: os cotilédones aparecem ao nível do solo e começam a separar-se. O epicótilo começa seu desenvolvimento.
V2	Folhas primárias: folhas primárias completamente abertas.
V3	Primeira folha trifoliada: abertura da primeira folha trifoliada e o aparecimento da segunda folha trifoliada.
V4	Terceira folha trifoliada: abertura da terceira folha trifoliada, as gemas e os nós inferiores produzem ramas.
Fase Reprodutiva	
Estádio	**Descrição**
R5	Prefloração: aparece o primeiro botão floral e o primeiro racimo.
R6	Floração: abre-se a primeira flor.
R7	Formação das vagens: aparece a primeira vagem.
R8	Enchimento das vagens: começa o enchimento da primeira vagem (crescimento das sementes). Ao final desta etapa, as sementes perdem a cor verde e começam a mostrar as características da cultivar. Inicia-se o desfolhamento.
R9	Maturação fisiológica: As vagens perdem a pigmentação e começam a secar. As sementes adquirem a coloração típica da cultivar.

Fonte: Adaptado Quintela (2001)

Deficiências ou excessos de água, nas diferentes fases do ciclo da cultura causam redução na produtividade em diferentes proporções (EMBRAPA FEIJÃO E ARROZ, 2012). Aproximadamente 60% da produção do feijoeiro está sujeita a essa deficiência em alguma fase da sua cultura (GONÇALVES, 2013).

Gomes et al. (2012) destacam que a maior demanda por água pelas plantas de feijoeiro acontece no início do enchimento de grãos, quando a evapotranspiração da cultura pode atingir valores acima de 6 mm dia^{-1}. Ainda de acordo com os mesmos autores, a necessidade de água do feijoeiro varia entre 300 a 500 mm.

O feijoeiro-comum apresenta uma ampla distribuição geográfica, sendo cultivado em todos os continentes, em regiões com diferenças térmicas entre 10 a 35 ºC. A temperatura do ar é o elemento climático que mais exerce influência sobre a porcentagem de êxito das vagens. A faixa de 17 a 25 ºC é considerada apropriada para o desenvolvimento da espécie (EMBRAPA FEIJÃO E ARROZ, 2012).

3.3 Sistema de acompanhamento de safras

No Brasil, é na esfera pública que se encontram os principais órgãos responsáveis pelo levantamento de safras, obtendo-se informações referentes ao montante de áreas cultivadas, percentual de áreas perdidas, produtividades alcançadas, volume de produções gerados, etc. Entretanto, estes levantamentos são realizados por meio de aplicação de questionários em unidades de recebimentos, em

produtores e em cooperativas, o que acarreta um certo grau de subjetividade nestes dados, pois estes não são validados a campo (ADAMI et al., 2010; JOHANN et al., 2012; MERCANTE et al., 2012).

Devido ao longo tempo demandado até a divulgação dos dados, aliado à pouca confiabilidade dos métodos tradicionais, diversos pesquisadores (GUSSO et al., 2009; ANTUNES et al., 2012; JOHANN et al., 2012; MERCANTE et al., 2012; SOUZA, 2013) apontam a necessidade de técnicas mais apuradas, confiáveis e transparentes para o acompanhamento agrícola na esfera nacional.

Adami (2004) destaca que estimativas confiáveis de safras são necessárias para todos os integrantes da cadeia agrícola, independentemente de ser produtor, consumidor, governo, etc., pois assim se acompanha as tendências do mercado, evitando-se as especulações e seus impactos sobre o preço final dos produtos agrícolas.

Novas metodologias têm sido propostas para aumentar a eficiência dos sistemas de previsão de safras. Entre elas estão as geotecnologias, definidas como ferramentas utilizadas para aquisição, processamento, interpretação e análise de dados espacialmente referenciados (ESQUERDO, 2007).

3.4 Sensoriamento Remoto

Aliado com métodos estatísticos, o SR apresenta perspectivas espaciais em diferentes escalas (visão sinóptica), assim como o monitoramento de regiões remotas ou de acesso restrito. Esta ferramenta possibilita a obtenção de dados de maneira rápida, quase que automatizada, e com menor grau de subjetividade, uma vez que não depende de quantificação apontada por terceiros (THENKABAIL et al., 2004; CAMPBELL et al., 2007).

O SR é definido como a ciência e a tecnologia pela qual alvos podem ser identificados, mensurados e analisados sem que haja o contato direto entre o sensor e o alvo. A informação espectral reportada pelas propriedades da luz devido a sua interação com o objeto, como reflexão, transmissão e absorção pelo objeto, tornam possível o SR. A radiação eletromagnética refletida ou emitida pelo alvo é a fonte de informação do SR (JENSEN, 2000).

Novo (2008) define o SR como a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, entre outros, com o objetivo de estudar o ambiente terrestre por meio do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as diversas coberturas que compõem a superfície terrestre. Assim, fotografias aéreas, imagens de videografia, imagens de satélite e dados de

espectroradiômetro são alguns exemplos de informações geradas por sensores remotos (MERCANTE, 2007).

Os sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e Landsat8 se apresentam como um dos principais sensores remotos orbitais. O MODIS é um sensor que está abordo dos satélites Terra e Aqua, lançados pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) em 18 de dezembro de 1999 e 4 de maio de 2002, respectivamente. As resoluções temporais destes satélites permitem que dentro de um a dois dias seja feita a cobertura de toda a superfície da terra, registrando dados espectrais em 36 bandas espectrais. Destas bandas, duas possuem resolução espacial de 250 m, outras 5 possuem resolução de 500 m e as demais possuem resolução de 1000 m. A resolução radiométrica é 12 bits, cobrindo o intervalo do espectro eletromagnético de 0,4 a 14,4 µm (NASA, 2009).

O satélite Landsat 8, último da série, possui dois sensores abordo, o OLI (Operacional Terra Imager) e o TIRS (Thermal Infrared Sensor). A resolução temporal do Landsat 8 é de 16 dias e resoluções radiométricas de 16 bits. O sensor OLI possui 9 bandas, sendo que 8 destas com resolução espacial de 30 metros e uma (banda pancromática) com resolução espacial de 15 metros. As bandas 10 e 11 pertence ao sensor TIRS, com resolução espacial de 100 metros (USGS, 2015).

3.5 Sensoriamento Remoto Terrestre

O SR terrestre consiste da utilização de sensores imageadores e não-imageadores em campo, para a coleta de dados sem contato direto com o alvo. Vários estudos se utilizaram de diversos sensores remotos terrestres, passivos e/ou ativos, para caracterizar propriedades biofísicas das culturas por meio de IVs (THENKABAIL; SMITH; DE PAUW, 2000; BROGE; LEBLANC, 2001; HANSEN; SCHJOERRING, 2003; YAO et al., 2013; ANDERSON et al., 2016).

Sensores passivos geralmente são hiperespectrais (espectroradiômetro), possuindo a capacidade de se calcular diversos IVs (THENKABAIL; SMITH; DE PAUW, 2000; BROGE; LEBLANC, 2001). Os sensores ativos possuem a vantagem de serem utilizados sob qualquer condição solar, até mesmo à noite, por emitirem luz própria (YAO et al., 2013).

Um exemplo de sensor remoto terrestre hiperespectral, é o espectroradiômetro de campo *FieldSpec4* modelo *Standard-Res (ASD, Boulder, CO, USA).* Este sensor possui a capacidade de ser utilizado tanto como sensor passivo, quanto ativo, sendo que seu uso como sensor passivo se dá por meio de uma pistola com uma abertura da visada (FOV – Field-of-View*)* de 25º (ASD, 2015).

As leituras deste sensor passivo cobrem a faixa de 0,350 a 2,500 µm do espectro eletromagnético. A resolução espectral deste equipamento é 0,003 µm para as leituras no visível e infravermelho próximo e de 0,010 µm para o infravermelho de ondas curtas. Os valores de refletância são re-amostrados e disponibilizados com valores a cada 0,001 µm. Sua capacidade de coleta é de uma leitura, um espectro, a cada 0,2 s (ASD, 2015).

O sensor terrestre GreenSeeker 505 Handheld (Trimble Agriculture, Westminster, CO, USA) é um sensor ativo que é utilizado para avaliar a variabilidade do dossel das culturas. Possui função de medir e registrar os valores do IV NDVI e das faixas do vermelho (0,66 µm) e infravermelho próximo (0,78 µm) do espectro eletromagnético, com resolução espectral de 0,025 µm (TRIMBLE, 2010).

3.5.1 Assinaturas espectrais

Uma forma de conhecer o comportamento espectral dos alvos na superfície terrestre é com o uso da técnica de espectrorradiometria de refletância (DURÁN; PRADO; FILHO, 2013).

Por meio da intensidade e os comprimentos de onda da energia eletromagnética refletida e absorvida pelos objetos em estudo são detectados nos espectroradiômetros terrestres e transformados em um gráfico por meio de *softwares* especializados. Pela análise desses gráficos se determinam as curvas espectrais de cada alvo em estudo (PAPA, 2009).

Estas curvas se diferenciam ao longo do espectro eletromagnético, caracterizando o tipo de material que constitui o alvo. Por meio destas curvas se identificam os materiais que formam os objetos na superfície, tornando-se possível executar a discriminação entre os tipos de alvos. O formato característico da curva para cada material é denominado de assinatura espectral (ZANINI, 2008).

Assim, para a vegetação, as folhas são os elementos com maior contribuição para o sinal detectado nos sensores. As propriedades espectrais de uma folha são em função de sua composição química, morfologia e estrutura interna. Pesquisas demonstram que a utilização de bandas estreitas dos espectroradiômetros proporcionam informações adicionais sobre a quantificação das características biofísicas das culturas agrícolas (THENKABAIL; SMITH; DE PAUW, 2000).

Na Figura 8 está apresentada uma curva espectral característica da vegetação. São três os principais mecanismos que influenciam a quantidade de energia eletromagnética refletida pelas folhas: pigmentos, espaços ocupados pela água e pelo

ar e estruturas celulares com dimensões do comprimento de onda da radiação incidente (MOREIRA, 2007).

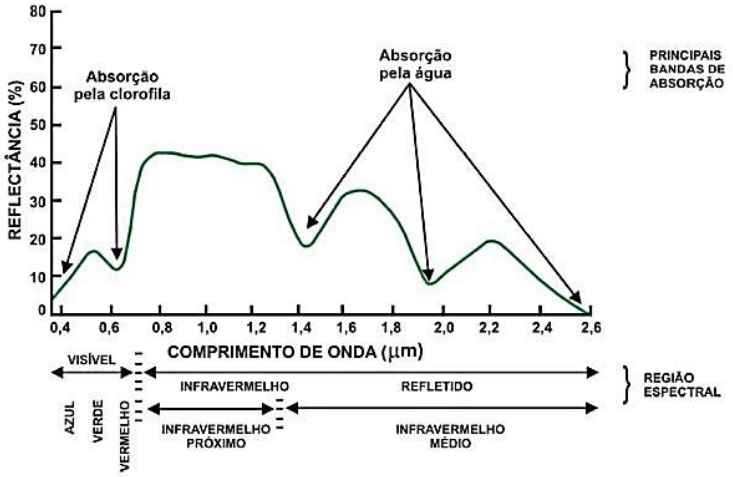


Figura 8 Assinatura espectral da folha verde. Fonte: Adaptado de Swain (1978).

Deste modo, até o valor de 0,7 µm, compreendendo a região do visível, a refletância da vegetação é baixa, devido à absorção da radiação eletromagnética causada pelos pigmentos de clorofila, com um pequeno aumento na faixa do verde. A refletância é alta na região do infravermelho próximo (0,7 µm a 1,3 µm), devido à interferência da estrutura celular. Na região do infravermelho médio (1,3 µm a 2,6 µm) a influência maior é do conteúdo de água nas folhas, com dois picos de absorção em 1,4 µm e 1,95 µm (PINTER et al., 2003; ESQUERDO, 2007; MOREIRA, 2007).

Por fim, os valores de refletância da vegetação aumentam abruptamente na faixa de 0,7 a 0,74 µm. Este padrão de refletância da vegetação é normalmente denominado de "*red edge*". Muitos estudos têm demonstrado que medidas de refletância baseadas nesta região têm se correlacionado muito bem com parâmetros biofísicos do dossel das culturas (BROGE; LEBLANC, 2001).

3.5.2 Perfis espectro-temporais

Para um adequado monitoramento da atividade agrícola, é necessária a realização de um acompanhamento periódico, já que as culturas apresentam uma alta dinâmica temporal (JOHANN, 2012).

Com a resposta espectral das culturas, pode-se acompanhar o desenvolvimento fenológico das culturas e obter-se o seu perfil espectro-temporal. A dinâmica destes perfis espectro-temporais tem sido monitorado por meio de Índices de Vegetação (IV) em múltiplas datas, traduzindo as condições da planta ao longo de seu ciclo fenológico (JENSEN et al., 2002; MERCANTE, 2007; JOHANN et al., 2013b).

Pois, estes perfis temporais são resultados da variação dos IVs ao longo do tempo (Figura 9). Nesse sentido, uma análise de múltiplas datas para obter informações do padrão espectro-temporal, também chamado de perfil, ao longo de todos os estádios fenológicos da cultura é imprescindível (JENSEN et al., 2002).

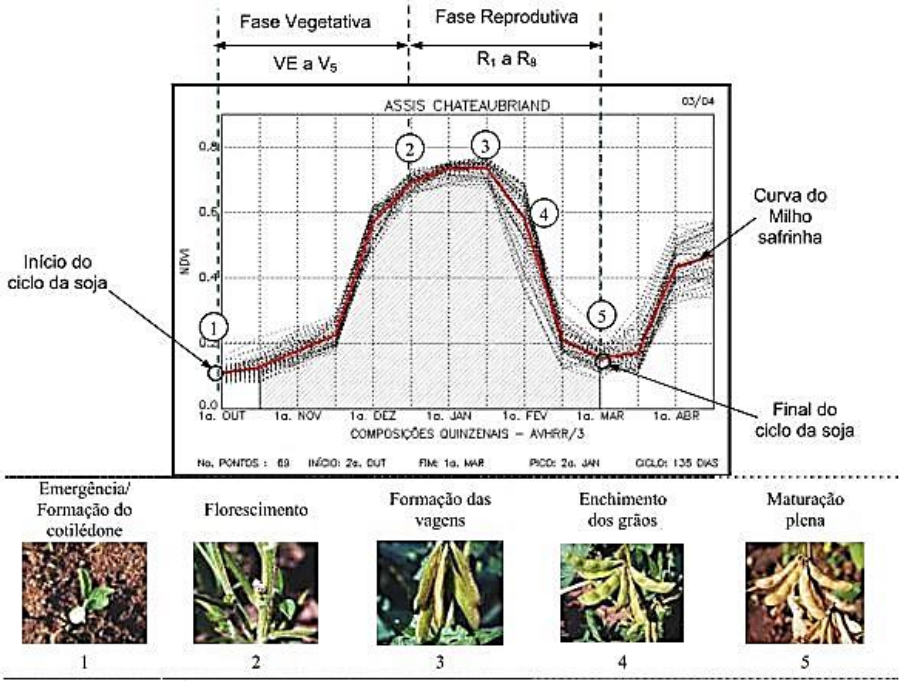


Figura 9 Exemplo de perfil espectro-temporal com índice de vegetação da soja. Fonte: Esquerdo (2007).

Os IVs mais comuns são baseados nas bandas do vermelho e do infravermelho, pois a vegetação possui propriedades únicas de refletância nestas faixas. Os IVs realçam a resposta espectral da vegetação em relação ao solo. Estes IVs foram idealizados a partir da resposta espectral da vegetação verde (BROGE; LEBLANC, 2001; MERCANTE, 2007).

Deste modo há diversos IVs, sendo o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Eq.(1) o mais utilizado. O NDVI, proposto por Rouse et al. (1973), explora o contraste entre os valores de refletância dos canais do vermelho e do infravermelho próximo.

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_{VER}}{\rho_{IVP} + \rho_{VER}} \qquad \text{Eq.(1)}$$

em que: ρ_{IVP} - refletância no infravermelho próximo e ρ_{VER} - refletância no vermelho.

Este índice possui relação com algumas variáveis agronômicas, como altura de planta, índice de área foliar, matéria seca, grau de cobertura do solo e interceptação da radiação solar global (BARET; GUYOT, 1991; THENKABAIL; SMITH; DE PAUW, 2000). Uma boa parte dos sensores pode expressar o NDVI, porém há variação entre

o comprimento de onda central utilizado e a largura da banda utilizados para o cálculo (STEVEN et al., 2003; KIM, 2010).

3.5.3 Parâmetros biofísicos

Os fatores relacionados a variabilidade das culturas, que possuem influência sobre a produção agrícola são a densidade, altura de planta, falta de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, etc.), estresse hídrico, propriedades biofísicas, teor de clorofila nas plantas e qualidade dos grãos (ZHANG; WANG; WANG, 2002).

O Índice de Área Foliar (IAF) é uma importante propriedade estrutural do dossel das culturas. Define-se como sendo a razão entre o total da superfície foliar e a unidade de solo em que a vegetação cresce (LAN et al., 2009; ZHENG; MOSKAL, 2009; GUPTA et al., 2016).

Além disso, é um importante indicador do desenvolvimento da cultura e da saúde do dossel, servindo como resposta positiva ou negativa as práticas de manejo adotadas (KROSS et al., 2015). O IAF é a variável chave usada nos mais diversos modelos de crescimento das culturas e frequentemente relacionada com a evolução da resposta espectral dos dosséis ao longo das estações de crescimento (BROGE; LEBLANC, 2001).

A magnitude do índice IAF está fortemente relacionada com a capacidade do dossel de interceptar radiação fotossinteticamente ativa, sendo, assim, correlacionada com a fotossíntese do dossel e com o acúmulo de matéria seca (MERCANTE, 2007), além de estar diretamente relacionado com a evapotranspiração e com a capacidade do dossel em interceptar precipitação (XAVIER; VETTORAZZI; MACHADO, 2004).

O IAF pode ser obtido por meio de análises laboratoriais, método direto ou por meio de métodos indiretos, com a utilização de equipamentos. O sensor LAI-2200C (LI-COR, Lincoln, Nebraska USA) é um exemplo de métodos indiretos para medir o IAF das culturas. Este equipamento não possui contato físico direto com o alvo, operando de maneira passiva. Suas partes são um *console* que armazena os dados e uma *wand*, onde está presente o sensor. Este sensor é composto por cinco anéis, sendo que estes realizam medidas da radiação eletromagnética nas direções 7, 23, 38, 53 e 68º (LI-COR, 2014)

A Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) compreende a faixa do visível (0,4 a 0,7 µm). A produção de biomassa pelas culturas está relacionada à quantidade de RFA interceptada (RFAI) e absorvida (RFAA) pelas folhas, bem como à eficiência com que estas convertem a energia radiante em energia química, pela fotossíntese (RADIN et al., 2003; CARON et al., 2012).

Deste modo, a relação entre a quantidade de RFA e a quantidade de matéria seca produzida tem sido utilizada para determinar a eficiência do uso da radiação (MONTEITH; UNSWORTH, 1990). Porém, vale lembrar que a quantidade de RFA interceptada é influenciada pelas condições de iluminação no dossel da vegetação (SCHAEFER et al., 2015)

Moreira (2007) define que a RFAI é obtida pela diferença entre a densidade do fluxo incidente acima do dossel e a densidade de fluxo transmitida através do dossel até a base da cultura. Segundo o mesmo autor, a RFAA considera a RAFAI, descontando as densidades de fluxos refletidos pelo solo e pelo dossel da cultura.

O sensor LI-191R *Line Quantum Sensor* (LI-COR, Lincoln, Nebraska USA), ou simplesmente LI-191R, é utilizado para medição da RFA. Este sensor consiste de uma barra de quartzo de um metro longitudinal, acoplado no *console* LAI220C. Este sensor lê comprimentos de onda até 0,7 µm (LI-COR, 2012).

Assim, da RFA que incide sobre o dossel, a maior parte é absorvida no mesófilo das folhas pelos pigmentos fotossintetizantes existentes nos cloroplastos, predominantemente as clorofilas *a* e *b* (CUNHA, 2004). Por este motivo, o teor de clorofila presente nas plantas é um importante parâmetro para sustentar a vida saudável de qualquer cultura (GUPTA et al., 2016). A clorofila também é um bom indicador de stress e está fortemente relacionado com o teor de nitrogênio da planta (BACOUR et al., 2006).

O Índice de Clorofila (IC), pode ser obtido por meio de medidor portáteis, que permitem medições instantâneas do valor correspondente ao seu teor na folha sem destruí-la, constituem uma alternativa aos métodos laboratoriais destrutivos (ARGENTA et al., 2003; SALLA; RODRIGUES; MARENCO, 2007).

Um exemplo de medidor portátil é o clorofilômetro Clorofilog CFL1030 (Falker Automação Agrícola Ltda, Porto Alegre, RS, BR). Este equipamento usa três faixas de frequência de luz (0,635; 0,66 e 0,85 µm) do vermelho e do infravermelho, permitindo uma análise detalhada e obtendo medição rápida e precisa. Estas medições podem ser visualizadas instantaneamente ou armazenadas para a análise no computador. A medição ótica analisa a absorção da luz pela folha, indicando a presença da clorofila (FALKER, 2008).

A luz atravessa a folha e é recebida por um fotodiodo, onde é convertida primeiramente em sinais analógicos e depois em sinais digitais, ocorrendo assim a leitura. É o próprio equipamento, por meio de equações matemáticas pré-existentes, que realiza a conversão de valores de absorbância em um índice que é relacionado com os teores de pigmentos fotossintéticos (RIGON et al., 2012).

3.6 Estimativa de parâmetros biofísicos

Em geral, a utilização do IV, integrado num determinando período do desenvolvimento das culturas, ou, ainda, em todo o seu ciclo, tem gerado boas relações com parâmetros agronômicos, como a produtividade, pois contemplam a história da evolução da biomassa (RASMUSSEN, 1992; MASELLI et al., 1993)

Nesse sentido, técnicas de SR se apresentam como ferramentas viáveis para estimar valores de IAF de maneira rápida e em escala regional com nível razoável de precisão. Uma das maneiras simples e mais comuns de se relacionar dados de SR e IAF é por meio dos IVs (ZHANG et al., 2003; XAVIER; VETTORAZZI; MACHADO, 2004).

A estimativa de produtividade de culturas agrícolas tem como objetivo representar de forma simplificada o controle que o ambiente exerce sobre a cultura em condições de campo, simulando o seu desenvolvimento da semeadura a colheita. Esses métodos relacionam os IVs à produtividade das culturas por meio de equações de regressão (JOHANN, 2012).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Fluxograma da dissertação

Na Figura 10 é apresentado o fluxograma geral de trabalho da dissertação, que foi dividido em quatro etapas: entrada de dados, dados iniciais, processamentos e resultados. A primeira entrada de dados contempla o levantamento a campo com os sensores espectroradiômetro (FieldSpec4), GreenSeeker 505 Handheld, medidor de IAF (LAI2200C), barra para medir o fluxo de RFA (LI191R) e Clorofilômetro (Clorofilog CFL1030). A segunda entrada contempla os dados de alturas das plantas. Já a terceira entrada contempla a entrada dos dados de produtividade, realizada apenas para a soja, uma vez que o feijão teve seu ciclo interrompido pela geada.

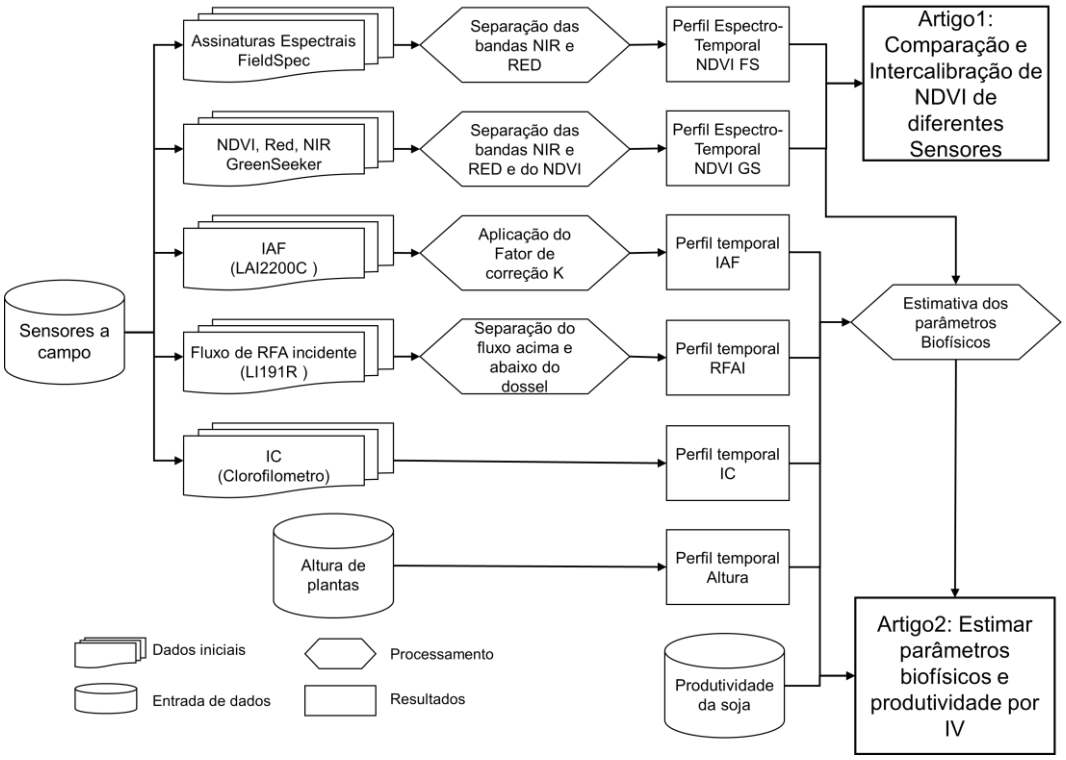


Figura 10 Fluxograma da dissertação.

Os dados iniciais contemplam os valores obtidos pelos equipamentos, sem tabulação e organização. A etapa inicial de processamento consiste nos cálculos e tabulações dos índices. Os resultados gerados nesta etapa contemplam diferentes perfis espectro-temporais.

São apresentados como resultados finais dois artigos científicos. O primeiro visa a comparação dos NDVIs obtidos por diferentes sensores remotos terrestres, enquanto o segundo visa estimar os parâmetros biofísicos e produtividade por meio dos diferentes IVs.

4.2 Áreas de estudo

O estudo foi conduzido em duas áreas agrícolas comerciais localizadas no município de Cascavel – PR. Uma com a soja (Figura 11A) em uma área de 783158 m², e outra com o feijão (Figura 11B), com área de 402007 m².

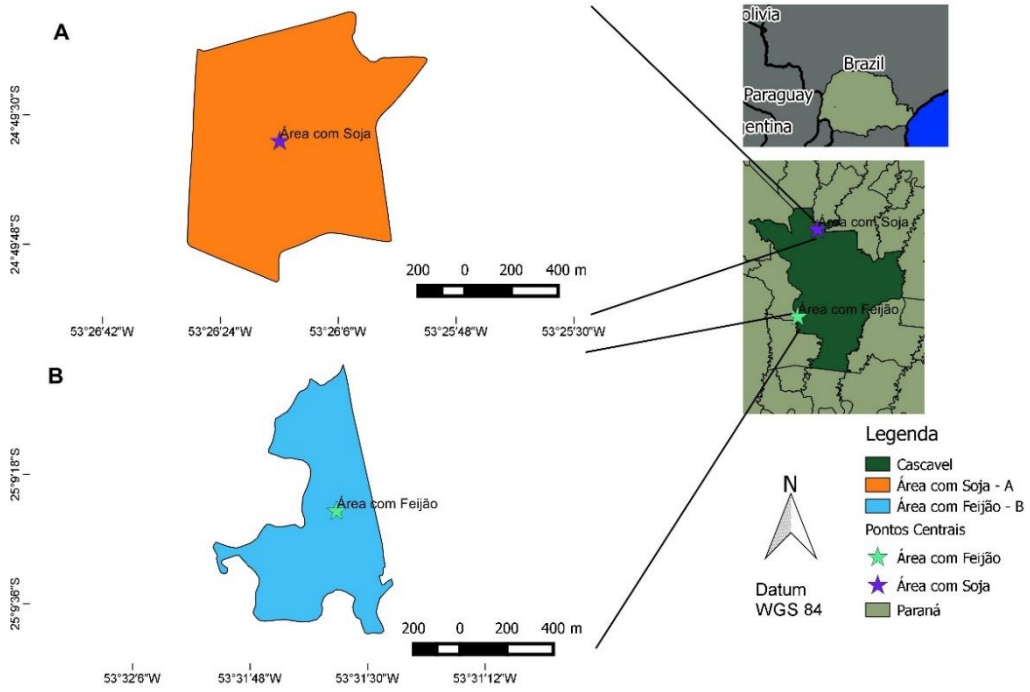


Figura 11 Localização das áreas de estudo.

Segundo a classificação de Köpen, as duas áreas sob estudo pertencem ao clima temperado úmido com verão quente (cfa). Este é um clima com comportamento subtropical úmido com clima oceânico, sem estação seca e quente no verão (APARECIDO et al., 2016)

O relevo predominante em ambas as áreas é suave ondulado, com declividades entre 3 e 8%. Na área destinada à soja a declividade média do terreno é de 6%, com variação de 1 e 15%. Para a área destinada ao feijão, a declividade média é de 7% com variação de 2 a 20% (BRASIL, 2008; VALERIANO, 2008; EMBRAPA, 2009). Em relação ao solo, há a presença de Neossolos Litólicos Eutróficos para a área destinada ao feijão e Latossolos Vermelhos Distroférricos na área destinada a soja (ITCG, 2008).

4.3 Manejo das culturas

4.3.1 Soja

A soja foi semeada nas datas de 06 e 07 de outubro de 2015, com espaçamento entre linhas de 0,45 metros e densidade de sementes de 11

sementes/metro. Cultivou-se a variedade Nidera 5900RG, caracterizada por um ciclo precoce, hábito indeterminado, porte médio, alto potencial de engalhamento (ramos laterais).

Neste talhão realizou-se uma calagem com uma taxa de 136 kg.ha^{-1} de calcário de conchas Cysy 35% Ca. Na fase de semeadura realizou-se uma adubação de 320 kg/ha do formulado NPK 04-20-20.

Posteriormente, entre os dias 03 e 10 de fevereiro de 2016 foi realizada a colheita da soja, sendo que no dia oito de fevereiro de 2016 foi realizado o processo de colheita manual de amostras de produtividade

4.3.2 Feijão

A área com o feijão foi semeada na data de 04 de março de 2016, caracterizando uma safra da seca (2ª safra). A variedade é a Imperador, que possui um ciclo precoce de 75 dias.

O espaçamento considerado para a cultura foi de 0,45 m. Realizou-se a adubação base, na fase de semeadura, de 206,6 kg ha^{-1} do formulado NPK 16-16-16. Realizou-se também uma aplicação de cobertura nitrogenada, de 82 kg ha^{-1}.

Houve condições de desenvolvimento fenológico e climáticas adversas, que impossibilitaram o fim do ciclo da cultura. Primeiramente houve a retirada de parte da cultura devido à má germinação e posteriormente houve geada nos dias 01 e 02 de maio de 2016, acarretando na retirada total da cultura nos dias 16 e 17 de maio de 2016.

4.4 Pontos de amostragem

No arranjo do experimento a campo, considerou-se a quantidade de pixels das imagens MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) e Landsat8 presentes nas áreas monitoradas. Os pixels MODIS que estavam em sua totalidade dentro dos limites dos talhões (pixels puros) foram selecionados e, a partir destes, foram selecionados os pixels das imagens Landsat 8.

Os pontos a serem monitorados foram selecionados considerando os centroides de pixels das imagens do satélite Landsat 8. Estes pontos foram selecionados de maneira a representar parcialmente a área do pixel MODIS, mas com arranjo que respeita as linhas de pulverização. Assim, as coletas de campo são facilitadas e há menor danos as culturas.

Para a área monitorada com soja, houve a presença de oito pixels MODIS, sendo que no interior cada um destes selecionou-se três pixels Landsat 8, totalizando 24 pixels monitorados (Figura 12A). Na área de feijão, houve a presença de dois pixels MODIS, sendo que para cada um foram selecionados dez pixels Landsat 8, totalizando 20 pontos monitorados (Figura 12B).

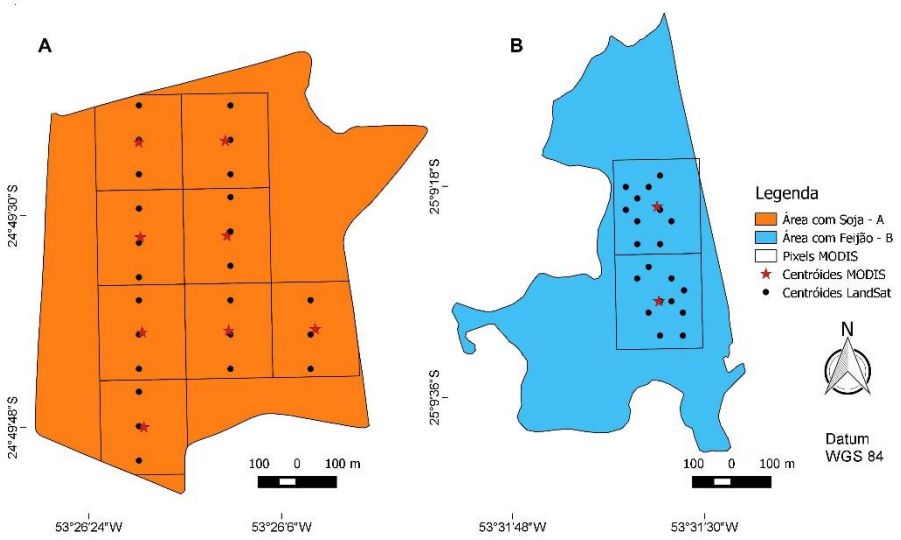


Figura 12 Localização e distribuição dos pontos monitorados.

Nas duas últimas coletas houve retirada de parte do feijão devido a baixa germinação. Dos 20 pontos monitorados (Figura 12B), restaram 13 pontos para as duas últimas coletas.

A navegação em campo até os pontos monitorados foi realizada por meio do receptor GNSS da marca Trimble, modelo JUNO SC (Trimble Navegation Limited, Westminster, CO, USA). Neste receptor, o gerenciamento dos pontos se dá por meio do *software* TerraSync.

4.5 Calendário de levantamentos a campo

Para as datas de levantamento de dados, o calendário de passagem do satélite Landsat 8 (Tabela 3) foi utilizado. O intervalo inicial entre coletas foi de 16 dias, aproximadamente, respeitando limitações impostas quanto a condições climáticas, infraestrutura disponível e manejo das culturas. Na Tabela 3 se encontram as datas de passagem do satélite e as datas de coletas de dados a campo, expressas em Dias Após a Semeadura – DAS.

Tabela 3 Dias programados para coleta a campo

Cultura	Data Landsat 8	Coleta	DAS
Soja	6/11/2015	10/11/2015	34
Soja	22/11/2015	21/11/2015	45
Soja	8/12/2015	17/12/2015	71
Soja	24/12/2015	22/12/2015	76
Soja	9/01/2016	--	--
Soja	25/01/2016	25/01/2016	110
Soja/Produtividade	--	08/02/2016	--
Feijão	26/02/2016	03/03/2016	0
Feijão	13/03/2016	14/03/2016	10
Feijão	29/03/2016	29/03/2016	25
Feijão	14/04/2016	16/04/2016	43
Feijão	30/04/2016	29/04/2016	55
Feijão	16/05/2016	14/05/2016	70

*DAS0 representa a leitura nos dias da semeadura do feijão.

4.6 Levantamentos a campo

A campo, foram utilizados cinco sensores para o levantamento de dados, além de valores de alturas, para ambas as culturas monitoradas. Os valores de produtividade foram obtidos para a soja, somente. A metodologia de coleta para cada equipamento está descrita nos itens na sequência.

4.6.1 FieldSpec4

O espectroradiômetro de campo, *FieldSpec4,* foi utilizado de maneira passiva, por meio de uma pistola, com uma abertura da visada (FOV – Field-of-View*)* de 25º (ASD, 2015).

Para ambas as culturas, foram coletadas informações a 0,80 metros acima do dossel, o que garante a cobertura de um diâmetro de 0,60 metros horizontalmente ao dossel. As leituras foram realizadas considerando o uso do sensor como passivo e posicionando o mesmo na entrelinha das culturas, garantido que, para cada leitura, fossem contempladas duas linhas de cultivo (considerando espaçamento de 0,45 m). A Figura 13 ilustra o método de levantamento.

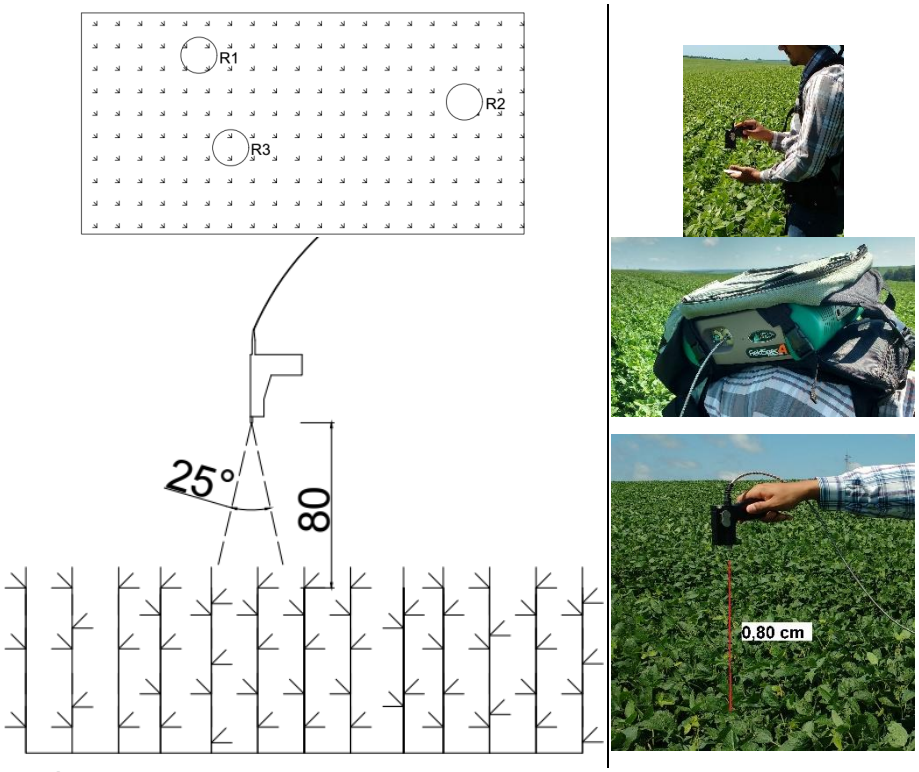


Figura 13 Método de levantamento do sensor FieldSpec.

Em cada ponto foram realizadas três leituras, sendo que para cada leitura foram tomadas três repetições, com intervalos de um segundo entre cada repetição, totalizando nove espectros coletados em cada um dos pontos monitorados.

A cada 10 minutos realizou-se a calibração do sensor, realizando leituras em uma superfície perfeitamente difusa. Este procedimento visa evitar erros decorrentes de diferenças nas incidências de radiação eletromagnética.

Utilizou-se um microcomputador para a comunicação usuário-sensor, por meio de sinal *Wireless*. Neste microcomputador, a visualização e o armazenamento dos dados foram realizados por intermédio do *software* RS3. O processo de tabulação dos dados foi gerado com a utilização do *software ViewSpecPro*, transformando os dados iniciais em um arquivo de texto.

Com base nos comprimentos de ondas centrais apresentados pelo sensor ativo, procedeu-se o cálculo do IV NDVI do FieldSpec4 (NDVI FS). Realizou-se a média dos valores de refletância em cada comprimento de onda e posterior cálculo de NDVI, conforme Eq.(2.

$$NDVI\ FS = \frac{NIR\ FS - RED\ FS}{NIR\ FS + RED\ FS} \qquad \text{Eq.(2)}$$

em que: $NIR\ FS$ - refletância no infravermelho próximo, com comprimento de onda central de 0,78 µm e largura de banda de 0,768 a 0,792 µm; e $RED\ FS$- refletância no

vermelho, com comprimento de onda central de 0,66 µm e largura de banda de 0,648 0,672 µm.

4.6.2 GreenSeeker

O sensor terrestre GreenSeeker 505 Handheld é um sensor ativo. Suas leituras são nas faixas do vermelho (0,66 µm) e infravermelho próximo (0,78 µm) do espectro eletromagnético, com resolução espectral de 0,025 µm (TRIMBLE, 2010). Além das medidas nestas faixas, por meio do módulo nômade e *software Capture*, calcula-se em tempo real os valores de NDVI (NDVI GS) das culturas, conforme apresentado na Eq.(3.

$$NDVI\ GS = \frac{NIR\ GS - RED\ GS}{NIR\ GS + RED\ GS} \qquad \text{Eq.(3)}$$

em que: $NIR\ GS$ - refletância no infravermelho próximo (0,78 µm) e $RED\ GS$ - refletância no vermelho (0,66 µm).

As coletas em campo foram realizadas a uma altura de 0,80 m acima do dossel da cultura, conseguindo, desta maneira, uma largura de trabalho de 0,6 m (TRIMBLE, 2010). Assim, foi posicionado o sensor na entrelinha da cultura e percorrida uma distância de 10 m a uma velocidade média de 0,5 m.s^{-1}. O sensor realiza 10 leituras por segundo, totalizando 200 leituras por ponto (JUSTINA, 2014). Em cada centroide dos pixels das imagens Landsat 8 foram realizadas três repetições. A Figura 14 apresenta o método de levantamento.

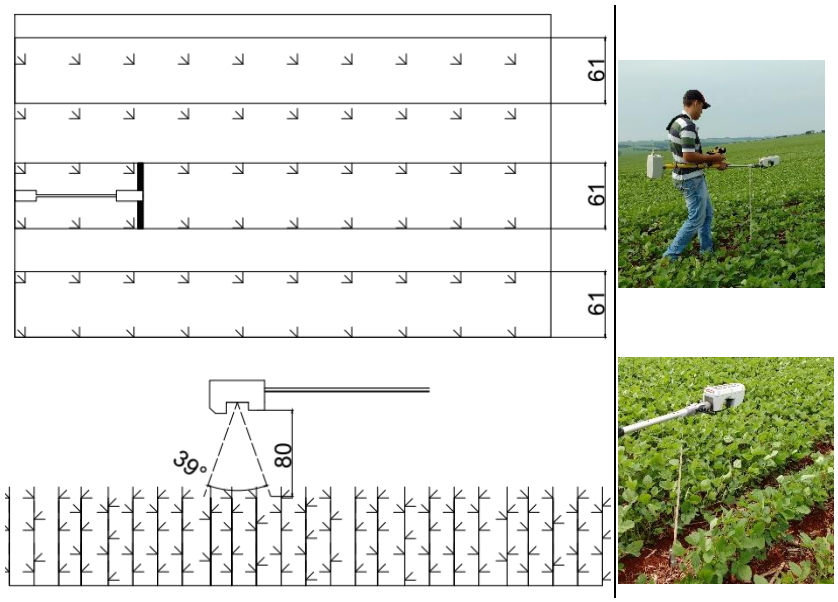


Figura 14 Método de levantamento do sensor GreenSeeker

4.6.3 Medidor de área foliar

Para as medidas de IAF utilizou-se o sensor LAI-2200C. Este sensor trabalha de maneira passiva, com métodos indiretos e sem contato físico com o alvo (LI-COR, 2014).

Considerando que a soja e o feijão são semeados em linhas, foram realizadas as leituras de maneira transversal à linha. Em cada ponto foram realizadas leituras acima e abaixo do dossel. As leituras foram tomadas a uma distância de aproximadamente 0,20 m acima do dossel e ao nível do solo abaixo do dossel. Cada repetição foi realizada considerando as entrelinhas das culturas. A Figura 15 apresenta o método de levantamento.

Figura 15 Método de levantamento do LAI2200-C e LI-191R.

O número de repetição do sensor depende da lacuna existente na entrelinha da cultura. Em cada dia de leitura, procedeu-se o teste *Canopy Gap Test* (Teste de lacuna do dossel), em que são realizados dois pares de leituras (uma leitura acima e uma leitura abaixo do dossel), sendo um direcionado para a linha e outro para a entrelinha da cultura (LI-COR, 2014).

Para este teste, se considera o valor do fator de aglomeração aparente ACF (Apparent Clumping Factor). Se o fator ACF for maior que 90%, implica em um erro menor que 10% e, consequentemente, deve ser realizados três conjuntos de

repetições com uma leitura acima e quatro leituras abaixo do dossel. Nesta situação, deve-se realizar um *view cap* (“tampa”) com abertura de 270º (Figura 16A). Caso o ACF seja menor que 90% deve-se realizar as coletas com quatro conjunto de repetições, sendo dois conjuntos de leituras voltados para as linhas e os outros dois conjuntos visando as entrelinhas das culturas. Neste caso, se utiliza um *view cap* com abertura de 45° (Figura 16B) (LI-COR, 2014)

Por fim, quando as leituras foram tomadas mais próximas ao horário de meio dia, procedeu-se a leitura do fator de correção “K”. Este fator de correção tem por objetivo evitar o fenômeno de subestimação do valor de índice de área foliar, devido ao processo da energia eletromagnética atravessar a borda da folha e essa ser lida pelo sensor.

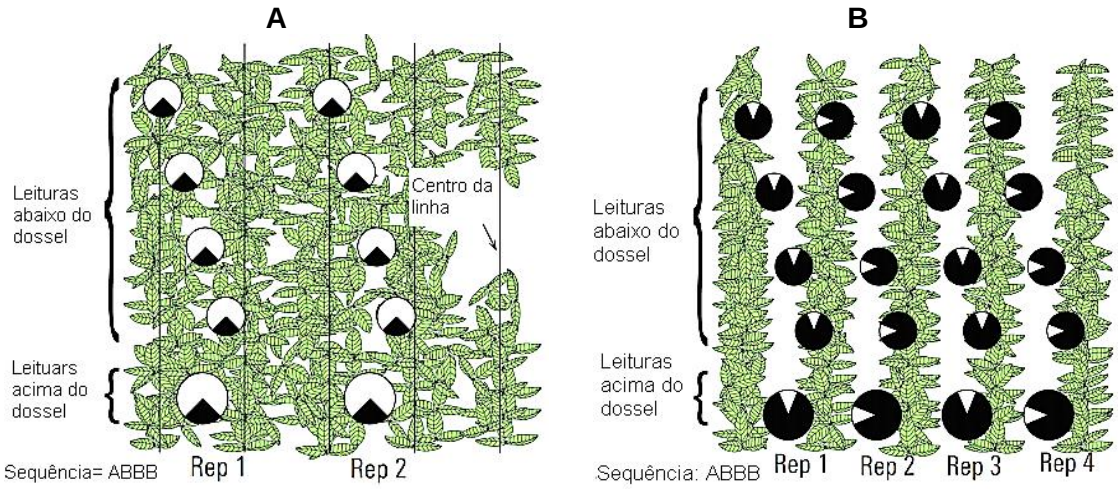


Figura 16 Esquema de repetições para as culturas com ACF maior que 90% (A) e ACF menor que 90% (B). Fonte: Adaptado de LI-COR (2014)

4.6.4 LI-191R Line Quantum Sensor

O sensor LI-191R é utilizado para medição da RFA. Este sensor é acoplado ao *console* do LAI2200C (LI-COR, 2012).

As leituras foram realizadas ao nível do solo e a uma altura de 0,20 acima do dossel. Para padronizar o método de coleta, uma vez que estavam acoplados ao mesmo *console*, realizou-se uma medida acima do dossel e quatro leituras abaixo do dossel (nível do solo). Para cada ponto de monitoramento, foram realizadas três repetições (três conjuntos de uma leitura acima e quatro leituras abaixo do dossel). A Figura 15 apresenta o esquema conjunto de leituras do LI-191R e do medidor de IAF.

A partir da medida da RFA é possível quantificar a Radiação Fotossintéticamente Ativa Interceptada (RFAI) pelo dossel da vegetação. A RFAI é obtida pela diferença entre as medidas feitas acima do dossel da vegetação e abaixo do dossel (MOREIRA, 2007).

$$RFAI = L_a - L_b \qquad \text{Eq.(4)}$$

em que:

L_a - leitura feita acima do dossel das culturas, medindo a densidade de fluxo incidente;

L_b - média das quatros leituras feitas na entrelinha da cultura, abaixo do dossel, medindo a densidade de fluxo transmitida através do dossel até a base da cultura.

Todas as leituras foram tomadas com a barra colocada na entrelinha de cultivo, de maneira paralela às linhas.

4.6.5 Clorofilômetro

O Índice de Clorofila (IC) foi obtido por meio de medidores portáteis, que permitem medições instantâneas do valor correspondente ao seu teor na folha sem destruí-la (ARGENTA et al., 2003; SALLA; RODRIGUES; MARENCO, 2007). Neste sentido, foi utilizado o clorofilômetro Clorofilog CFL1030 (Figura 17).

Figura 17 Clorofilômetro Clorofilog CFL1030

Em cada ponto monitorado foram realizadas aleatoriamente leituras de 15 folhas diferentes, para ambas as culturas monitoradas, uma repetição a mais do que a utilizada por Rocha (2013) para a soja.

4.6.6 Altura das plantas

Na obtenção das alturas das plantas se utilizou uma haste de madeira de um metro e/ou uma trena metálica. Foram realizadas três repetições para cada centroide dos pixels Landsat 8 monitorados; assim, mediu-se a altura de três plantas aleatórias em cada ponto de amostragem.

4.6.7 Produtividade

A produtividade foi avaliada apenas para a soja, uma vez que o feijão teve seu ciclo interrompido pela geada. Foram retiradas amostras de produtividade de 17 pontos, conforme Figura 18. Os dados de produtividade foram levantados por meio de

colheita manual em cada ponto monitorado. As amostragens contemplaram um metro linear de duas linhas de semeadura, totalizando 0,9 m² retirados em cada ponto.

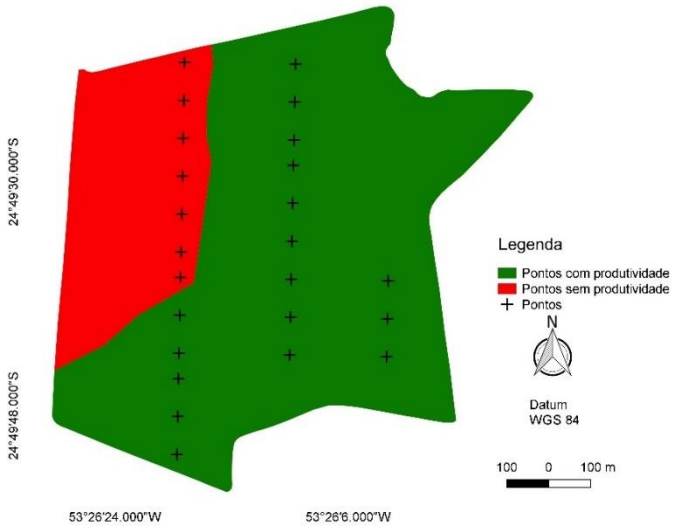


Figura 18 Pontos onde realizou-se a colheita da produtividade da soja.

A debulha e a limpeza das amostras de soja foram realizadas de maneira manual. O produto limpo passou pelo processo de pesagem da amostra inteira. Sub-amostras de 10 gramas para cada ponto, aferidas em uma balança de precisão, foram colocadas em estufa a 105 ºC durante 24 horas para determinar a massa de produto seco.

Assim, de posse dos valores de massa seca, corrigiu-se a umidade para 13% b.u (base úmida) e estimou-se a produtividade de cada ponto monitorado.

4.7 Comparação entre os dados

A comparação entre os IVs NDVI (NDVI FS e NDVI GS) dos diferentes sensores foram realizadas para a soja e o feijão. Considerou-se a utilização de todos os dados levantados durante todo o ciclo de desenvolvimento de cada cultura.

Para os parâmetros biofísicos das culturas (IC, IAF, RFAI e Altura), promoveu-se a construção de modelos de Regressão Linear e não Linear para estimá-los por meio dos valores de NDVI FS e NDVI GS. Este processo foi realizado para cada cultura.

Utilizou-se um modelo espectral para estimar os valores de produtividade, que é um método que relaciona os valores dos NDVIs à produtividade por meio de equações de regressão (JOHANN, 2012). Além dos NDVIs, as bandas de cada sensor e os demais parâmetros biofísicos foram utilizados na estimativa dos valores de produtividade.

4.7.1 Análises estatísticas

Testou-se a normalidade dos dados pelo teste de *Shapiro Wilk,* a um nível de significância de 5%. Para dados normais utilizou-se a correlação Pearson (r) e, para dados não normais, a de Spearman (rs).

O melhor modelo ajustado para a comparação dos IVs dos sensores foi escolhido com base no melhor Coeficiente de Determinação (R^2). Para cada parâmetro biofísico, escolheu-se o modelo com o melhor ajuste, considerando o comportamento dos dados e os coeficientes de determinação R^2, para cada cultura monitorada.

A comparação entre os NDVIs observados e estimados e a comparação entre os parâmetros biofísicos estimados e observados foi realizada por meio de um modelo de Regressão Linear Simples e seu Coeficiente de Determinação (R^2).

O Erro Médio (Mean Error – ME) (Eq.(5), a Raiz do Erro Médio Quadrático (Root Mean Square Error – RMSE) (Eq.(6) e o Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott, Robeson e Matsuura (2012) (d_r) (Eq.(7) foram utilizados como indicadores estatísticos.

$$\mathrm{ME} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} (O - E) \qquad \text{Eq.(5)}$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} (O - E)^2} \qquad \text{Eq.(6)}$$

$$d_r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |E - O|}{2 \sum_{i=1}^{n} (|O - \overline{O}|)} \qquad \text{Eq.(7)}$$

em que:

n - número de pontos monitorados;

O - valores observados a campo com os sensores remotos terrestres;

E - valores estimados pelos modelos;

$\overline{O}$ - valor observado médio a campo com os sensores remotos terrestres.

O ME, ou também erro sistemático, mede a tendência de o modelo superestimar ou subestimar os valores em relação ao observado. Em termos estatísticos, a média dos erros individuais é o primeiro momento das diferenças. O RMSE é comumente utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos, apresentando valores de erros nas mesmas dimensões da variável analisada (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011)

O coeficiente d_r varia de -1 a 1, determina a exatidão do método e indica o grau de afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Valores próximos a 1 indicam melhor concordância (WILLMOTT; ROBESON; MATSUURA, 2012).

5 REFERÊNCIAS

ABPPF. **Como a planta de soja se desenvolve ilustrando o desenvolvimento de uma planta de soja**. Piracicaba, SP. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004. Disponível em: <http://brasil.ipni.net/article/BRS-3147>.

ADAMI, M. **Estimativa de áreas agrícolas por meio de técnica de sensoriamento remoto, geoprocessamento e amostragem**. 2003. 183 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos: 2004.

ADAMI, M.; RIZZI, R.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T.; FERREIRA, C. C. Amostragem probabilística estratificada por pontos para estimar a área cultivada com soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 45, n. 6, p. 585-592, jun. 2010.

ALVARES FILHO, A. **Botânica e desenvolvimento**. A cultura da soja - 1. **Anais**...Rio de Janeiro: Editora Globo, 1988

ANDERSON, H.; NILSEN, L.; TØMMERVIK, H.; KARLSEN, S.; NAGAI, S.; COOPER, E. Using ordinary digital cameras in place of near-infrared sensors to derive vegetation indices for phenology studies of high Arctic vegetation. **Remote Sensing**, v. 8, n. 10, p. 847, 17 out. 2016.

ANTUNES, J. F. G.; MERCANTE, E.; ESQUERDO, J. C. D. M.; LAMPARELLI, R. A. de C.; ROCHA, J. V. Estimativa de área de soja por classificação de imagens normalizada pela matriz de erros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 47, n. 9, p. 1288–1294, set. 2012.

APARECIDO, L. E. de O.; ROLIM, G. D. S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S. de; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia,** Lavras, v. 40, n. 4, p. 405–417, ago. 2016.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; FOSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L.; SUHRE, E.; TEICHMANN, L. L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 27, n. 1, p. 109–119, fev. 2003.

ASD, I. **FieldSpec4.** Boulder, PANalytical, 2015.

BACOUR, C.; BARET, F.; BÉAL, D.; WEISS, M.; PAVAGEAU, K. Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI×Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 4, p. 313–325, dez. 2006.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, n. 2–3, p. 161–173, fev. 1991.

BRASIL. **Topodata:** banco de dados geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos, SP. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>

BROGE, N.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 156–172, maio 2001.

CAMPBELL, P. K. E.; MIDDLETON, E. M.; MCMURTREY, J. E.; CORP, L. a; CHAPPELLE, E. Assessment of Vegetation Stress Using Reflectance or Fluorescence Measurements. **Journal of Environment Quality**, Madison, v. 36, n. 3, p. 832, 2007.

CARON, B. O.; SOUZA, V. Q. de; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; BAMBERG, R.; ELOY, E. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de mudas de eucalipto. **Revista Árvore,** Viçosa, v. 36, n. 5, p. 833–842, out. 2012.

CHIORATO, A. F. **Divergência genética em acessos de feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) do banco de germoplasma do Instituto Agronômico-IAC**. 2004. 85 f. Dissertação (Mestrado em Melhoramento Vegetal) Curso de Pós-Graduação do Instituto Agronômico-IAC. Campinas, 2004.

CONAB. **Levantamento de Safras - Séries Históricas (1976-2015)**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 5 abr. 2016.

CUNHA, C. A. H. da. **Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em capim Tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e dosses de Nitrogênio**. 2004. 154f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2004.

DURÁN, G. Y. B.; PRADO, D. D. A.; FILHO, W. P. **Caracterização da refletância espectral de materiais urbanos com uso de espectroradiômetro**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais**...Foz do Iguaçu, PR, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasilia: Embrapa Soja, 2009.

EMBRAPA FEIJÃO E ARROZ. **Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na Região Central-Brasileira: 2012-2014**. 1. ed. Santo Antônio de Goiás - GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2012.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologia de produção de soja - região central do Brasil – 2005.** Londrina: Embrapa Soja, 2004a.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologia de produção de soja - Paraná 2005**. 1. Ed. Londrina: Embrapa Soja, 2004b.

EMBRAPA SOJA. Ecofisiologia da Soja. **Circular Técnica**, n. 48, p. 9, 2007.

EMBRAPA SOJA. **Tecnologia de produção de soja – Região Central do Brasil**

2009 e 2010. Londrina: Embrapa Soja, 2008.

ESQUERDO, J. C. D. M. **Uso de perfis multi-temporais de NDVI/AVHRR no acompanhamento da cultura da soja no oeste do Paraná**. 2007. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

FALKER. **Manual Medidor Eletrônico de Teor de Clorofila clorofiLOG CFL1030.** Falker Automação Agrícola Ltda., 2008.

FAOSTAT. **Production quantities by country - Average 1993-2014**. Disponível em: <http://faostat3.fao.org>. Acesso em: 2 abr. 2016.

GOMES, E. P.; BISCARO, G. A.; AVILA, M. R.; LOOSLI, F. S.; VIEIRA, C. V.; BARBOSA, A. P. Desempenho agronômico do feijoeiro comum de terceira safra sob irrigação na região Noroeste do Paraná. **Semina: Ciências Agrárias,** Londrina, v. 33, n. 3, p. 899–910, 29 jun. 2012.

GONÇALVES, J. G. R. **Identificação de linhagens de feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) tolerantes à seca**. 2013. 82f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical). Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, 2013.

GUPTA, D. K.; PRASAD, R.; KUMAR, P.; MISHRA, V. N. Estimation of crop variables using bistatic scatterometer data and artificial neural network trained by empirical models. **Computers and Electronics in Agriculture,** v. 123, p. 64–73, abr. 2016.

GUSSO, A.; ADAMI, M.; SILVA, W. F. Da; AGUIAR, D. A. De; RUDORFF, B. F. T. Aplicação de séries temporais EVI/MODIS na identificação do uso e ocupação do solo anterior ao cultivo da cana-de-açúcar. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais**...Natal, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2009

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 4, p. 591–608, dez. 2011.

HANSEN, P. M.; SCHJOERRING, J. K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 4, p. 542–553, ago. 2003.

INPI. **Como a Planta de Soja se Desenvolve**. Disponível em: <http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/0/9EB3E1289BF2532B83257AA0003BF72A/$FILE/Como a Planta da Soja Desenvolve.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2016.

ITCG. **Solos - Estado do Paraná.** Instituto de Terras Cartografia e Geociências. Curitiba,2008.

JENSEN, J. R. Remote sensing of vegetation. In: **Remote sensing of the environment, an earth resource perspective.** 2. ed. [s.l.] Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000. p. 333–337.

JENSEN, J. R.; BOTCHWEY, K.; BRANNAN-GALVIN, E.; JOHANNSEN, C. J.; JUMA, C.; MABOGUNJE, A. L.; MILLER, R. B.; PRICE, K. P.; REINING, P. A. C.; SKOLE, D. L.; STANCIOFF, A.; TAYLOR, D. R. F. **Down to Earth**: geographical information for sustainable development in Africa. 1. ed. Washington, USA: National Academy of Sciences, 2002.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agrícola Brasileira,** Brasília, v. 47, n. 9, p. 1295–1306, 2012.

JOHANN, J. A. **Calibração de dados agrometeorológicos e agrícolas de verão no estado do Paraná.** 2012. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, 2012.

JOHANN, J. A.; VIEIRA, J. R.; LAMPARELLI, R. A. C.; DUFT, D. G. Agrupamento de perfis espectro-temporais do índice de vegetação EVI/Modis para culturas agrícolas de verão entre os anos-safra 2004/2005 e 2007/2008 no estado do Paraná. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais**...Foz do Iguaçu, PR, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013

JUSTINA, D. D. D. **Dinâmica espectral de soja por meio de sensores orbital e terrestre**. 2014. 76 f. (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2014.

KIM, Y. Spectral compatibility of vegetation indices across sensors: band decomposition analysis with Hyperion data. **Journal of Applied Remote Sensing,** online, v. 4, n. 1, p. 43520, 1 mar. 2010.

KROSS, A.; MCNAIRN, H.; LAPEN, D.; SUNOHARA, M.; CHAMPAGNE, C. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,** v. 34, p. 235–248, fev. 2015.

LAN, Y.; ZHANG, H.; LACEY, R.; HOFFMAN, W. C.; WU., W. Development of an Integration Sensor and Instrumentation System for Measuring Crop Conditions. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. XI, p. 1–16, 2009.

LI-COR, I. **LI-191R Line Quantum Sensor**. Disponível em: <https://www.licor.com/env/products/light/quantum_line.html>. Acesso em: 18 abr. 2016.

LI-COR, I. **LAI - 2200C - Plant Canopy Analyzer.** Lincoln, NELI-COR, 2014.

MASELLI, F.; CONESE, C.; PETKOV, L.; GILABERT, M. A. Environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel through the use of NOAA NDVI data. A case study: Niger 1986–89. **International Journal of Remote Sensing**, Washington, v. 14, n. 18, p. 3471–3487, dez. 1993.

MENOSSO, O. G. **Descrição Botânica**. A cultura da soja no Brasil. **Anais**...Londrina, PR, Brasil: Embrapa Soja, 2000

MERCANTE, E. **Dinâmica espectral da cultura da soja ao longo do ciclo vegetativo e sua relação com a produtividade na região oeste do Paraná**. 2007.

221 f. (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

MERCANTE, E.; LIMA, L. E. P. de; JUSTINA, D. D. D.; URIBE-OPAZO, M. A.; LAMPARELLI, R. A. C. Detection of soybean planted areas through orbital images based on culture spectral dynamics. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 32, n. 5, p. 920–931, out. 2012.

MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. **Principles of Environmental Physics**. 2. ed. New York: Edward Arnold, 1990.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologia de Aplicação**. 3ª ed. Viçosa, Minas Gerais, Basil: Editora UFV, 2007.

NASA, N. A.; S. A. **MODIS - Moderate Resolution Imaging Espectroradiometer**. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento Remoto - Princípios e Aplicações**. 3. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

PAPA, R. de A. **Comportamento espectro-temporal da cultura do feijão, por meio de dados obtidos por espectroradiometria, câmera digital e Imagem Aster**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

PINTER, P. J. J.; HATFIELD, J. L.; SCHEPERS, J. S.; BARNES, E. M.; MORAN, M. S.; DAUGHTRY, C. S. T.; UPCHURCH, D. R. Remote Sensing for Crop Management. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,** Maryland, v. 69, n. 6, p. 647–664, 2003.

POMPEU, A. S. Melhoramento do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.). In: BULISANI, E. A. (Ed.). **Feijão - Fatores de Produção e Qualidade**. 1. ed. Campinas, Brasil: Fundação Cargill, 1987. p. 326.

QUINTELA, E. D. **Manejo Integrado de Pragas do Feijoeiro**. Embrapa - Circular Técnica 46. **Anais**...Embrapa Arroz e Feijão, 2001

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; REISSER JUNIOR, C.; BARNI, N. A.; MATZENAUER, R.; DIDONÉ, I. A. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 38, n. 9, p. 1017–1023, set. 2003.

RASMUSSEN, M. S. Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR. **International Journal of Remote Sensing**, Washington, v. 13, n. 18, p. 3431–3442, dez. 1992.

RIGON, J. P. G.; BELTRÃO, N. E. de M.; CAPUANI, S.; NETO, J. F. de B.; SILVA, F. V. de F. Análise não destrutiva de pigmentos fotossintéticos em folhas de gergelim. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 258–261, 2012.

ROCHA, D. M. **Índice de clorofila no desenvolvimento de soja e milho e sua correlação com atributos químicos e físicos do solo e produtividade.** 2013. 92 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2013.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. **Anais**...Washington, USA: NASA. Goddart Space Flight Center, 1973

SALLA, L.; RODRIGUES, J. C.; MARENCO, R. A. Teores de clorofila em árvores tropicais determinados com o SPAD-502. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 5, n. S2, p. 159–161, 2007.

SCHAEFER, M. T.; FARMER, E.; SOTO-BERELOV, M.; WOODGATE, W.; JONES, S. Validation of LAI and FPAR products. In: HELD, A.; PHINN, S.; SOTO-BERELOV, M.; JONES, S. (Ed.). **AusCover good practice guidelines**: a technical handbook supporting calibration and validation activities of remotely sensed data products. St Lucia, QLD 4072, Australia: TERN AusCover, 2015. p. 352.

SILVA, O. F. DA; WANDER, A. E. **O feijão-comum no Brasil**: passado, presente e futuro. 1. ed. Santo Antônio de Goiás - GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2013.

SOUZA, C. H. W. de. **Estimativa de área de soja e milho cultivado no estado do Paraná utilizando-se do perfil espectro-temporal de índices de vegetação**. 2013. 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Oeste do Paraná. Cascavel, 2013.

STEVEN, M. D.; MALTHUS, T. J.; BARET, F.; XU, H.; CHOPPING, M. J. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 4, p. 412–422, dez. 2003.

SWAIN, P. H. **Remote sensing**: the quantitative approach. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1978.

THENKABAIL, P. S.; ENCLONA, E. A.; ASHTON, M. S.; VAN DER MEER, B. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3–4, p. 354–376, jun. 2004.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; DE PAUW, E. Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. **Remote Sensing of Environment** v. 71, n. 2, p. 158–182, fev. 2000.

TRIMBLE. **GreenSeeker 505 Hand held Sensor User Guide**, 2010. Disponível em: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-493091/GS505_HandheldSensor_UG_500-1-030_RevM_MD.pdf>

UNIVERSITY OF ILLINOIS. **Pocket guide to crop development.** Commercial Agriculture, 2004. Disponível em: <http://weeds.cropsci.illinois.edu/extension/Other/POCKETcrop.pdf>.

USGS. **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**.

VALERIANO, M. D. M. **Topodata:** guia para utilização de modelagem de dados topográficos SRTM. São José dos Campos, SPInstituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology,** online, v. 32, n. 13, p. 2088–2094, 15 nov. 2012.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A.; MACHADO, R. E. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/Landsat. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 421–430, ago. 2004.

YAO, X.; YAO, X.; JIA, W.; TIAN, Y.; NI, J.; CAO, W.; ZHU, Y. Comparison and Intercalibration of Vegetation Indices from Different Sensors for Monitoring Above-Ground Plant Nitrogen Uptake in Winter Wheat. **Sensors,** Basel, v. 13, n. 3, p. 3109–3130, 5 mar. 2013.

ZANINI, A. F. **Caracterização de alvos com imagens do sensor multiespectral aerotransportado EPS-A 31T apoiado por dados de espectroradiometria**. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Biomática). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture—a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture,** v. 36, n. 2–3, p. 113–132, nov. 2002.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 3, p. 471–475, mar. 2003.

ZHENG, G.; MOSKAL, L. M. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. **Sensors,** Basel, v. 9, n. 4, p. 2719–2745, 17 abr. 2009.

6 ARTIGOS

6.1 ARTIGO 1: Comparação entre índice de vegetação obtido por sensores remotos terrestres ativos e passivos

Resumo:

Diferentes sensores remotos terrestres, passivos e/ou ativos, são utilizados para caracterizar propriedades biofísicas das culturas por meio de Índices de Vegetação (IV). Neste sentido, o objetivo deste trabalho é comparar perfis espectro-temporais de índices de vegetação NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) obtidos por sensores remotos terrestres nas culturas da soja e feijão. Os sensores utilizados foram o sensor ativo GreenSeeker 505 Handheld e o sensor passivo hiperespectral espectroradiômetro *FieldSpec4* modelo *Standard-Res*. Os valores de NDVI do sensor passivo (NDVI FS) e ativo (NDVI GS) apresentaram alta correlação entre eles (soja rs = 0,90 e feijão rs = 0,93). Já os modelos lineares respondem bem a um ajuste ao se considerar todo o ciclo fenológico de soja (R^2 = 0,83, RMSE = 0,0161 e d_r = 0,85) e do feijão (R^2 = 0,92, RMSE = 0,0038 e d_r = 0,89). Houve saturação dos valores de NDVIs nas datas de levantamento que se situam durante o pico vegetativo das culturas e presença de eventos climáticos adverso, diminuindo a precisão dos modelos em determinados períodos do ciclo fenológico das culturas. De maneira geral, os valores dos NDVI GS e NDVI FS foram semelhantes quanto ao seu padrão espectro-temporal, sendo possível um ajuste para a soja e o feijão.

Palavras-chaves: NDVI, perfil espectro temporal, sensores terrestres.

6.1.1 Introdução

A base econômica do Brasil é composta principalmente pelo agronegócio, destacando-se neste contexto a agricultura, cada vez mais tecnificada e voltada para a exportação. Deste modo, a soja é o carro chefe do meio agrícola, estando presente de maneira predominante nos principais polos da agricultura nacional. Outra cultura relevante é a de feijão, que está presente diretamente na base alimentar brasileira, possuindo grande apelo socioeconômico.

Destacando-se como um dos principais produtores mundiais, para o ano de 2014, o Brasil apresentou produção média de aproximadamente 87 e 3,29 milhões de toneladas de soja e feijão, respectivamente. Estes montantes ficam atrás apenas dos 107 milhões de toneladas de soja dos Estados Unidos e dos 4,11 milhões de toneladas de feijão da Índia (FAOSTAT, 2016).

No cenário nacional, o estado do Paraná possui a maior produção de feijão e a segunda maior de soja. No ano safra de 2014/2015 a produção de soja aproximada dos estados de Mato Grosso e Paraná foram de 27970 e 17160 mil toneladas, respectivamente. A produção de feijão paranaense no ano safra de 2014/15 alcança

707 mil toneladas do grão, superando as 555 mil toneladas de Minas Gerais, segundo colocado (CONAB, 2016).

Para um adequado monitoramento da atividade agrícola, é necessária a realização de um acompanhamento periódico, já que as culturas apresentam uma alta dinâmica temporal (JOHANN et al., 2016).

A dinâmica espaço-temporal das culturas agrícolas tem sido monitorada com Índices de Vegetação (IV) em múltiplas datas, traduzindo as condições de seu ciclo fenológico, por meio do seu perfil espectro-temporal. A resposta espectral das culturas pode ser correlacionada com as suas biomassas, para acompanhar o desenvolvimento fenológico das culturas e obter-se o seu perfil espectro-temporal (JENSEN et al., 2002; JOHANN et al., 2013b).

Por este motivo, vários estudos se utilizaram de diversos sensores remotos terrestres, passivos e/ou ativos, para caracterizar propriedades biofísicas das culturas por meio de IVs (THENKABAIL; SMITH; DE PAUW, 2000; BROGE; LEBLANC, 2001; HANSEN; SCHJOERRING, 2003; YAO et al., 2013; ANDERSON et al., 2016). Os sensores passivos geralmente são hiperespectrais (espectroradiômetros), possuindo a capacidade de se calcular diversos IVs (THENKABAIL; SMITH; DE PAUW, 2000; BROGE; LEBLANC, 2001). Os sensores ativos possuem a vantagem de serem utilizados sob qualquer condição solar, até mesmo à noite, por emitirem luz própria (YAO et al., 2013).

Há diversos IVs, sendo o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) um dos mais utilizados. O NDVI, proposto por Rouse et al. (1973), explora o contraste nos valores de refletância dos canais do vermelho e do infravermelho próximo.

Este IV possui relação com algumas variáveis agronômicas como altura de planta, índice de área foliar, matéria seca, grau de cobertura do solo, interceptação da radiação solar global e produtividade (BARET; GUYOT, 1991). Uma boa parte dos sensores, até mesmo o mais comum, pode expressar o NDVI, porém há variação quanto a comprimentos ondas centrais e largura de bandas utilizados para o cálculo (STEVEN et al., 2003; KIM, 2010)

Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi comparar perfis espectro-temporais de IVS NDVI obtidos por sensores remotos terrestres ativos e passivos para a soja e o feijão.

6.1.2 Material e Métodos

6.1.2.1 Área de estudo

As áreas que se destinaram à soja e o feijão se localizam nas coordenadas 53°26'13" O, 23°49'54" S e 53°31'33" O, 25°09'22" S, respectivamente. São áreas agrícolas comerciais, no município de Cascavel - PR.

Segundo a classificação de Köppen, as duas áreas sob estudo pertencem ao clima temperado úmido com verão quente (cfa), caracterizado como subtropical úmido com clima oceânico, sem estação seca e quente de verão (APARECIDO et al., 2016).

O relevo para a área destinada à soja possui declividade média do terreno de 6%, com variação de 1 a 15%. Para a área destinada ao feijão, a declividade média é de 7% com variação de 2 a 20% (BRASIL, 2008; EMBRAPA, 2009). Em relação ao solo, há a presença de Neossolos Litólicos Eutróficos para a área destinada ao feijão e Latossolos Vermelhos Distroférricos na área destinada à soja (ITCG, 2008).

6.1.2.2 Soja e Feijão

A cultivar de soja Nidera 5909RG foi semeada nas datas de seis e sete de outubro de 2015, com espaçamento entre linhas de 0,45 metros e densidade de sementes de 11 sementes metro^{-1}. Entre os dias 03 e 10 de fevereiro de 2016 foi realizada a colheita da soja. No dia 08 de fevereiro de 2016 foi realizado o processo de colheita manual de amostras de produtividade

O feijão, variedade Imperador, foi semeado nas datas de 03 e 04 de março de 2016. O espaçamento entre linhas considerado foi de 0,45 m. Houve condições de desenvolvimento fenológico e climáticas adversas, que impossibilitaram o fim do ciclo. Primeiramente, houve a retirada de parte da cultura devido à má germinação e, posteriormente, houve geada nos dias 1 e 2 de maio de 2016, acarretando na retirada total nos dias 16 e 17 de maio de 2016.

6.1.2.3 Levantamento de dados

Os pontos a serem monitorados foram selecionados considerando os centroides de pixels das imagens do satélite Landsat 8. Estes pontos foram selecionados de maneira a representar parcialmente a área do pixel MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), mas com arranjo que respeita as linhas de pulverização. Assim, as coletas de campo são facilitadas e há menor danos às culturas.

Para a área monitorada com soja, houve a presença de 08 pixels MODIS, sendo que no interior cada um destes, foram selecionados 03 pixels Landsat 8,

totalizando 24 pixels monitorados. Já na área de feijão, houve a presença de dois pixels MODIS, sendo que para cada um foram selecionados 10 pixels Landsat 8, totalizando 20 pontos monitorados

As datas de levantamento de dados seguiram o calendário de passagem do satélite Landsat 8. O intervalo entre coletas foi de 16 dias, respeitando limitações impostas quanto a condições climáticas, infraestrutura disponível e manejo das culturas. Monitorou-se a soja nos Dias Após a Semeadura – DAS 34, 45,71, 76 e 110. O feijão foi monitorado nos DAS 0 (nos dias de semeadura), 10, 25, 43, 55 e 70.

6.1.2.4 Sensores remotos terrestres

O sensor terrestre GreenSeeker 505 Handheld (Trimble Agriculture, Westminster, CO, USA) é um sensor ativo que é utilizado para avaliar a variabilidade do dossel das plantas. Possui função de medir e registrar os valores do IV NDVI (NDVI GS) e das faixas do vermelho (0,66 µm) e infravermelho próximo (0,78 µm) do espectro eletromagnético, com resolução espectral de 0,025 µm (TRIMBLE, 2010).

As coletas em campo foram realizadas a uma altura de 0,80 m acima do dossel, conseguindo, desta maneira, uma largura de trabalho de 0,6 m (TRIMBLE, 2010). Assim, foi posicionado o sensor na entrelinha e percorrida uma distância de 10 m a uma velocidade média de 0,5 $m.s^{-1}$. O sensor realiza 10 leituras por segundo, totalizando 200 leituras por ponto (JUSTINA, 2014). Em cada centroide dos pixels das imagens
Landsat 8 foram realizadas 03 repetições.

O espectroradiômetro de campo, ou sensor remoto terrestre hiperespectral, *FieldSpec4* modelo *Standard-Res (*ASD, Boulder, CO, USA*)* possui a capacidade de ser utilizado tanto como sensor passivo, quanto ativo. Seu uso como sensor passivo se dá por meio de uma pistola, com uma abertura da visada (FOV – Field-of-View*)* de 25º (ASD, 2015).

A altura de coleta dos dados foi de 0,80 metros acima do dossel. As leituras foram realizadas posicionando o sensor nas entrelinhas das culturas, garantido que para cada leitura fossem observadas duas linhas de cultivo. O espectroradiômetro foi utilizado de maneira passiva e em intervalos médios de 10 minutos realizou-se a calibração do sensor, realizando leituras na superfície perfeitamente difusa.

Em cada ponto foram realizadas 03 repetições, sendo que para cada repetição foram tomadas 03 leituras no tempo, com intervalos de um segundo entre cada leitura, totalizando 09 leituras em cada um dos centroides das imagens Landsat-8.

Com base nos comprimentos de ondas centrais apresentados pelo sensor ativo, procedeu-se o cálculo do IV NDVI provindo do FieldSpec4 (NDVI FS). Realizou-

se a média dos valores de refletância em cada comprimento de onda e posterior cálculo de NDVI FS.

6.1.2.5 Modelos de comparação

A comparação entre os IVs NDVIs (NDVI FS e NDVIGS) dos diferentes sensores foi realizada para a soja e o feijão, utilizando-se de Regressão Linear Simples. Considerou-se a utilização de todos os dados levantados durante o ciclo de desenvolvimento das culturas.

Testou-se a normalidade dos dados pelo teste de *Shapiro Wilk,* a um nível de significância de 5%. Para dados normais utilizou-se a correlação Pearson (r) e, para dados não normais, a de Spearman (rs).

O melhor modelo para a comparação dos IVs dos sensores foi escolhido com base no melhor Coeficiente de Determinação (R^2). O Erro Médio (Mean Error – ME), a Raiz do Erro Médio Quadrádico (Root Mean Square Error – RMSE) e o Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott, Robeson e Matsuura (2012) (d_r) foram utilizados como indicadores estatísticos.

6.1.3 Resultados e Discussão

O comportamento espectro-temporal dos IVs NDVI de ambos os sensores foram semelhantes para cada cultura (Figura 19 e Figura 20).

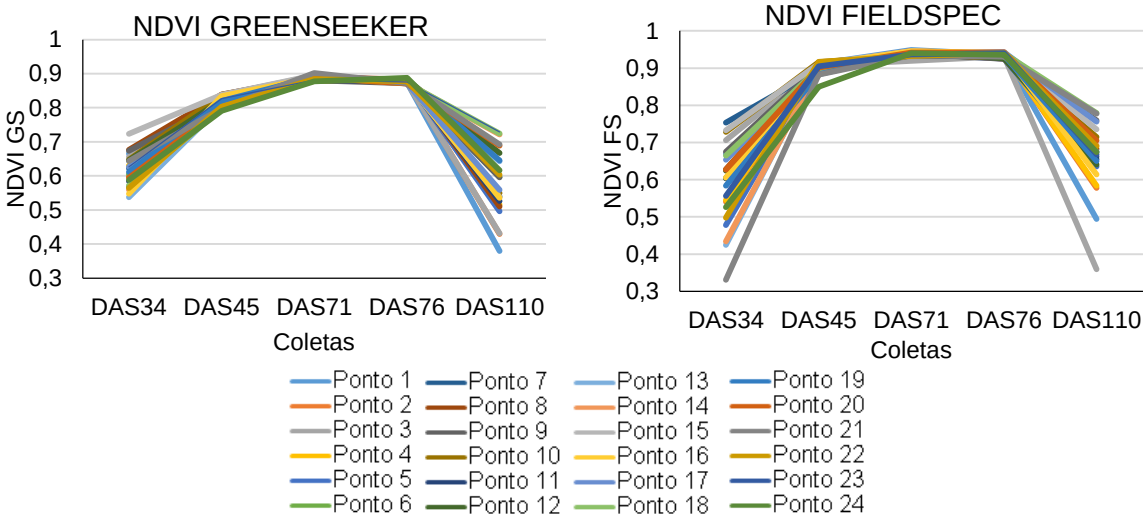


Figura 19 Perfis espectro-temporal do IV NDVI para a soja.

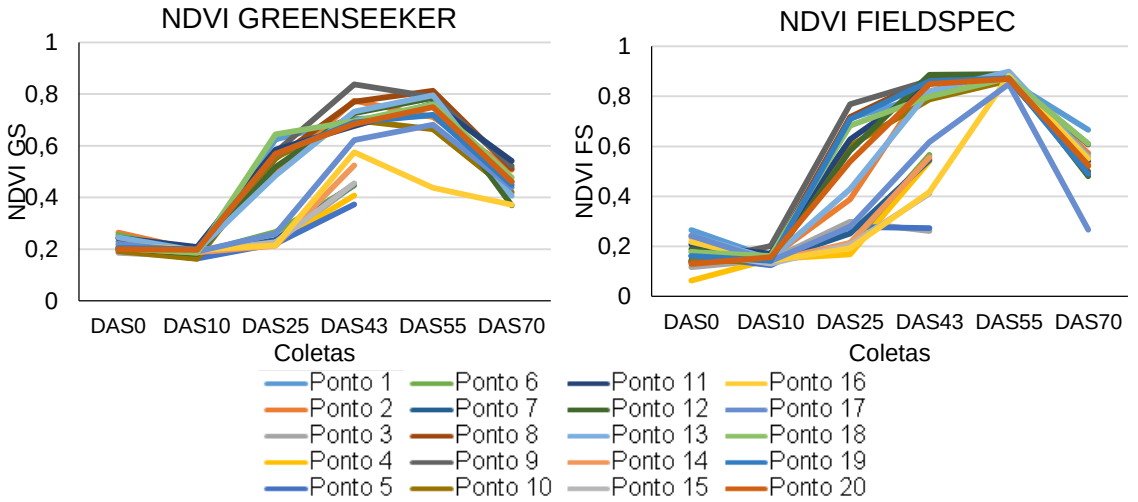


Figura 20 Perfis espectro-temporal de IV NDVI para o feijão.

As maiores amplitudes foram encontradas para os valores de NDVI FS quando comparados com os valores de NDVI GS para ambas as culturas (Tabela 4 e Tabela 5). O comportamento espectro-temporal médio dos valores de NDVI GS e NDVI FS são semelhantes quando analisados para uma mesma cultura. Há diferença entre o comportamento espectro-temporal médio da soja e do feijão (Figura 21).

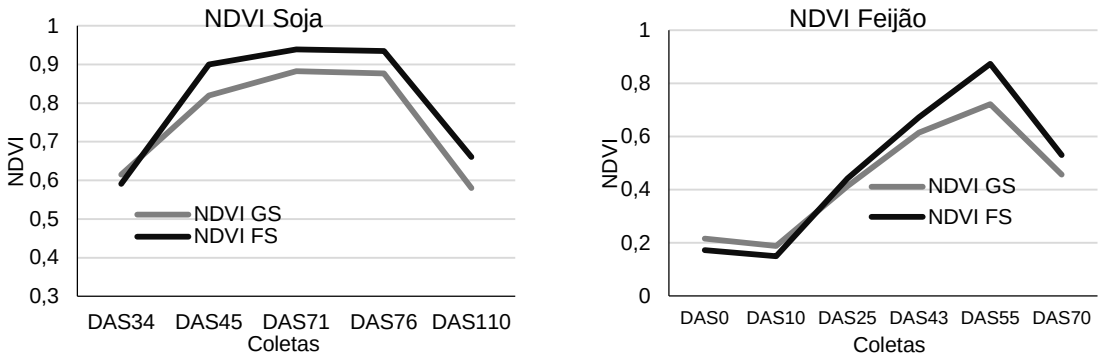


Figura 21 Perfis espectro-temporal médios de NDVI para a soja e o feijão.

Os maiores valores de NDVI para a soja correspondem ao DAS71 para ambos os sensores. No DAS110 e DAS34 ocorreram os menores valores de NDVI GS e NDVI FS, respectivamente (Tabela 4 e Figura 19). Estas datas comtemplam as fases inicial e final do ciclo fenológico da soja.

Tabela 4 Estatística descritiva dos valores de NDVI para a soja

	Min	**Q1**	**Md**	**μ**	**Q3**	**Máx**	**DP**	**cv**
NDVI GS	0,380	0,627	0,821	0,756	0,877	0,902	0,141	18,59%
NDVI FS	0,331	0,673	0,904	0,805	0,936	0,948	0,161	20,05%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; NDVI - Adimensional.

Considerando o feijão, os maiores valores de NDVI ocorreram nos DAS43 e DAS55 para os valores de NDVI GS e NDVI FS, respectivamente. A fase inicial de emergência do feijão, DAS0 e DAS 10, apresentou os menores valores de NDVI para ambos os sensores (Tabela 5 e Figura 20).

Tabela 5 Estatística descritiva dos valores de NDVI para o feijão

	Min	**Q1**	**Md**	**μ**	**Q3**	**Máx**	**DP**	**cv**
NDVI GS	0,163	0,205	0,407	0,415	0,582	0,838	0,218	52,48%
NDVI FS	0,063	0,162	0,400	0,443	0,711	0,899	0,287	64,72%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; NDVI - Adimensional.

Uma análise estatística descritiva detalhada dos valores de NDVI por dia de coleta e por cultura se encontra no APÊNDICE B – Estatísticas descritivas (Tabela 22 e Tabela 23). No APÊNDICE A - Assinaturas espectrais da soja e do feijão (Figura 37) se apresentam as assinaturas espectrais obtidas por meio do sensor passivo FieldSpec4.

O teste de normalidade por Shapiro-Wilk, que se encontra no APÊNDICE D – Teste de normalidade por Shapiro - Wilk (Tabela 28 e Tabela 29), não apresentou normalidade para os valores de NDVI GS e NDVI FS para a soja e o feijão. Devido a isto, utilizou-se a correlação de Spearman (rs).

Houve correlação significativa e altamente positiva entre os valores de NDVI GS e NDVI FS para a soja (rs = 0,9036) e para o feijão (rs=0,9346) (Tabela 6). Considerando cada coleta, o feijão apresentou mais correlações significativas entre os NDVIs. Nos DAS45 e DAS76 ocorreu correlação negativa e no DAS71 obteve-se correlação quase nula para a soja.

Tabela 6 Correlação entre os valores de NDVI FS e NDVI GS monitorados a campo

Cultura	Coletas	rs	p-valor
Soja	*Geral*	*0,903632**	*0*
	DAS34	0,612174*	0,001476
	DAS45	-0,54174	0,120978
	DAS71	0,068696	0,749765
	DAS76	-0,39191	0,058222
	DAS110	0,587826*	0,002522
Feijão	*Geral*	*0,934625**	*0*
	DAS0	0,469173*	0,036897
	DAS10	0,52782*	0,01675
	DAS25	0,855639*	1,51E-06
	DAS43	0,855639*	1,51E-06
	DAS55	0,516484	0,070749
	DAS70	0,395604	0,180889

*5% de significância; rs - correlação de Spearman.

O coeficiente de determinação R^2 entre os valores de NDVI mensurados a campo (NDVI GS e NDVI FS) foi de $R^2 = 0,8353$ na soja e $R^2 = 0,9199$ no feijão (Tabela 7 e Figura 22). Os valores altos de d_r representam que as leituras de ambos os equipamentos estão próximas.

Tabela 7 Estatística de comparação entre os valores de NDVI GS e NDVI FS para ambas as culturas

Cultura	Modelo	R^2	ME	RMSE	d_r
Soja	y = 0,7954x + 0,1155	0,8353	-0,0493	0,0337	0,7545
Feijão	y = 0,7272x + 0,0921	0,9199	0,0288	0,0107	0,8452

R^2 - Coeficiente de Determinação; ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e dr - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott.

O feijão apresentou leituras semelhantes entre os sensores passivo e ativo, apresentando maior coeficiente de determinação R^2 e coeficiente de concordância d_r e menores valores de erros ME e RMSE (Tabela 7).

Para estimar os valores de NDVI GS, considerando a soja, utiliza-se a equação $y = 0,7954x + 0,1155$, onde a variável x representa os valores de NDVI FS. A equação $y = 0,7272x + 0,0921$ representa a conversão dos valores de NDVI FS medidos no feijão para os valores de NDVI GS para a mesma.

Yao et al. (2013), ao monitorarem trigo de inverno na China, encontraram uma forte relação linear entre os valores de NDVI provindos de sensores remotos terrestres ativo (GreenSeeker) e passivo (FieldSpec4). Estes autores apresentaram a equação $y=1,076x - 0,362$ com R^2 de 0,896 e RMSE de 0,056, sendo resultados semelhantes aos apresentados neste trabalho.

Houve correlação significativa entre os valores de NDVI GS ajustados e observados a campo, para ambas as culturas (Tabela 8). Os erros encontrados foram baixos e o valor de d_r alto, o que indica que os valores ajustados e observados de NDVI GS se encontram próximos.

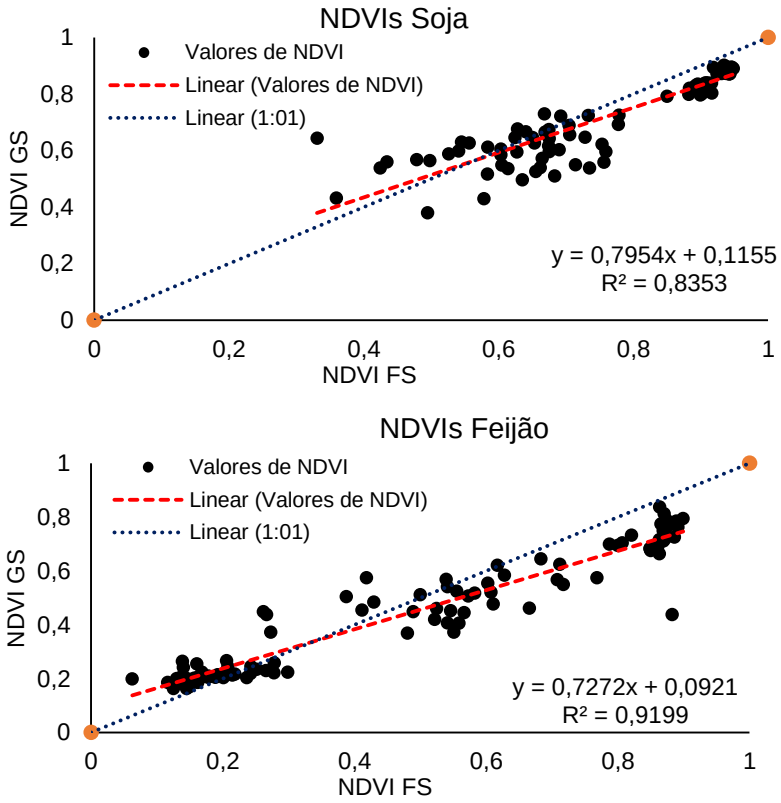


Figura 22 Dispersão entre NDVIs de diferentes sensores para a soja e o feijão.

Tabela 8 Estatística de comparação entre os valores de NDVI GS ajustados e observados para soja e feijão

Cultura	Modelo	rs	ME	RMSE	dr
Soja	y = 0,7954x + 0,1155	0,90*	0,00	0,0161	0,8475
Feijão	y = 0,7272x + 0,0921	0,93*	0,00	0,0038	0,8900

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman; ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott.

Os valores de NDVI FS e NDVI GS possuem alta correlação e os modelos lineares respondem bem a um ajuste ao se considerar todo o ciclo fenológico da soja e feijão.

A dispersão dos dados observados e ajustados de NDVI GS (Figura 23), para ambas, demonstram que há três concentrações de NDVI, DAS45, DAS71 e DAS76 para a soja. Estes valores se encontram muito próximos. Tal fato não pode ser observado para nenhuma data de coleta para o feijão.

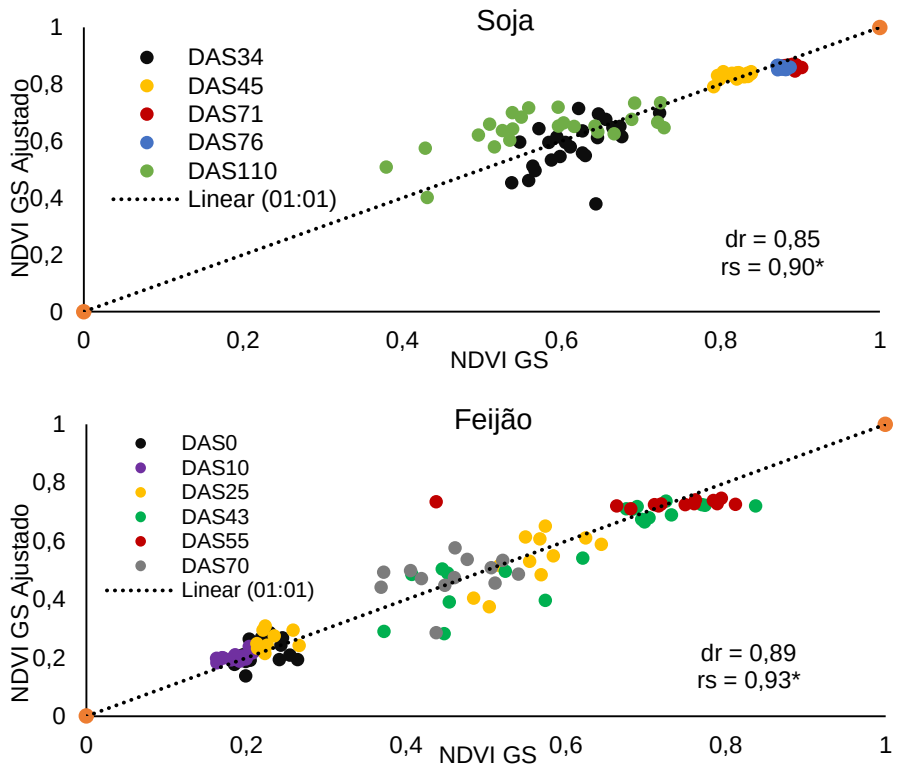


Figura 23 Dispersão entre NDVIs simulados e observados a campo para a soja e o feijão.

Na soja houve menor concordância entre os valores ajustados e observados de NDVI GS nas diferentes datas de coleta, acarretando em correlações não significativas e até mesmo negativas (Tabela 9). As duas últimas coletas no feijão possuíram menores relações entre os valores ajustados e os observados a campo (Tabela 10).

Tabela 9 Estatística de comparação entre os valores estimados e os observados de NDVIs para cada coleta de dados na soja

DAS	rs	ME	RMSE	d_r
DAS34	0,61*	0,0293	0,0058	0,2556
DAS45	0,32	-0,0119	0,0312	-0,1720
DAS71	0,07	0,0256	0,0007	-1,6316
DAS76	-0,45*	-0,0177	0,0004	-1,7495
DAS110	0,59*	0,0606	0,0089	0,4971

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman; ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott.

Tabela 10 Estatística de comparação entre os valores estimados e os observados de NDVIs para cada coleta de dados no feijão

DAS	rs	ME	RMSE	d_r
DAS0	0,47*	-0,0014	0,0013	0,2476
DAS10	0,53*	-0,0133	0,0003	0,3172
DAS25	0,86*	-0,0009	0,0033	0,8558
DAS43	0,86*	0,0333	0,0057	0,7554
DAS55	0,52	-0,0060	0,0085	0,5456
DAS70	0,40	-0,0212	0,0060	0,4947

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman;ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott.

No APÊNDICE C – Diagramas de dispersão entre NDVI GS observados e ajustados, se encontram os gráficos de dispersão entre os valores de NDVI ajustados por meio dos valores de NDVI FS e NDVI GS observados a campo para cada data de coleta.

Para os DAS45, DAS71 e DAS76 houve pouca relação entre os valores observados e ajustados para a soja. Nestas datas do desenvolvimento vegetativo da soja, o dossel encontra-se no pico vegetativo e a refletância se dá unicamente pelo dossel da cultura, ocorrendo uma variação pequena entre os dados. Embora as médias dos valores de NDVI GS e NDVI FS sejam estatisticamente diferentes para estas datas (APÊNDICE B – Estatísticas descritivas, Tabela 22), o coeficiente de variação permaneceu abaixo dos 2%.

Observa-se que os dados se encontram muito próximos nos DAS45, DAS71 e DAS76 (APÊNDICE C – Diagramas de dispersão entre NDVI GS observados e ajustados, Figura 38 e Figura 39), o que condiciona a saturação do NDVI nestas datas e a baixa sensibilidade deste para o pico vegetativo da cultura.

A saturação dos valores de NDVI para dosséis densos já foi amplamente apresentado pela comunidade científica (GITELSON et al., 2002; STEVEN et al., 2003; MERCANTE, 2007; KIM, 2010; JOHANN, 2012; YAO et al., 2013).

Além da saturação, durante o ciclo vegetativo da soja houve presença de muitos dias chuvosos (APÊNDICE I – Dados meteorológicos), o que dificultou coletas bem distribuídas no tempo e clima adequados. Assim, não se registrou algumas datas do desenvolvimento da cultura e o clima não adequado pode ter afetado os valores de refletâncias nos comprimentos de onda do sensor passivo FieldSpec4 utilizados para o cálculo do NDVI FS.

Para o feijão, nos dias 14 e 15 de abril de 2016, logo após a coleta DAS43, retirou-se parcialmente a cultura, devido à má germinação e ao crescimento. Esta retirada afetou sete pontos de monitoramento. Para os DAS55 e DAS70 o acompanhamento se realizou em 13 dos 20 pontos monitorados.

No início do mês de maio (dias 01, 02 e 03) de 2016, dois dias após a coleta DAS55, ocorreu um evento de geada, o que acarretou em perda total da lavoura. No APÊNDICE I – Dados meteorológicos pode-se observar as baixas temperaturas para esta época.

Esse menor número de pontos aliado a valores de NDVIs próximos à região de possível saturação dos dados (NDVIs próximos a 0,8 e 0,9) afetou o ajuste do modelo para o DAS55. A correlação entre os valores ajustados e observados não foi significativa para essa coleta, embora não tenha ficado muito distantes das coletas significativas.

O evento climático de geada que aconteceu, associado à perda de pontos monitorados contribuíram para reduzir a relação entre os valores observados e ajustados de NDVI. Os valores de NDVI GS para a última coleta (DAS70) de dados possuíram valores menores que o NDVI FS e com correlação menor, diminuindo o ajuste do modelo.

6.1.4 Conclusões

Os valores dos NDVI GS e NDVI FS obtidos por ambos os equipamentos foram semelhantes, quanto ao seu comportamento espectro-temporal. A concordância entre os valores de NDVI FS e NDVI GS foi alta, apresentando alta concordância e correlação.

É possível ajustar os valores de NDVI obtidos por sensores remotos terrestres ativos e passivos para a soja e o feijão. Os resultados estimados pelos modelos apresentaram alta concordância com os valores observados a campo com os sensores.

A saturação dos valores de NDVIs observada em datas de levantamento que se situam durante o pico vegetativo das culturas resultou em variabilidade muito baixa dos valores de NDVIs e menores concordâncias entre os valores de NDVIs dos equipamentos e entre os valores estimados e os observados a campo para a soja e o feijão. As condições climáticas adversas também contribuíram negativamente na comparação dos NDVIs.

Com a comparação dos valores de NDVI dos sensores ativo e passivo é possível contornar o uso de um dos sensores em um determinado período ou em todo o ciclo fenológico das culturas, motivado por problemas técnicos ou econômicos.

Estudos futuros são necessários, variando os comprimentos de ondas do sensor passivo e correlacionando estes com os valores de NDVI do sensor ativo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico – CNPq e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro, e às empresas Cooperativa Agroindustrial de Cascavel (COOPAVEL) e Plantar Agrícola pela disponibilidade das áreas monitoradas.

6.1.5 Referências

ANDERSON, H.; NILSEN, L.; TØMMERVIK, H.; KARLSEN, S.; NAGAI, S.; COOPER, E. Using Ordinary Digital Cameras in Place of Near-Infrared Sensors to Derive Vegetation Indices for Phenology Studies of High Arctic Vegetation. **Remote Sensing**, Basel, v. 8, n. 10, p. 847, 17 out. 2016.

APARECIDO, L. E. de O.; ROLIM, G. D. S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S. de; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia,** Lavras, v. 40, n. 4, p. 405–417, ago. 2016.

ASD, I. **FieldSpec4.** Boulder,PANalytical, 2015.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, n. 2–3, p. 161–173, fev. 1991.

BRASIL. **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil.São José dos Campos, SPInstituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>.

BROGE, N.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 156–172, maio 2001.

CONAB. **Levantamento de Safras - Séries Históricas (1976-2015)**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 5 abr. 2016.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasilia: Embrapa Soja, 2009.

FAOSTAT. **Production quantities by country - Average 1993-2014**. Disponível em: <http://faostat3.fao.org>. Acesso em: 2 abr. 2016.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76–87, abr. 2002.

HANSEN, P. M.; SCHJOERRING, J. K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 4, p. 542–553, ago. 2003.

ITCG. **Solos - Estado do Paraná.** Instituto de Terras Cartografia e Geociências. Curitiba,2008.

JENSEN, J. R.; BOTCHWEY, K.; BRANNAN-GALVIN, E.; JOHANNSEN, C. J.; JUMA, C.; MABOGUNJE, A. L.; MILLER, R. B.; PRICE, K. P.; REINING, P. A. C.; SKOLE, D. L.; STANCIOFF, A.; TAYLOR, D. R. F. **Down to Earth**: geographical information for sustainable development in Africa. 1. ed. Washington, USA: National Academy of Sciences, 2002.

JOHANN, J. A. **Calibração de dados agrometeorológicos e agrícolas de verão no estado do Paraná.** 2012. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, 2012.

JOHANN, J. A.; VIEIRA, J. R.; LAMPARELLI, R. A. C.; DUFT, D. G. **Agrupamento de perfis espectro-temporais do índice de vegetação EVI/Modis para culturas agrícolas de verão entre os anos-safra 2004/2005 e 2007/2008 no Estado do Paraná**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais**...Foz do Iguaçu, PR, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013

JOHANN, J. A.; BECKER, W. R.; URIBE-OPAZO, M. A.; MERCANTE, E. Uso de imagens do sensor orbital modis na estimação de datas do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja para o estado do Paraná - Brasil. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 36, n. 1, p. 126–142, fev. 2016.

JUSTINA, D. D. D. **Dinâmica espectral de soja por meio de sensores orbital e terrestre**. 2014. 76 f. (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2014.

KIM, Y. Spectral compatibility of vegetation indices across sensors: band decomposition analysis with Hyperion data. **Journal of Applied Remote Sensing,** online, v. 4, n. 1, p. 43520, 1 mar. 2010.

MERCANTE, E. **Dinâmica espectral da cultura da soja ao longo do ciclo vegetativo e sua relação com a produtividade na região oeste do Paraná**. 2007. 221 f. (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. **Anais**...Washington, USA: NASA. Goddart Space Flight Center, 1973

STEVEN, M. D.; MALTHUS, T. J.; BARET, F.; XU, H.; CHOPPING, M. J. Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. **Remote Sensing of Environment**, v. 88, n. 4, p. 412–422, dez. 2003.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; DE PAUW, E. Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 158–182, fev. 2000.

TRIMBLE. **GreenSeeker 505 Hand held Sensor User Guide**, 2010. Disponível em: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-493091/GS505_HandheldSensor_UG_500-1-030_RevM_MD.pdf>.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology,** online, v. 32, n. 13, p. 2088–2094, 15 nov. 2012.

YAO, X.; YAO, X.; JIA, W.; TIAN, Y.; NI, J.; CAO, W.; ZHU, Y. Comparison and Intercalibration of Vegetation Indices from Different Sensors for Monitoring Above-Ground Plant Nitrogen Uptake in Winter Wheat. **Sensors,** Basel, v. 13, n. 3, p. 3109–3130, 5 mar. 2013.

6.2 ARTIGO 2: Utilização de sensoriamento remoto terrestre para estimar parâmetros biofísicos de soja e feijão

Resumo:

A dinâmica espaço-temporal das culturas agrícolas pode ser monitorada por meio de Índices de Vegetação (IV) em múltiplas datas. Em geral, a utilização do IV, integrado num determinando período do desenvolvimento das culturas ou, ainda, em todo o seu ciclo, tem gerado boas relações com parâmetros agronômicos. Há diversos IVs, sendo o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) um dos mais utilizados. O NDVI possui relação com algumas variáveis agronômicas como altura de planta, Índice de Área Foliar (IAF), matéria seca, índice de clorofila (IC), grau de cobertura do solo e radiação fotossinteticamente ativa interceptada (RFAI). Neste sentido, o objetivo deste estudo foi utilizar perfis espectro-temporais de NDVI obtidos por sensores remotos terrestres ativos (NDVI GS) e passivos (NDVI FS) para estimar e comparar diferentes parâmetros biofísicos da soja e do feijão. As variáveis IAF, altura para a soja e o feijão e IC para a soja obtiveram melhores resultados ao serem estimadas por meio dos valores de NDVI GS. RFAI para ambas as culturas e IC para o feijão obtiveram melhores ajustes consideram os modelos que se utilizavam de valores de NDVI FS. Para a variável produtividade não houve correlação significativa entre os valores de Produtividade e os NDVI GS e NDVI FS. Entretanto, apresentou relações com o acúmulo de refletância observados nas bandas RED e NIR para ambos os equipamentos ao decorrer de datas de coletas variadas. As melhores relações da produtividade se deram ao utilizar o acúmulo dos valores de refletância das bandas do espectroradiômetro nas datas DAS76 e DAS71. É possível estimar parâmetros biofísicos da soja e do feijão por meio da utilização de sensores terrestres ativos e passivos. Destaca-se ainda que, de maneira geral, o sensor ativo apresentou acurácias superiores ao sensor passivo nas estimativas dos parâmetros biofísicos de soja e feijão.

Palavras-chaves: índice de área foliar, modelos, NDVI, radiação fotossinteticamente ativa.

6.2.1 Introdução

Soja e feijão possuem grande importância no meio socioeconômico nacional. A soja está presente de maneira predominante nos principais polos da agricultura nacional e o feijão é a base alimentar das famílias brasileiras.

A produção média brasileira foi de aproximadamente 87 e 3,29 milhões de toneladas de soja e feijão, respectivamente, configurando-se assim como o segundo maior produto mundial, estando atrás apenas dos 107 milhões de toneladas de soja dos Estados Unidos e dos 4,11 milhões de toneladas de feijão da Índia (FAOSTAT, 2016).

No ano safra de 2014/2015, considerando o cenário nacional, a produção de soja aproximada dos estados de Mato Grosso e Paraná foram de 27970 e 17160 mil toneladas respectivamente. Já a produção de feijão paranaense no ano safra de 2014/15 alcançou 707 mil toneladas do grão, superando as 555 mil toneladas de

Minas Gerais, segundo colocado (CONAB, 2016). Desta forma, o estado do Paraná destaca-se como um dos principais produtores nacional para a soja e o feijão.

Devido à importância socioeconômica da soja e do feijão, torna-se imprescindível um adequado acompanhamento periódico, uma vez que estas apresentam uma alta dinâmica temporal (MERCANTE et al., 2012; JOHANN et al., 2013a).

Aliado com métodos estatísticos, o Sensoriamento Remoto (SR) é uma ferramenta que possibilita o acompanhamento da dinâmica espaço-temporal das culturas agrícolas, de maneira rápida e quase que automatizada (THENKABAIL et al., 2004; CAMPBELL et al., 2007).

Isto ocorre por meio de Índices de Vegetação (IV) em múltiplas datas, traduzindo as condições de seu ciclo fenológico (SANTOS et al., 2014; JOHANN et al., 2016). Nesse sentido, sando a resposta espectral das culturas, ao ser correlacionada com as suas biomassas, pode-se acompanhar o desenvolvimento fenológico das culturas e obter-se o seu perfil espectro-temporal (JENSEN et al., 2002; MERCANTE, 2007; JOHANN et al., 2012).

Em geral, a utilização do IV, num determinando período do desenvolvimento das culturas ou em todo o seu ciclo possui boas relações com parâmetros agronômicos, como a produtividade, pois contemplam a história da evolução da biomassa (RASMUSSEN, 1992; MASELLI et al., 1993). Desta maneira, vários estudos utilizaram diversos sensores remotos terrestres, passivos e/ou ativos, para caracterizar propriedades biofísicas de diferentes dosséis por meio de IVs (THENKABAIL; SMITH; DE PAUW, 2000; BROGE; LEBLANC, 2001; HANSEN; SCHJOERRING, 2003; HABOUDANE, 2004; YAO et al., 2013; ANDERSON et al., 2016).

O IV NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), proposto por Rouse et al. (1973), explora o contraste nos valores de refletância dos canais do vermelho e do infravermelho próximo, sendo este um dos IVs mais utilizados. Esse IV possui relação com algumas variáveis agronômicas como altura de planta, Índice de Área Foliar – IAF, matéria seca, grau de cobertura do solo e interceptação da radiação solar global (BARET; GUYOT, 1991).

O IAF é uma importante propriedade estrutural do dossel das culturas. Define-se como sendo a razão entre o total da superfície foliar dividido por unidade de solo em que a vegetação cresce (LAN et al., 2009; ZHENG; MOSKAL, 2009; GUPTA et al., 2016).

Este índice é a variável chave usada nos mais diversos modelos de crescimento das culturas e frequentemente relacionada com a evolução da resposta

espectral do dosséis ao longo das estações de crescimento (BROGE; LEBLANC, 2001).

Deste modo, técnicas de SR se apresentam como ferramentas viáveis para estimar valores de IAF de maneira rápida e em escala regional com nível razoável de precisão. Uma das maneiras simples e mais comuns de se relacionar dados de SR e IAF é por meio dos IVs (ZHANG et al., 2003; XAVIER; VETTORAZZI; MACHADO, 2004).

Já a Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) compreende a faixa do visível (0,4 a 0,7 µm). A produção de biomassa pelas culturas está relacionada à quantidade de RFA interceptada (RFAI) e absorvida (RFAA) pelas folhas, bem como à eficiência com que estas convertem a energia radiante em energia química, pela fotossíntese (RADIN et al., 2003; CARON et al., 2012).

A relação entre a quantidade de RFA e a quantidade de matéria seca produzida tem sido usada para determinar a eficiência do uso da radiação (MONTEITH; UNSWORTH, 1990). A quantidade de RFA interceptada é influenciada pelas condições de iluminação no dossel da vegetação (SCHAEFER et al., 2015)

Moreira (2007) define que a RFAI é obtida pela diferença entre a densidade do fluxo incidente acima do dossel e a densidade de fluxo transmitida através do dossel até a base da cultura. Segundo o mesmo autor, a RFAA considera a RAFAI, descontando as densidades de fluxos refletidos pelo solo e pelo dossel da cultura.

Da RFA que incide sobre o dossel, a maior parte é absorvida no mesófilo das folhas pelos pigmentos fotossintetizantes existentes nos cloroplastos, predominantemente as clorofilas *a* e *b* (CUNHA, 2004).

O teor de clorofila presente nas plantas é um importante parâmetro para sustentar a vida saudável de qualquer cultura (GUPTA et al., 2016). Este teor de clorofila também é um bom indicador de estresse e está fortemente relacionado com o teor de nitrogênio da planta (BACOUR et al., 2006).

Os fatores relacionados à variabilidade das culturas, que possuem influência sobre a produção agrícola, são densidade e altura de planta, estresse de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, etc.) e hídrico, propriedades biofísicas (RFAI, IAF e biomassa), teor de clorofila nas plantas e qualidade dos grãos (ZHANG; WANG; WANG, 2002).

A estimativa de produtividade de culturas agrícolas tem como objetivo representar de forma simplificada o controle que o ambiente exerce sobre a cultura em condições de campo, simulando o seu desenvolvimento da semeadura à colheita (JOHANN, 2012).

O modelo espectral para estimar produtividade, por meio da utilização de informações de imagens de satélites, tem se mostrado uma alternativa viável no

monitoramento regional de culturas agrícolas. Esses métodos relacionam os IVs à produtividade das culturas por meio de equações de regressão (JOHANN, 2012).

O objetivo deste estudo foi utilizar perfis espectro-temporais de IV NDVI obtidos por diferentes sensores remotos terrestres para estimar e comparar diferentes parâmetros biofísicos para as culturas de soja e feijão.

6.2.2 Material e Métodos

6.2.2.1 Área de estudo

As áreas da soja e do feijão se localizam nas coordenadas 53°26'13" O, 23°49'54" S e 53°31'33" O, 25°09'22" S, respectivamente. São áreas agrícolas comerciais, no município de Cascavel – PR.

Segundo a classificação de Köppen, as duas áreas sob estudo pertencem ao clima temperado úmido com verão quente (cfa), com comportamento subtropical úmido com clima oceânico, sem estação seca e quente de verão (APARECIDO et al., 2016),

O relevo para a área destinada à soja possui declividade média do terreno de 6%, com variação de 1 a 15%. Para a área destinada ao feijão, a declividade média é de 7% com variação de 2 a 20% (BRASIL, 2008; EMBRAPA, 2009). Em relação ao solo, a área destinada ao feijão possui presença de Neossolos Litólicos, e na área destinada a soja há presença dos Latossolos Vermelhos Distroférricos (ITCG, 2008).

6.2.2.2 Soja e feijão

A cultivar de soja, Nidera 5909RG, foi semeada nas datas de 06 e 07 de outubro de 2015, com espaçamento entre linhas de 0,45 metros e densidade de sementes de 11 sementes/metro. Entre os dias 03 e 10 de fevereiro de 2016 foi realizada a colheita da soja. No dia 08 de fevereiro de 2016 foi realizado o processo de colheita manual de amostras de produtividade

O feijão, variedade Imperador, foi semeado nas datas de 03 e 04 de março de 2016. O espaçamento considerado para a cultura foi de 0,45 m. Houve condições de desenvolvimento fenológico e climáticas adversas, que impossibilitaram o fim do ciclo. Primeiramente, houve a retirada de parte da cultura devido à má germinação e, posteriormente, houve geada nos dias 1 e 2 de maio de 2016, acarretando na retirada total nos dias 16 e 17 de maio de 2016.

6.2.2.3 Levantamento de dados

Os pontos a serem monitorados foram selecionados considerando os centroides de pixels das imagens do satélite Landsat 8. Estes pontos foram selecionados de maneira a representar parcialmente a área do pixel MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), mas com um arranjo que respeita as linhas de pulverização. Assim, as coletas de campo são facilitadas e há menor danos as culturas.

Para a área monitorada com soja houve a presença de 08 pixels MODIS, sendo que, no interior cada um destes, foram selecionados 03 pixels Landsat8, totalizando 24 pixels monitorados. Considerando a área de feijão, houve a presença de 02 pixels MODIS, sendo que para cada um foram selecionados 10 pixels Landsat8, totalizando 20 pontos monitorados

As datas de levantamento de dados seguiram o calendário de passagem do satélite Landsat 8. O intervalo entre coletas foi de 16 dias, respeitando limitações impostas quanto a condições climáticas, infraestrutura disponível e manejo das culturas. Monitorou-se a soja nos Dias Após a Semeadura – DAS 34, 45,71, 76 e 110. Já o feijão foi monitoradoa nos DAS 0 (nos dias de semeadura da cultura), 10, 25, 43, 55 e 70.

6.2.2.4 Sensores remotos terrestres

Os valores de NDVI foram obtidos a campo por meio de um sensor ativo e um sensor passivo para a soja e o feijão. O sensor terrestre GreenSeeker 505 Handheld (Trimble Agriculture, Westminster, CO, USA) é um sensor ativo que é utilizado para avaliar a variabilidade do dossel das culturas. Possui função de medir e registrar os valores do IV NDVI (NDVI GS) e das faixas do vermelho (RED GS - 0,66 µm) e infravermelho próximo (NIR GS - 0,78 µm) do espectro eletromagnético, com resolução espectral de 0,025 µm (TRIMBLE, 2010).

O espectroradiômetro de campo, ou sensor remoto terrestre hiperespectral, *FieldSpec4* modelo *Standard-Res (ASD,* Boulder, CO, USA*)*, possui a capacidade de ser utilizado tanto como sensor passivo, quanto ativo. Seu uso se deu como sensor passivo, por meio de uma pistola, com uma abertura da visada (FOV – *Field-of-View)* de 25º (ASD, 2015).

Com base nos comprimentos de ondas centrais e resolução espectral apresentado pelo sensor ativo (RED GS e NIR GS), realizou-se o cálculo da média dos respectivos valores de refletância nos determinados comprimentos de onda, criando-se as bandas RED FS e NIR FS. Com base nestas bandas, realizou-se o cálculo do IV NDVI FS provindo do FieldSpec4.

6.2.2.5 Levantamentos de parâmetros biofísicos

Para as medidas de IAF utilizou-se o sensor LAI-2200C (*LI-COR, Lincoln, Nebraska USA*). Este equipamento é utilizado com a principal função de medir o IAF das culturas. Seu sensor é composto por cinco anéis, que realizam medidas de IAF nos ângulos zenitais de 7, 23, 38, 53 e 68º (LI-COR, 2014).

O sensor LI-191R *Line Quantum* (LI-COR, Lincoln, Nebraska *USA*), ou simplesmente LI-191R, é utilizado para medição da Radiação fotossinteticamente ativa (RFA). Este sensor consiste de uma barra de quartzo de um metro longitudinal, acoplado no *console* LAI220C e lê comprimentos de onda até 0,7 µm (LI-COR, 2012).

A partir da medida da RFA é possível quantificar a Radiação Fotossinteticamente Ativa Interceptada (RFAI) pelo dossel da vegetação. A RFAI é obtida pela diferença entre as medidas feitas acima do dossel da vegetação e abaixo do dossel (MOREIRA, 2007).

O valor do índice de clorofila - IC total foi analisado por meio de um clorofilômetro Clorofilog CFL1030 (Falker Automação Agrícola Ltda, Porto Alegre, RS, BR). Este equipamento usa três faixas de frequência de luz (0,635; 0,66 e 0,85 µm) do vermelho e do infravermelho, permitindo uma análise detalhada e obtendo medição rápida e precisa. Estas medições podem ser visualizadas instantaneamente ou armazenadas para a análise no computador. A medição ótica analisa a absorção da luz pela folha, indicando a presença da clorofila (FALKER, 2008).

Na obtenção das alturas das culturas se utilizou uma haste de madeira de um metro e/ou uma trena metálica. Foram realizadas 03 repetições para cada centroide dos pixels Landsat 8 monitorados; assim, mediu-se três plantas aleatórias em cada ponto de amostragem.

6.2.2.6 Produtividade

A produtividade foi avaliada apenas para a soja, considerando amostras de produtividade de 17 pontos. Os dados de produtividade foram levantados por meio de colheita manual em cada ponto monitorado. As amostragens contemplam um metro linear de duas linhas de semeadura, totalizando 0,9 m² retirados em cada ponto.

A debulha e a limpeza das amostras de soja foram realizadas de maneira manual. A determinação do peso seco do produto foi realizada em estufa a 105 ºC durante 24 horas. De posse dos valores de massa seca, corrigiu-se a umidade para 13% b.u (base úmida) e estimou-se a produtividade de cada ponto monitorado.

6.2.2.7 Modelos de estimativa de parâmetros biofísicos

Para os parâmetros biofísicos (IC, IAF, RFAI e Altura) das culturas, promoveu-se a construção de modelos de Regressão Linear e Não-Linear para estimá-los por meio dos valores de NDVI FS e NDVI GS. Este processo foi realizado para cada cultura.

Utilizou-se um modelo espectral para estimar valores de produtividade, por meio de comparação com os parâmetros biofísicos e os valores de NDVIs.

Testou-se a normalidade dos dados pelo teste de *Shapiro Wilk,* a nível de significância de 5%. Para dados normais utilizou-se a correlação Pearson (r) e, para dados não normais, a de Spearman (rs).

A comparação entre os parâmetros biofísicos estimados e os observados procedeu-se por meio dos indicadores estatísticos Coeficiente de Determinação (R^2), Erro Médio (Mean Error – ME), Raiz do Erro Médio Quadrático (Root Mean Square Error – RMSE) e o Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott, Robeson e Matsuura (2012) (d_r).

6.2.3 Resultados e Discussão

Os comportamentos espectro-temporais dos IVs NDVI de ambos os sensores foram semelhantes para a soja e o feijão (Figura 24 e Figura 25). Os perfis temporais de IAF, IC e Altura apresentaram menor variação visual quando comparados com o perfil de RFAI para a soja (Figura 24).

Foram retirados 07 pontos monitorados para o feijão (Figura 25) durante o intervalo da quarta para a quinta coleta (DAS43 para o DAS55). Além disso, para os valores de IAF, RFAI e altura não se obteve dados no primeiro dia de coleta (DAS0) no feijão, pois se encontrava em fase de término da semeadura. O IC obteve valor a partir da terceira coleta (DAS25), devido ao pequeno tamanho da folha nas coletas anteriores, o que impossibilitava a utilização do clorofilômetro. Por estes motivos que alguns pontos e algumas variáveis não apresentam perfis temporais completos.

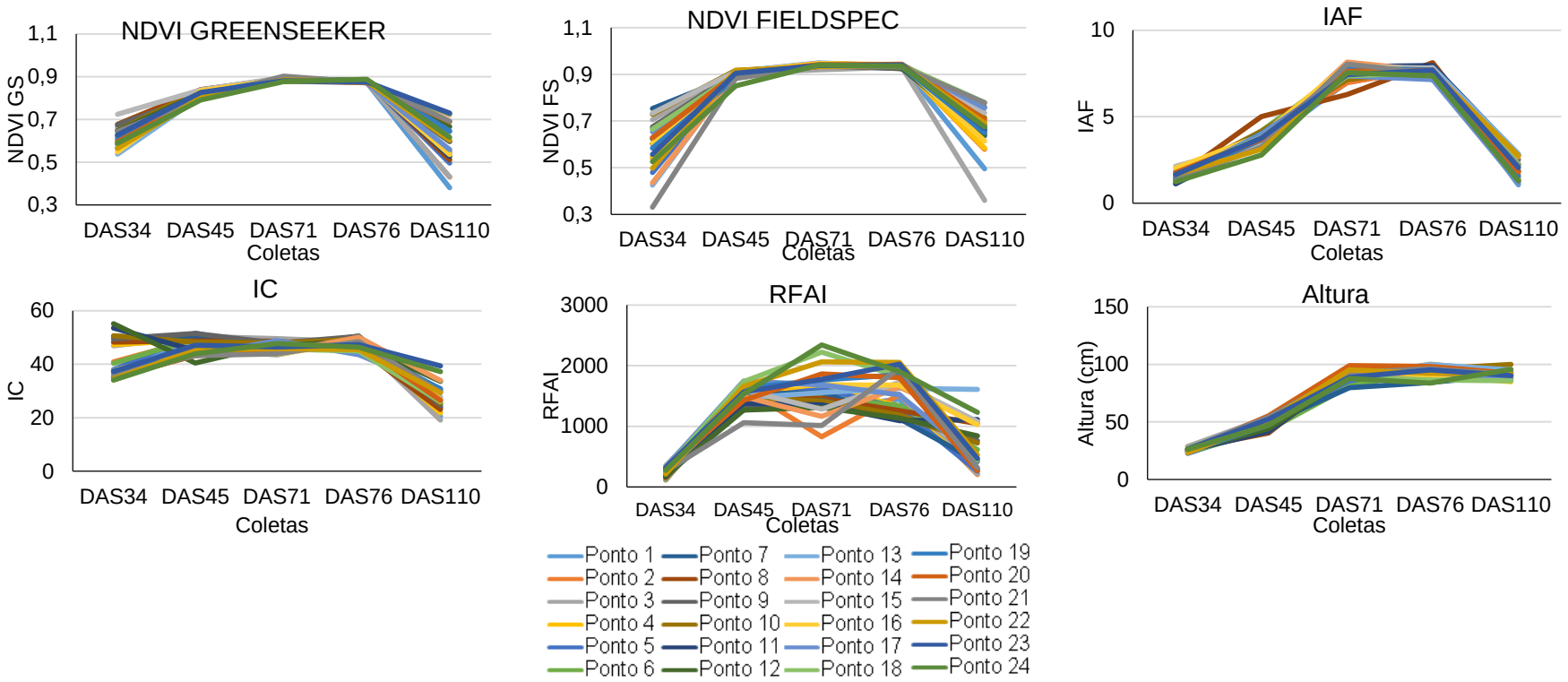


Figura 24 Perfis espectro-temporal de NDVI, IAF, IC, RFAI e Altura de plantas para a soja.

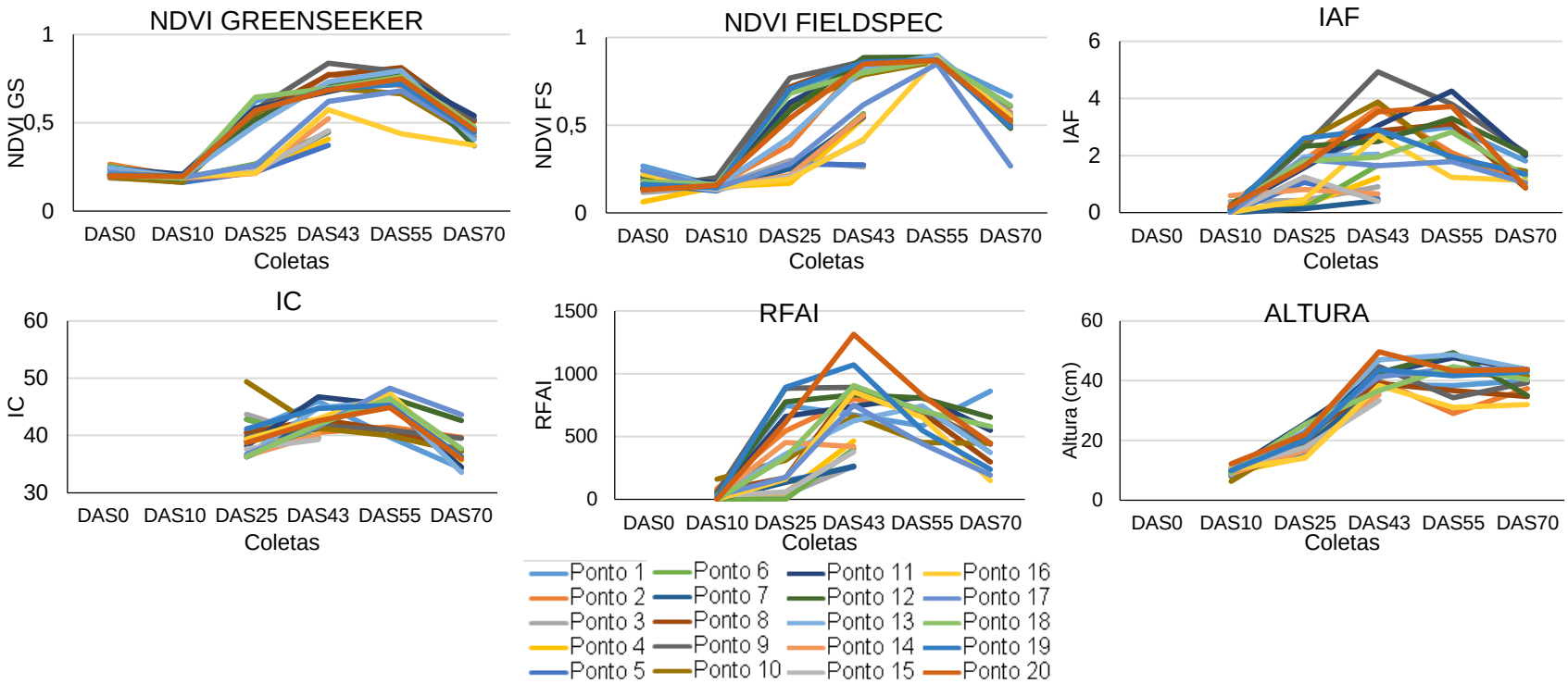


Figura 25 Perfis espectro-temporal de NDVI, IAF, IC, RFAI e Altura de plantas para o feijão.

Os valores de NDVI FS possuíram maiores amplitudes quando comparados com os valores de NDVI GS para a soja e o feijão (Tabela 11 e Tabela 12, respectivamente). O comportamento espectro-temporal médio do NDVI é diferente entre a soja (Figura 26) e o feijão (Figura 27). Entretanto, essa variação não ocorre considerando sensores diferentes e a mesma cultura.

Para a soja, os perfis temporais médios dos parâmetros biofísicos (IAF, IC, RFAI e Altura) apresentaram amplitudes e médias maiores quando comparados com o feijão. A produtividade média da soja foi de 4555,4 kg ha^{-1}, com variação de 3442,3 a 6241,7 kg ha^{-1}.

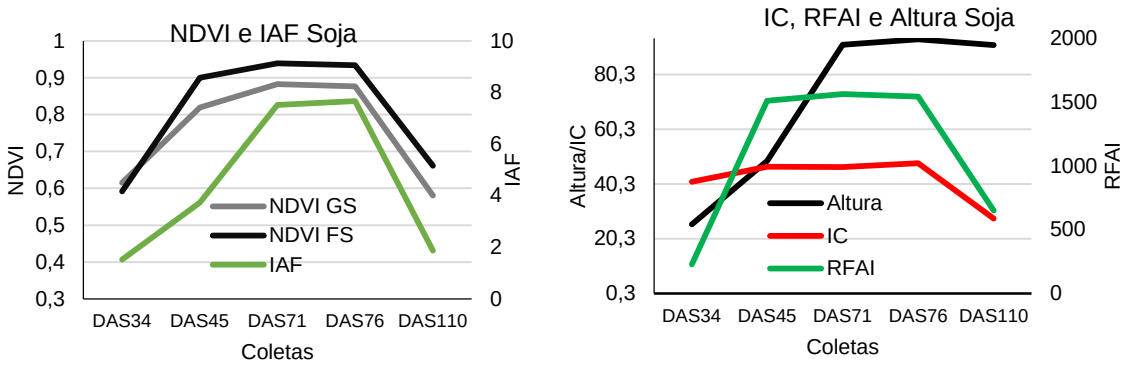


Figura 26 Perfis espectro-temporal médios de NDVI, IAF, IC, RFAI e Altura média das plantas para a soja.

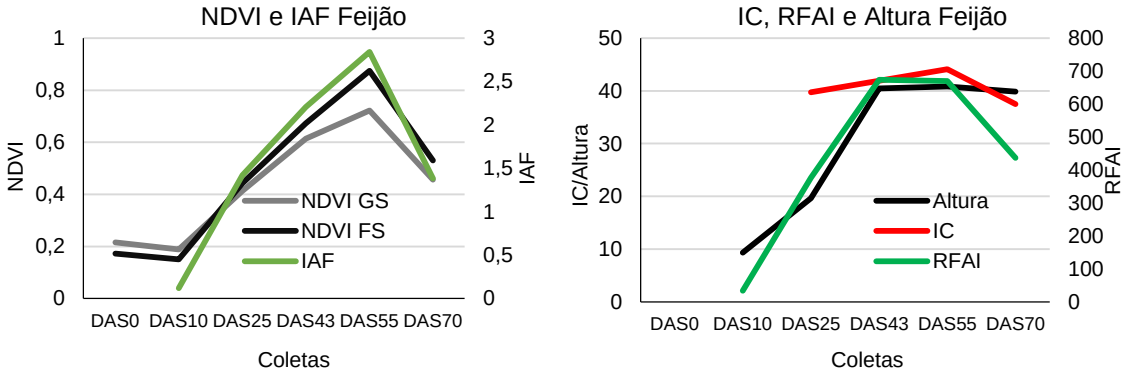


Figura 27 Perfis espectro-temporal médios de NDVI, IAF, IC, RFAI e Altura média das plantas para o feijão.

No APÊNDICE B – Estatísticas descritivas se encontram tabelas com o sumário estatístico para todas as variáveis, considerando a abordagem para cada coleta e no total do acompanhamento de cada cultura.

Tabela 11 Estatística descritiva dos IVs e parâmetros biofísicos para a soja

	Min	Q1	Md	μ	Q3	Máx	DP	cv
NDVI GS	0,380	0,627	0,821	0,756	0,877	0,902	0,141	18,59%
NDVI FS	0,331	0,673	0,904	0,805	0,936	0,948	0,161	20,05%
IAF	1,057	1,702	3,728	4,460	7,532	8,160	2,707	60,70%
IC	19,160	36,510	45,680	41,950	48,350	55,170	8,625	20,56%
RFAI	116,500	334,200	1300,500	1098,800	1598,500	2343,400	623,642	56,76%
Altura	22,670	45,670	87,830	69,890	92,710	100,170	28,152	40,28%
Produtividade	3442,3	4026,2	4462,7	4555, 4	4861,9	6241,7	779,8	17,12%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; NDVI, IC - Adimensional; Altura - cm; IAF - (m² de dossel)/(m² de solo); RFAI - W m^{-2}; Produtividade - valores de produtividade em kg ha^{-1}.

Tabela 12 Estatística descritiva dos IVs e parâmetros biofísicos para o feijão

	Min	Q1	Md	μ	Q3	Máx	DP	cv
NDVI GS	0,163	0,205	0,407	0,415	0,582	0,838	0,218	53,48%
NDVI FS	0,063	0,162	0,400	0,443	0,711	0,899	0,287	64,72%
IAF	0,000	0,387	1,407	1,510	2,248	4,930	1,237	87,9%
IC	33,530	38,790	40,500	40,830	42,830	49,380	3,595	8,9%
RFAI	0,000	71,840	429,200	419,300	700,500	1316,000	327,305	76,3%
Altura	6,333	14,830	32,670	28,340	41,170	49,670	14,006	42,9%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; NDVI, IC - Adimensional; Altura - cm; IAF - (m² de dossel)/(m² de solo); RFAI - W m^{-2}.

O teste de normalidade por Shapiro-Wilk, que se encontra no APÊNDICE D – Teste de normalidade por Shapiro - Wilk (Tabela 28 e Tabela 29), não apresentou normalidade para os valores de NDVIs e parâmetros biofísicos para a soja e o feijão. Devido a isto, utilizou-se a correlação de Spearman (rs).

Houve correlação (rs) significativa e positiva entre as variáveis biofísicas das culturas e os NDVI FS e NDVI GS (Tabela 13 e Tabela 14). Na soja e no feijão, o parâmetro IAF apresentou a maior correlação com os NDVI.

Considerando o parâmetro altura de planta, ao desconsiderar a última data de coleta para a soja, a correlação dos dados aumentou de 0,4464 para 0,8136 considerando o NDVI GS e de 0,5485 para 0,8375, considerando o NDVI FS. Nessa última leitura, a soja se encontrava em senescência, o que acarreta uma diminuição dos valores de NDVIs; entretanto, a altura das plantas se mantêm constantes, não seguindo a relação inicial crescente entre crescimento e NDVI.

Após o ajuste da variável altura, o menor valor de correlação com os NDVI é do parâmetro IC, para ambas as culturas. A exceção se deu por conta da produtividade da soja, que não apresentou correlação significativa com nenhum NDVI (Tabela 13).

Tabela 13 Correlação entre IVs e parâmetros biofísicos para a soja

	NDVI GS		NDVI FS	
	Rs	p-valor	rs	p-valor
IC	0,5892*	0,0000	0,5226*	0,0000
Altura	0,8136*	0,0000	0,8375*	0,0000
IAF	0,8793*	0,0000	0,8728*	0,0000
RFAI	0,6785*	0,0000	0,7615*	0,0000
Produtividade	-0,0230	0,8360	-0,0110	0,9190

5% de significância.

Tabela 14 Correlação entre IVs e parâmetros biofísicos para o feijão

	NDVI GS		NDVI FS	
	Rs	p-valor	rs	p-valor
IC	0,4891*	0,0000	0,5164*	0,0000
Altura	0,7818*	0,0000	0,7733*	0,0000
IAF	0,9021*	0,0000	0,8742*	0,0000
RFAI	0,8579*	0,0000	0,8496*	0,0000

5% de significância.

Os modelos de ajustes entre os valores de NDVI GS e NDVI FS com os parâmetros biofísicos apresentaram bons desempenhos. IAF, RFAI e altura apresentaram R^2 acima de 0,60, rs acima de 0,68 e d_r acima de 0,70 para os modelos baseados nos NDVI GS e NDVI FS, na soja e no feijão (Figura 28 a Figura 35 e Tabela 15 a

Tabela 18).

No APÊNDICE F – Diagramas de dispersão entre valores observados e ajustados (IAF, IC, RFAI e Altura) se encontram diagramas de dispersão com as variáveis estimadas e as observadas em cada coleta a campo para soja e feijão e ambos os sensores (Figura 40 a Figura 48). No APÊNDICE E – Estatística de concordância encontram-se as estatísticas de concordância entre os valores ajustados e os observados para cada parâmetro biofísico e em cada data de coleta.

Os modelos exponenciais foram utilizados para o ajuste das variáveis IAF, RFAI e altura, considerando a soja e valores de NDVI GS e NDVI FS. O parâmetro altura, para o feijão, ajustou-se considerando a utilização de potência em ambos os NDVI. Para as demais variáveis, foram utilizadas equações lineares simples.

O parâmetro IAF apresentou melhores resultados considerando o ajuste por meio do NDVI GS tanto para a soja quanto para o feijão (Tabela 15, Figura 28 e Figura 29). Papadavid et al. (2013), ao comparar os valores de NDVI e IAF para a cultura de feijão preto, encontrou um ajuste potencial ($y=0,4x^{0,4}$) com coeficiente R^2 de 0,94.

Os valores de d_r próximos a 0,8 destacam que os valores estimados e os observados de IAF estão próximos. Destaca-se que, para o feijão, houve valores

menores de erros ME e RMSE e maior valor de correlação rs entre as variáveis estimadas e observadas.

Tabela 15 Estatística de comparação entre os valores de IAF observados e preditos para ambos os sensores para soja e feijão

Cultura	IV	Modelo	R^2	Rs	ME	RMSE	d_r
Soja	NDVI GS	$y = 0{,}1055e^{4{,}6533x}$	0,8439	0,88*	0,2172	1,0456	0,8198
	NDVI FS	$y = 0{,}1552e^{3{,}8892x}$	0,7783	0,87*	0,2957	1,7861	0,7689
Feijão	NDVI GS	y = 5,075x - 0,8281	0,7899	0,90*	0,0000	0,3180	0,7882
	NDVI FS	y = 3,7422x - 0,3851	0,7306	0,87*	0,0000	0,4076	0,7670

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

Em uma comparação entre os valores ajustados e os observados em cada dia de coleta de dados (Tabela 30 e Tabela 34, Figura 40 e Figura 41), o melhor ajuste encontrado para o IAF, considerando a soja, foi no DAS110, por meio do NDVI GS. Já para o feijão, o melhor ajuste de IAF se deu por meio do NDVI GS, considerando o DAS55, embora o desempenho nos DAS25, DAS43 e DAS55 e ambos os sensores tenham conseguidos resultados satisfatórios.

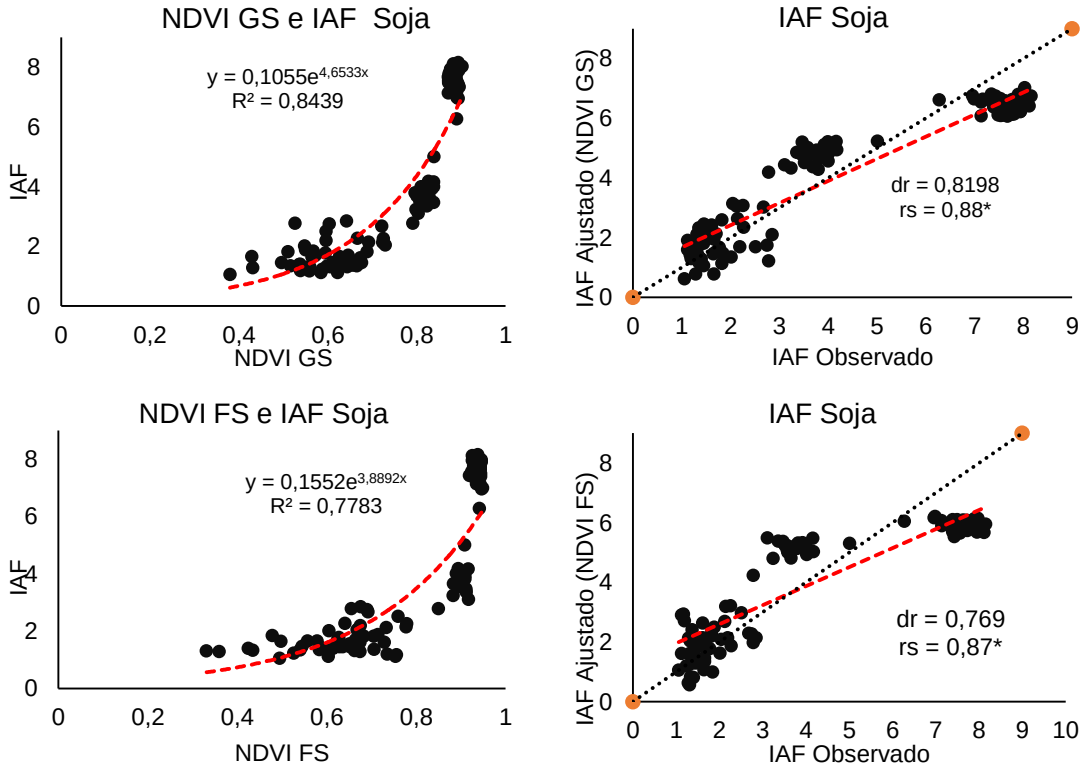


Figura 28 Relação entre NDVI e IAF para a soja.

As coletas DAS 71 e DAS76 para a soja apresentaram valores médios de IAF acima de 07. Segundo a literatura, geralmente valores de IAF acima de 02, acabam

saturando a estimação por NDVI (HANSEN; SCHJOERRING, 2003; HABOUDANE, 2004).

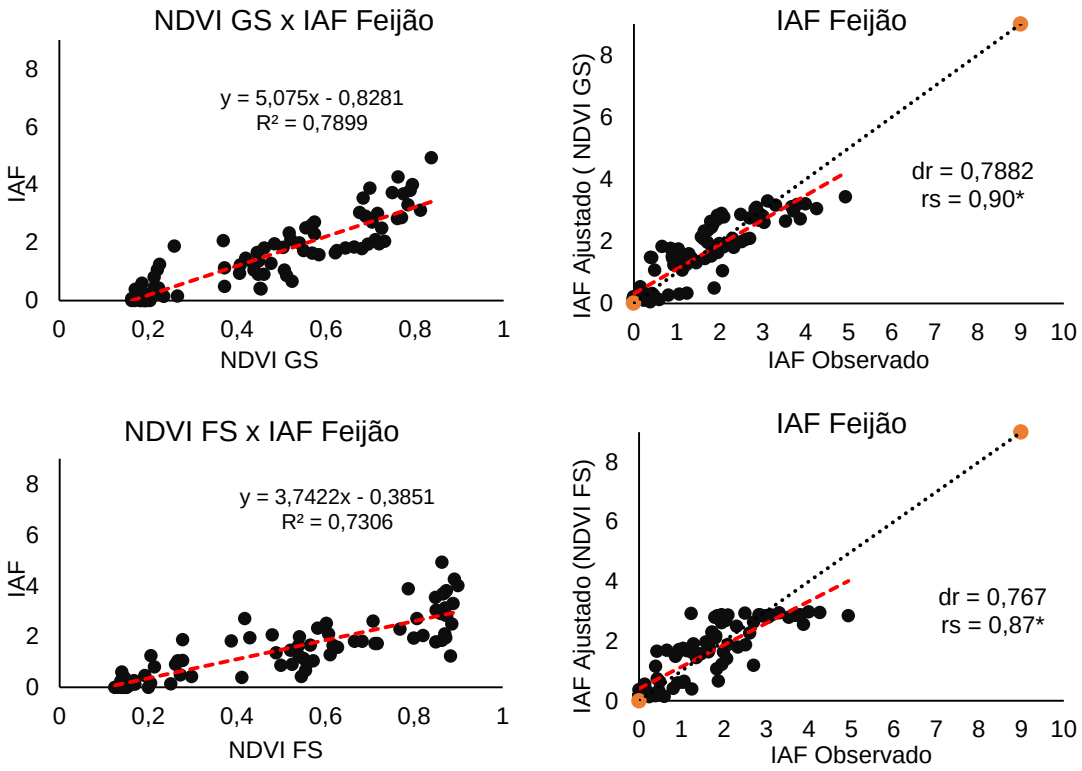


Figura 29 Relação entre NDVI e IAF para o feijão.

Para o IC, os ajustes não foram tão bons quando comparados com os demais parâmetros, exceto os valores de produtividade da soja. O melhor ajuste obtido para os valores de IC foi para a soja, por meio da utilização do NDVI GS (Figura 30 e Tabela 16).

Este mesmo parâmetro apresentou os piores desempenhos de ajuste dentre os avaliados para o feijão, com coeficiente R^2 abaixo de 0,2 e índice d_r próximos a 0,5, mostrando que os resultados ajustados e os estimados não possuem proximidade (Figura 31 e Tabela 16).

Tabela 16 Estatística de comparação entre os valores de IC observados e preditos para ambos os sensores para soja e feijão

Cultura	IV	Modelo	R^2	rs	ME	RMSE	d_r
Soja	NDVI GS	y = 47,831x + 5,7954	0,6072	0,59*	-0,0004	28,9803	0,7414
	NDVI FS	y = 35,218x + 13,595	0,4346	0,52*	0,0000	41,7118	0,6832
Feijão	NDVI GS	y = 8,9012x + 35,995	0,1931	0,49*	0,0003	10,2718	0,5564
	NDVI FS	y = 6,902x + 36,591	0,197	0,52*	0,0003	10,2233	0,5488

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott.

A coleta no DAS45, para a soja apresentou os melhores ajustes para IC, com desempenho semelhante para ambos os NDVI. Na o feijão, o melhor desempenho para IC ocorreu no DAS43, com valores de erros menores para o NDVI GS (Tabela 31 e Tabela 35, Figura 42 e Figura 43).

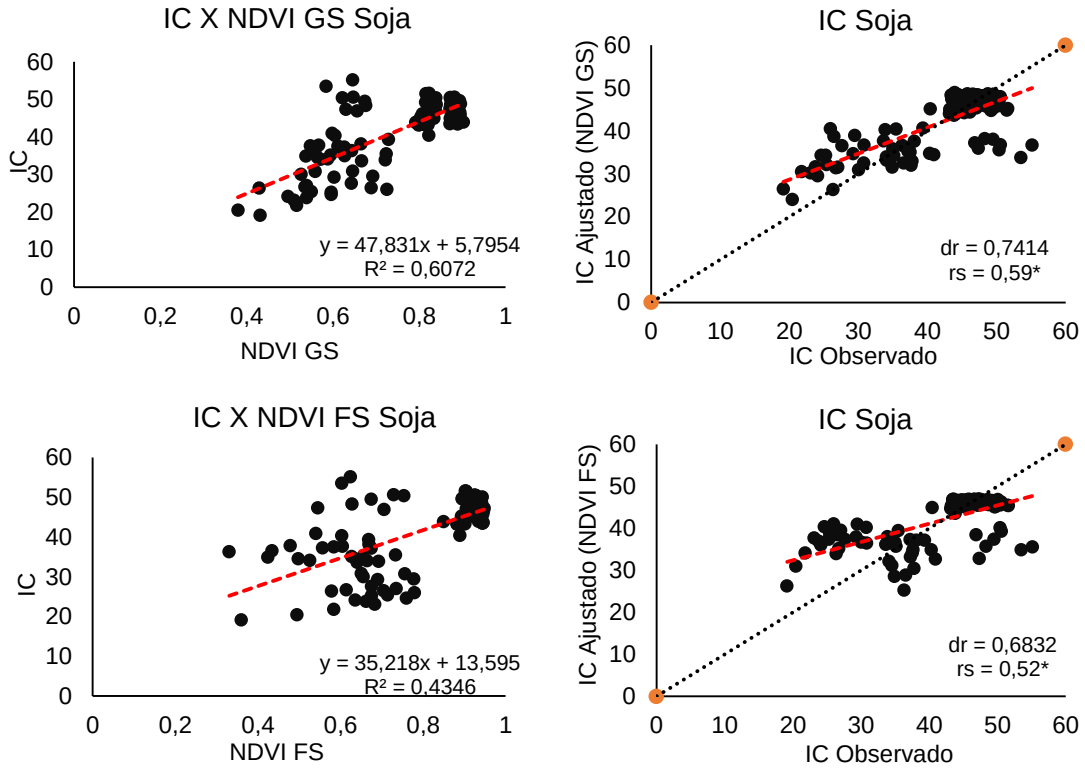


Figura 30 Relação entre NDVI e IC para a soja.

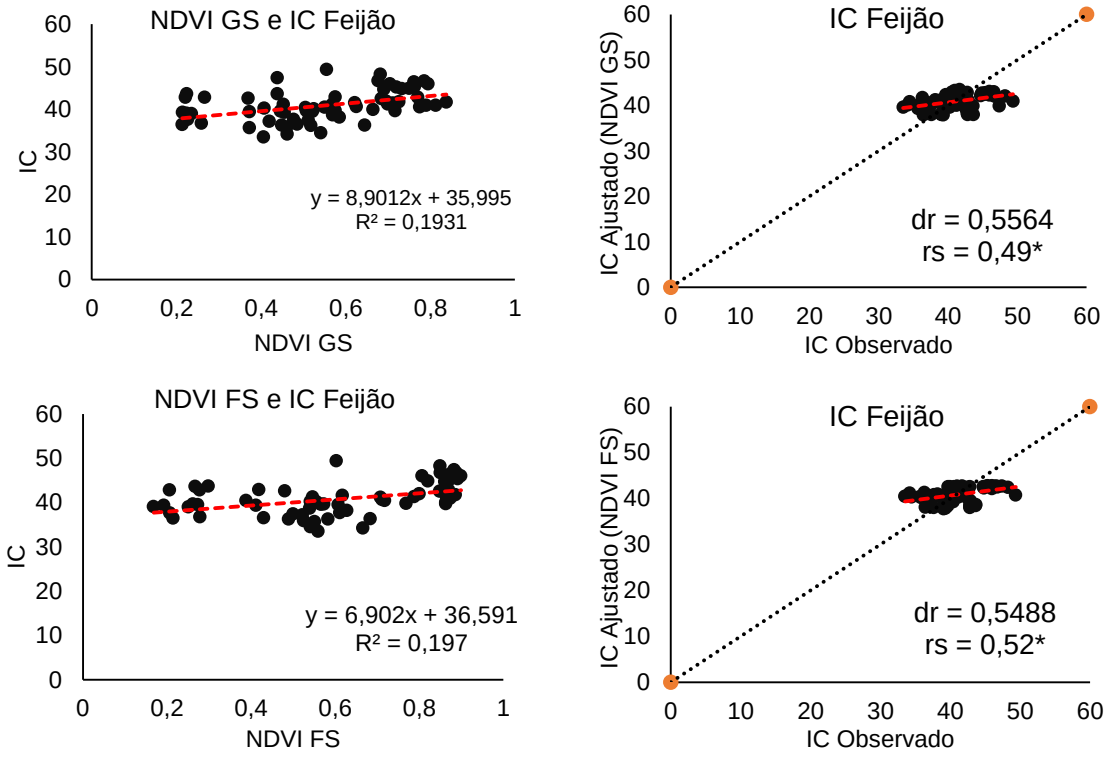


Figura 31 Relação entre NDVI e IC para o feijão.

A RFAI é melhor estimada por meio da utilização do NDVI FS, para a soja e o feijão. Para o feijão, os valores ajustados por meio da utilização de NDVI FS e NDVI GS estiveram próximos e, para a soja, o ajuste por meio do NDVI FS destacou-se do ajuste por NDVI GS (Figura 32 e Figura 33 e Tabela 17). Os erros apresentados nos ajustes da soja foram superiores aos apresentados para o feijão.

Considerando cada dia de coleta para a soja, um dos melhores ajustes encontrados foi para o DAS76, considerando o NDVI FS. Nesta data houve correlação rs significativa entre os valores observados e os ajustados, apresentando valores baixos de ME e RMSE (Tabela 32 e Figura 44). Os valores de RFAI ajustados por meio de ambos os sensores para o feijão, considerando as datas DAS25 e DAS43, apresentaram os melhores resultados (Tabela 36 e Figura 45).

Tabela 17 Estatística de comparação entre os valores de RFAI observados e preditos para ambos os sensores para a soja e o feijão

Cultura	IV	Modelo	R^2	rs	ME	RMSE	d_r
Soja	NDVI GS	$y = 22{,}558e^{4{,}7757x}$	0,6056	0,68*	95,2484	137392,0996	0,7252
	NDVI FS	$y = 21{,}999e^{4{,}5147x}$	0,7146	0,76*	74,5682	101315,0036	0,7743
Feijão	NDVI GS	y = 1296x - 177,85	0,7360	0,86*	0,0119	27948,7942	0,7876
	NDVI FS	y = 995,76x - 85,023	0,7392	0,85*	0,0027	27617,4838	0,7921

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

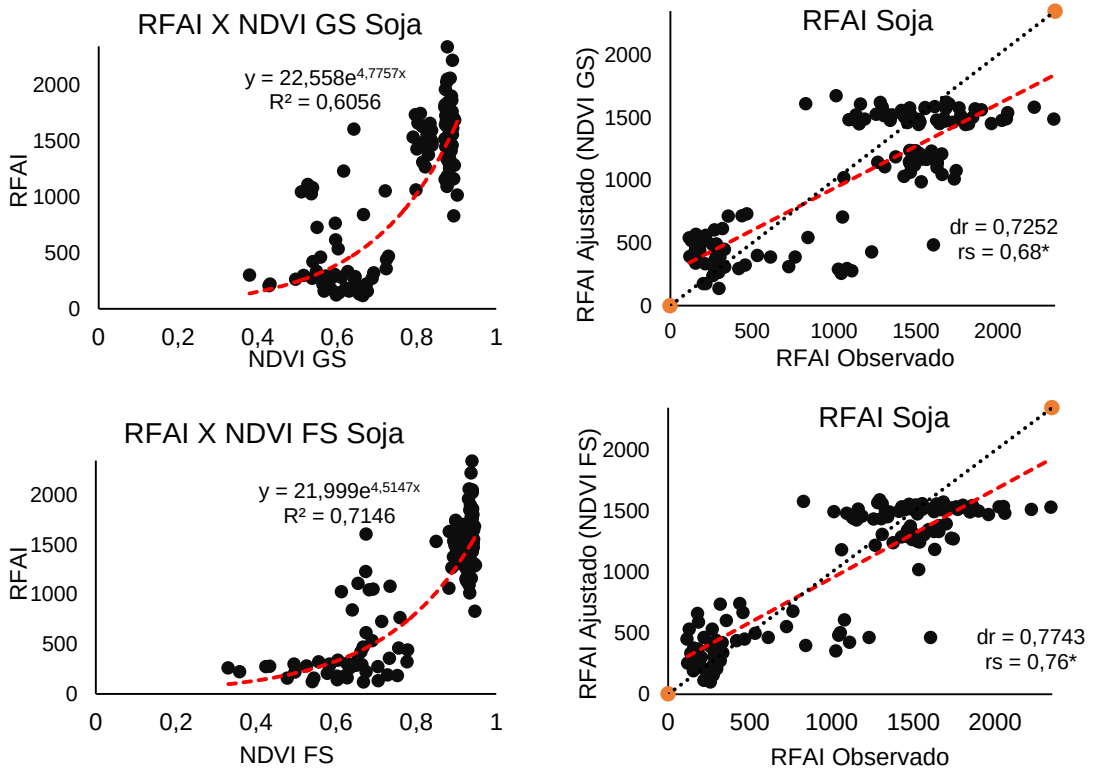


Figura 32 Relação entre NDVI e RFAI para a soja.

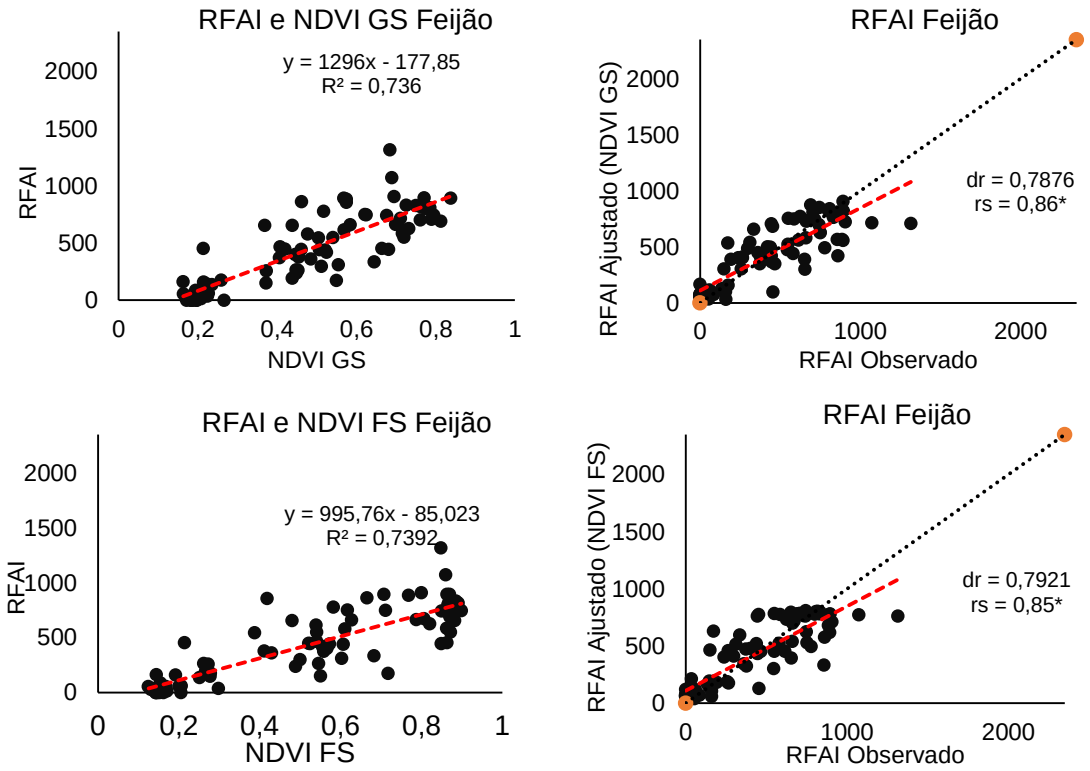


Figura 33 Relação entre NDVI e RFAI para o feijão.

Considerando o parâmetro altura de plantas, o melhor ajuste ocorreu com a utilização do sensor ativo (NDVI GS) para a soja e o feijão (Tabela 18, Figura 34 e Figura 35). A cultura da soja apresentou, em seu ajuste, valores de erros RMSE e ME maiores.

Papadavid et al. (2013), ao comparar os valores de NDVI e altura para o feijão preto, também encontraram ajuste exponencial ($y=0,12e^{0,05x}$), com coeficiente R^2 de 0,86.

Tabela 18 Estatística de comparação entre os valores de Altura observados e preditos para ambos os sensores para a soja e o feijão

Cultura	IV	Modelo	R^2	rs	ME	RMSE	d_r
Soja	NDVI GS	$y = 1,6306e^{4,4406x}$	0,8663	0,81*	1,6366	132,2183	0,8257
	NDVI FS	$y = 4,6415e^{2,9782x}$	0,7348	0,84*	2,7930	264,2854	0,7306
Feijão	NDVI GS	$y = 59,779x^{1,0027}$	0,7681	0,78*	0,8493	70,9103	0,7469
	NDVI FS	$y = 47,921x^{0,7759}$	0,7589	0,77*	0,9357	71,3665	0,7643

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

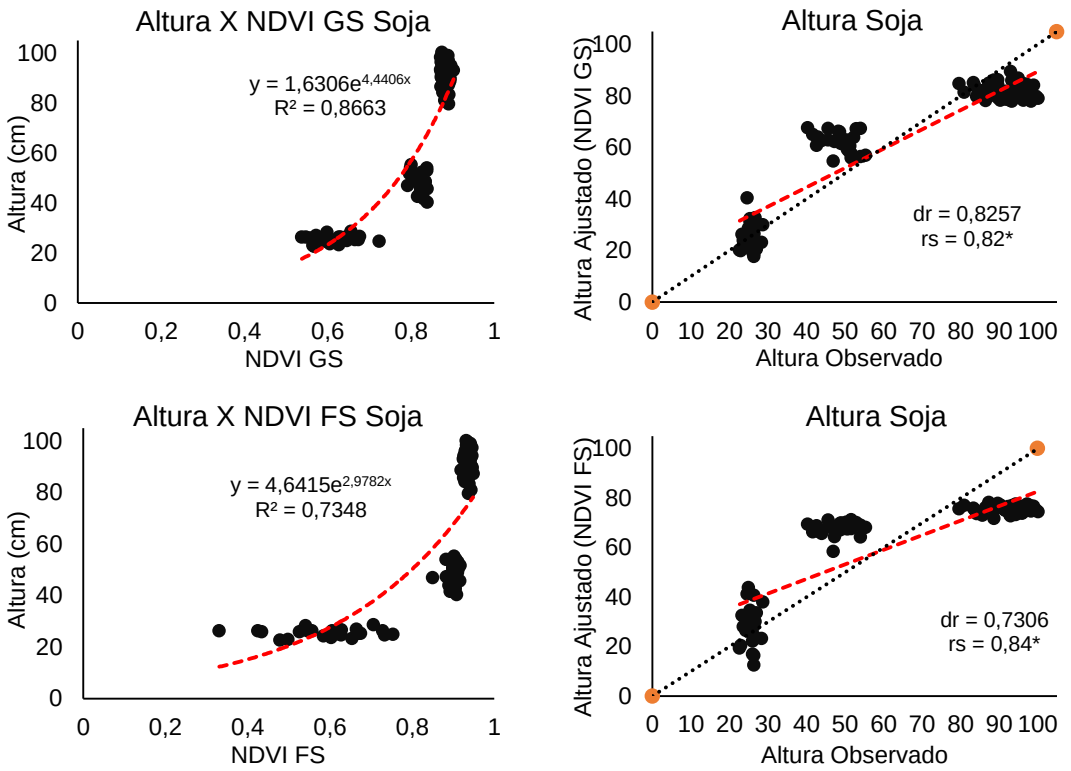


Figura 34 Relação entre NDVI e Altura para a soja.

Para a variável altura da soja não houve ajustes significativos ao se considerar cada coleta de maneira separada (Tabela 33 e Figura 46). Isto se deve ao fato de os dados se concentrarem em três *clusters* homogêneos, porém distantes entre si. O *cluster* com valores menores de altura representa as leituras feitas no DAS34, o segundo representa as leituras feitas no DAS45 e o terceiro, com os maiores valores de alturas, representa as leituras feitas nos DAS71 e DAS76.

O melhor ajuste para a variável Altura se deu no DAS43, considerando a utilização do NDVI GS para o feijão (Tabela 37 e Figura 47).

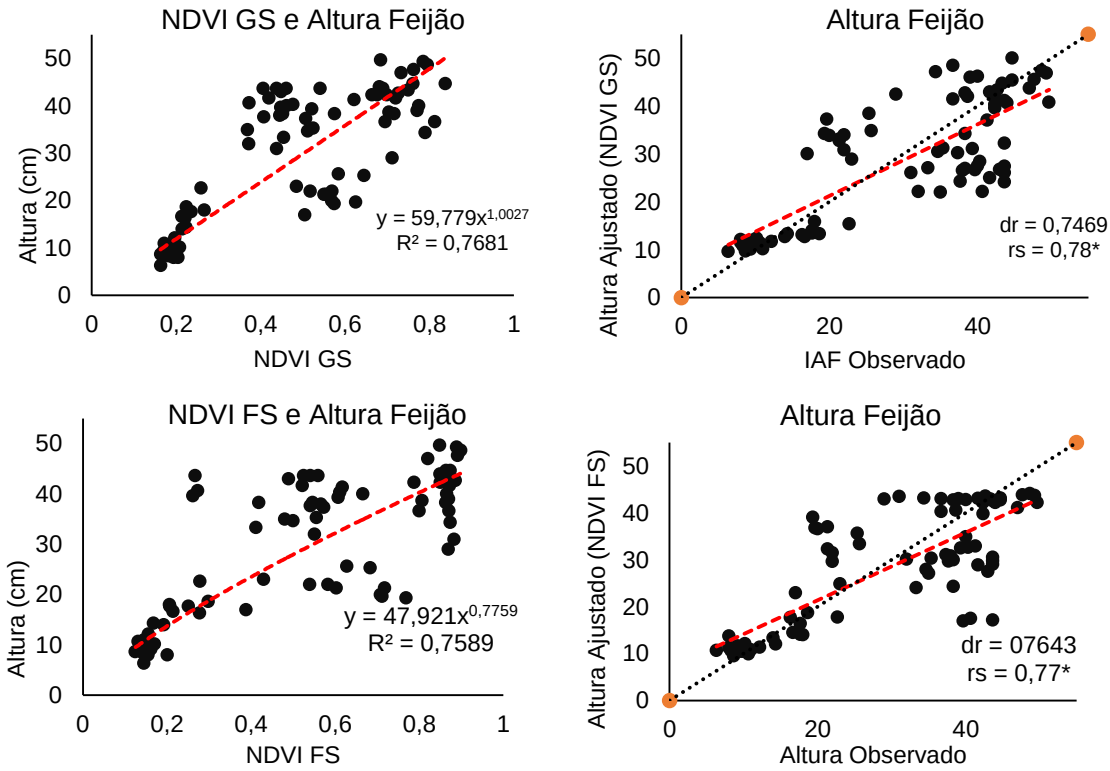


Figura 35 Relação entre NDVI e Altura de plantas para o feijão.

Para a produtividade, não houve correlação significativa com os NDVI GS e NDVI FS (Tabela 13). Também não houve valores significativos (a 5% de significância) para a correlação da produtividade com os demais parâmetros biofísicos da soja e com os valores de bandas dos IVs utilizados (Tabela 19).

Considerou-se a interpretação por meio de novas variáveis, sendo estas combinações dos parâmetros monitorados a campo. Houve a abordagem por dia de coleta, buscando informações como máximos, mínimos, somas totais, somas parciais, multiplicação de variáveis, etc. No total foram realizadas 231 combinações entre as variáveis (APÊNDICE G – Variáveis confeccionadas). Destas, 14 possuíram correlações significativas (a 5% de significância) com os valores de produtividade (Tabela 20).

Houve 07 variáveis com correlação significativa negativa e sete positiva. Os maiores valores de correlações positivas encontrados foram para a Soma RED FS DAS 71 e 76 e Soma NIR FS DAS 71 e 76; e negativas para os valores de NIR GS DAS 76 e Soma NIR GS DAS 34 a 76.

Tabela 19 Correlação entre Produtividade e demais parâmetros analisados para a soja

	rs	p-valor
IC	0,0991	0,3666
Altura	-0,0336	0,7603
IAF	0,0157	0,8869
NIR GS	-0,1083	0,3241
RED GS	-0,1029	0,3488
NIR FS	0,1493	0,1728
RED FS	0,0750	0,4953
NDVI GS	-0,0228	0,8359
NDVI FS	-0,0112	0,9193
RFAI	-0,1174	0,2848

rs - correlação de Spearman

Tabela 20 Correlação significativa entre Produtividade e variáveis para a soja

	rs	p-valor
Soma NIR GS DAS 34 e 45	-0,5270	0,0297*
Soma NIR GS DAS 34 a 76	-0,6299	0,0067*
Soma NIR GS DAS 45 a 76	-0,5319	0,0280*
Soma NIR FS DAS 45 a 76	0,5392	0,0255*
Soma NIR FS DAS 71 e 76	0,6152	0,0086*
Soma RED GS DAS 45 a 76	-0,5000	0,0410*
Soma RED FS DAS 45 a 76	0,5760	0,0155*
Soma RED FS DAS 71 e 76	0,6176	0,0082*
Soma IAF DAS 45 a 110	0,5049	0,0387*
NIR GS DAS 34	-0,5809	0,0145*
NIR GS DAS 76	-0,6569	0,0042*
RED GS DAS 76	-0,5343	0,0271*
NIR FS DAS 76	0,5858	0,0135*
NIR FS DAS 76	0,5956	0,0116*

*5% de significância; rs - correlação de Spearman

Os modelos e métricas considerando as 14 variáveis correlacionáveis com os valores de produtividade apresentam baixo desempenho, com valores de R^2, rs e d_r baixos (Tabela 21). Os melhores ajustes foram encontrados para as variáveis “Soma NIR FS DAS71 e 76”, “Soma RED FS DAS71 e 76” e “RED FS DAS76” (Figura 36 e Tabela 21). No APÊNDICE H – Dispersão entre variáveis confeccionadas e produtividade se encontram os gráficos de dispersão entre as 14 variáveis e a produtividade.

Tabela 21 Estatística de comparação entre os valores de Produtividade de soja observados e os preditos

Variáveis	Modelo	R^2	rs	ME	RMSE	d_r
Soma NIR GS DAS 34 e 45	y = -3441,3x + 8388,8	0,3396	0,53*	-0,034	377944,046	0,593
Soma NIR GS DAS 34 a 76	y = -1769,2x + 9810,6	0,3275	0,63*	-89,099	392844,039	0,546
Soma NIR GS DAS 45 a 76	y = -1936,7x + 9198,4	0,2359	0,53*	-0,055	437300,356	0,537
Soma NIR FS DAS 45 a 76	y = 2885,2x + 157,71	0,3238	0,54*	-0,031	386964,863	0,540
Soma NIR FS DAS 71 e 76	$y = 1836,3e^{0,8393x}$	0,4	0,62*	37,243	334496,729	0,578
Soma RED GS DAS 45 a 76	y = -25150x + 8776,8	0,1757	0,50*	0,008	471731,379	0,522
Soma RED FS DAS 45 a 76	$y = 1912,8^{e14,514x}$	0,2667	0,58*	45,043	423390,510	0,540
Soma RED FS DAS 71 e 76	$y = 2317,7^{e19,096x}$	0,3846	0,62*	37,810	352144,580	0,571
Soma IAF DAS 45 a 110	y = 371,89x - 3223,9	0,1357	0,50*	0,010	494615,523	0,524
NIR GS DAS 34	y = -5248,5x + 7563	0,3324	0,58*	-0,001	382063,115	0,559
NIR GS DAS 76	y = -3126,5x + 7036	0,296	0,66*	-0,052	402907,037	0,535
RED GS DAS 76	y = -36614x + 6460,9	0,1871	-0,53*	-3811	15417319,19	-2,176
NIR FS DAS 76	$y = 2169,7^{e1,311x}$	0,3811	0,59*	38,850	367287,903	0,628
RED FS DAS 76	y = 138125x + 1985,6	0,4108	0,60*	0,008	337197,787	0,623

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

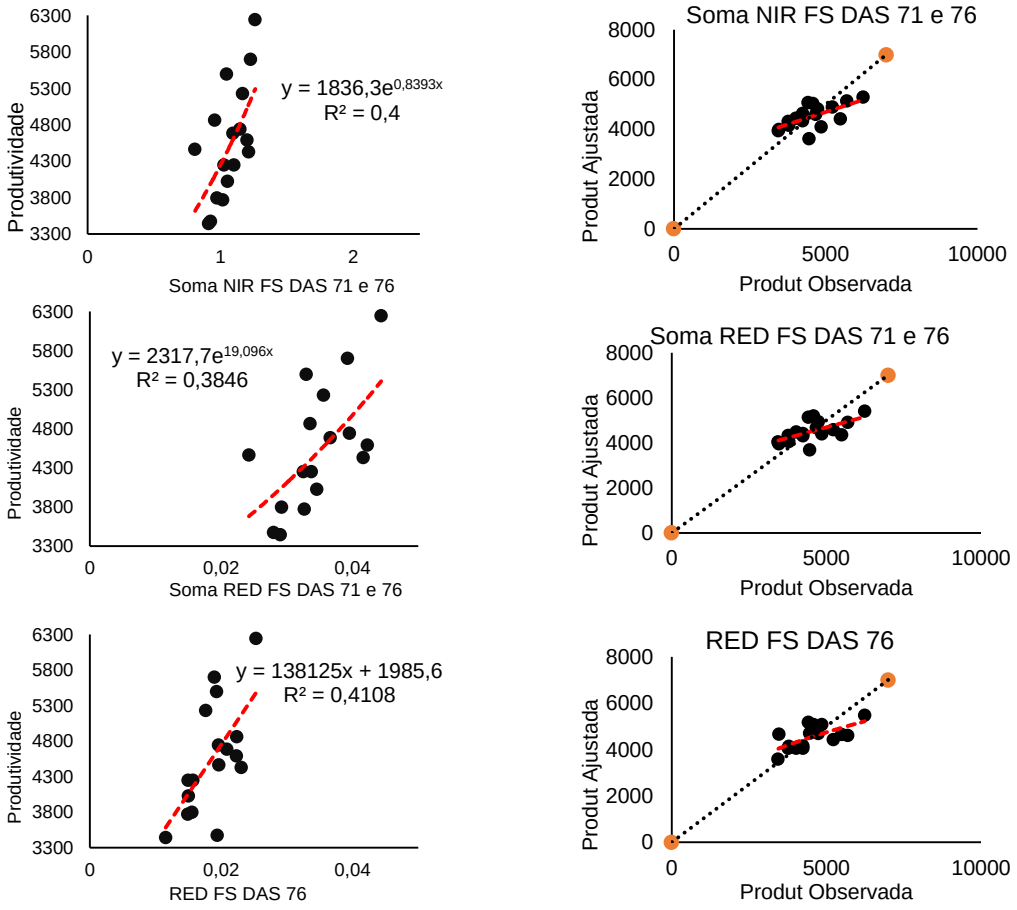


Figura 36 Relação entre valores de Produtividade e *Soma NIR FS DAS 71 e 76*, *Soma RED FS DAS 71 e 76* e *RED FS DAS 76*.

O IAF e a altura para ambas as culturas e IC para a soja obtiveram melhores resultados ao serem estimadas por meio de NDVI GS. RFAI para soja e feijão e IC para o feijão obtiveram melhores ajustes considerando os modelos que se utilizavam de NDVI FS.

Os ajustes por coleta obtiveram melhores resultados para o feijão ao se analisar as datas DAS25 e DAS 43 e em alguns casos a DAS55 para a maioria dos parâmetros biofísicos. Estas datas correspondem ao crescimento do feijão até atingir o pico vegetativo e início da fase de enchimento de grãos. A não observação de significância para o DAS70 pode ser motivada pelo evento de geada ocorrido nos dias 01, 02 e 03 de maio de 2016 (logo após o DAS55). No APÊNDICE I – Dados meteorológicos pode ser vista a diminuição de temperaturas nestas datas.

Não houve período de destaque em termos de ajustes para os parâmetros biofísicos monitorados na soja. Considerando as datas de monitoramento, houve início tardio e datas com intervalos grandes de revisitas (Tabela 3), motivado pelo grande número de dias com precipitação que ocorreu entre os meses de outubro/2015 e janeiro/2016 (APÊNDICE I – Dados meteorológicos).

Esta irregularidade das datas, aliadas aos eventos climáticos desfavoráveis e à saturação dos valores de NDVI para o período de maior vigor vegetativo (pico vegetativo), DAS71 e DAS76, contribuíram para diminuir a capacidade do IV NDVI em estimar os valores biofísicos para a soja.

A variável produtividade da soja apresentou relações com o acúmulo de refletância observado nas bandas RED e NIR para ambos os equipamentos. As melhores relações se deram ao utilizar o acúmulo dos valores de refletância das bandas do espectroradiômetro nas datas DAS76 e DAS71. Para melhor compreender o comportamento dos valores de produtividade, fazem-se necessários mais estudos, envolvendo outros IVs e parâmetros meteorológicos.

6.2.4 Conclusões

A utilização do NDVI GS apresentou melhores resultados para estimar os parâmetros biofísicos de IAF e altura para ambas as culturas e IC para a soja. O NDVI FS destacou-se na estimativa dos valores de RFAI, principalmente para a soja.

O IC não apresentou bons resultados quanto seu ajuste, sendo passível de se rever sua utilização e/ou seu método de amostragem nos próximos levantamentos de dados a campo.

Condições climáticas adversas, como presença de geada na última coleta do feijão e excesso de chuva durante o ciclo da soja, aliado à saturação do NDVI durante o pico vegetativo, prejudicaram o desempenho dos modelos.

A produtividade da soja não apresentou boas relações diretas com as variáveis monitoradas (NDVIs e demais parâmetros biofísicos). A combinações de mais variáveis gerou modelos fracos na sua explicação. O método de amostragem dos dados de produtividade e a não utilização de modelos que associem dados meteorológicos são fatores que podem ter interferido na falta de ajuste do modelo.

Estimar parâmetros biofísicos por SR terrestre possui a vantagem de acompanhar em tempo real e *in-loco* o desenvolvimento dos dosséis agrícolas, inferindo conhecimento sobre o desenvolvimento das plantas, servindo, assim, como base para tomadas de decisões em nível local. Além disso, este conhecimento serve como base para a validação e a correção de dados do SR orbital.

Trabalhos futuros são necessários para testar outros índices (EVI, SR, WDRVI, Insey, SAVI, etc) provenientes do espectroradiômetro e incluir variáveis meteorológicas na determinação dos parâmetros biofísicos das culturas, além de utilizar de técnicas de análise multivariada na busca de modelos que estimem os parâmetros biofísicos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico – CNPq e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro, e às empresas Cooperativa Agroindustrial de Cascavel (COOPAVEL) e Plantar Agrícola pela disponibilidade das áreas monitoradas.

6.2.5 Referências

ANDERSON, H.; NILSEN, L.; TØMMERVIK, H.; KARLSEN, S.; NAGAI, S.; COOPER, E. Using Ordinary Digital Cameras in Place of Near-Infrared Sensors to Derive Vegetation Indices for Phenology Studies of High Arctic Vegetation. **Remote Sensing,** Basel, v. 8, n. 10, p. 847, 17 out. 2016.

APARECIDO, L. E. de O.; ROLIM, G. D. S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S. de; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia,** Lavras, v. 40, n. 4, p. 405–417, ago. 2016.

ASD, I. **FieldSpec4.** Boulder,PANalytical, 2015.

BACOUR, C.; BARET, F.; BÉAL, D.; WEISS, M.; PAVAGEAU, K. Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAI×Cab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation. **Remote Sensing of Environment**, v. 105, n. 4, p.

313–325, dez. 2006.

BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, 35, n. 2–3, p. 161–173, fev. 1991.

BRASIL. **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos, SPInstituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>.

BROGE, N.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 2, p. 156–172, maio 2001.

CAMPBELL, P. K. E.; MIDDLETON, E. M.; MCMURTREY, J. E.; CORP, L. a; CHAPPELLE, E. W. Assessment of Vegetation Stress Using Reflectance or Fluorescence Measurements. **Journal of Environment Quality,** Madison, v. 36, n. 3, p. 832, 2007.

CARON, B. O.; SOUZA, V. Q. de; TREVISAN, R.; BEHLING, A.; SCHMIDT, D.; BAMBERG, R.; ELOY, E. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada em fitomassa de mudas de eucalipto. **Revista Árvore,** Viçosa, v. 36, n. 5, p. 833–842, out. 2012.

CONAB. **Levantamento de Safras - Séries Históricas (1976-2015)**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 5 abr. 2016.

CUNHA, C. A. H. da. **Relação entre comportamento espectral, índice de área foliar e produção de matéria seca em capim Tanzânia submetido a diferentes níveis de irrigação e dosses de Nitrogênio**. 2004. 154f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2004.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasilia: Embrapa Soja, 2009.

FALKER. **Manual Medidor Eletrônico de Teor de Clorofila clorofiLOG CFL1030.** Falker Automação Agrícola Ltda., 2008.

FAOSTAT. **Production quantities by country - Average 1993-2014**. Disponível em: <http://faostat3.fao.org>. Acesso em: 2 abr. 2016.

UPTA, D. K.; PRASAD, R.; KUMAR, P.; MISHRA, V. N. Estimation of crop variables using bistatic scatterometer data and artificial neural network trained by empirical models. **Computers and Electronics in Agriculture,** v. 123, p. 64–73, abr. 2016.

HABOUDANE, D. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, n. 3, p. 337–352, 15 abr. 2004.

HANSEN, P. M.; SCHJOERRING, J. K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 4, p.

542–553, ago. 2003.

ITCG. **Solos - Estado do Paraná.** Instituto de Terras Cartografia e Geociências. Curitiba, 2008.

JENSEN, J. R.; BOTCHWEY, K.; BRANNAN-GALVIN, E.; JOHANNSEN, C. J.; JUMA, C.; MABOGUNJE, A. L.; MILLER, R. B.; PRICE, K. P.; REINING, P. A. C.; SKOLE, D. L.; STANCIOFF, A.; TAYLOR, D. R. F. **Down to Earth**: geographical information for sustainable development in Africa. 1. ed. Washington, USA: National Academy of Sciences, 2002.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agrícola Brasileira,** Brasília, v. 47, n. 9, p. 1295–1306, 2012.

JOHANN, J. A. **Calibração de dados agrometeorológicos e agrícolas de verão no estado do Paraná.** 2012. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, 2012.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; OLIVEIRA, S. R. de M.; RODRIGUES, L. H. A.; LAMPARELLI, R. A. C. Data mining techniques for identification of spectrally homogeneous areas using NDVI temporal profiles of soybean crop. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 33, n. 3, p. 511–524, jun. 2013.

JOHANN, J. A.; BECKER, W. R.; URIBE-OPAZO, M. A.; MERCANTE, E. Uso de imagens do sensor orbital modis na estimação de datas do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja para o estado do Paraná - Brasil. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 36, n. 1, p. 126–142, fev. 2016.

LAN, Y.; ZHANG, H.; LACEY, R.; HOFFMAN, W. C.; WU., W. Development of an Integration Sensor and Instrumentation System for Measuring Crop Conditions. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. XI, p. 1–16, 2009.

LI-COR, I. **LI-191R Line Quantum Sensor**. Disponível em: <https://www.licor.com/env/products/light/quantum_line.html>. Acesso em: 18 abr. 2016.

LI-COR, I. **LAI - 2200C - Plant Canopy Analyzer**Lincoln, NELI-COR, 2014.

MASELLI, F.; CONESE, C.; PETKOV, L.; GILABERT, M. A. Environmental monitoring and crop forecasting in the Sahel through the use of NOAA NDVI data. A case study: Niger 1986–89. International Journal of Remote Sensing, Washington, v. 14, n. 18, p. 3471–3487, dez. 1993.

MERCANTE, E. **Dinâmica espectral da cultura da soja ao longo do ciclo vegetativo e sua relação com a produtividade na região oeste do Paraná**. 2007. 221 f. (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

MERCANTE, E.; LIMA, L. E. P. de; JUSTINA, D. D. D.; URIBE-OPAZO, M. A.; LAMPARELLI, R. A. C. Detection of soybean planted areas through orbital images based on culture spectral dynamics. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 32, n. 5, p. 920–931, out. 2012.

MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. **Principles of Environmental Physics**. 2. ed. New York: Edward Arnold, 1990.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologia de Aplicação**. 3ª ed. Viçosa, Minas Gerais, Basil: Editora UFV, 2007.

PAPADAVID, G. et al. Image based remote sensing method for modeling black-eyed beans (Vigna unguiculata) Leaf Area Index (LAI) and Crop Height (CH) over Cyprus. **Open Geosciences**, v. 5, n. 1, p. 1–11, 1 jan. 2013.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; REISSER JUNIOR, C.; BARNI, N. A.; MATZENAUER, R.; DIDONÉ, I. A. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 38, n. 9, p. 1017–1023, set. 2003.

RASMUSSEN, M. S. Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR. **International Journal of Remote Sensing,** Washington, v. 13, n. 18, p. 3431–3442, dez. 1992.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. **Anais**... Washington, USA: NASA. Goddart Space Flight Center, 1973

SANTOS, J. S.; FONTANA, D. C.; SILVA, T. S. F.; RUDORFF, B. F. T. Identificação da dinâmica espaço-temporal para estimar área cultivada de soja a partir de imagens MODIS no Rio Grande do Sul Identification of the spatial and temporal dynamics for estimating. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 18, n. 1, p. 54–63, 2014.

SCHAEFER, M. T.; FARMER, E.; SOTO-BERELOV, M.; WOODGATE, W.; JONES, S Validation of LAI and FPAR products. In: HELD, A.; PHINN, S.; SOTO-BERELOV, M.; JONES, S. (Ed.). **AusCover good practice guidelines**: a technical handbook supporting calibration and validation activities of remotely sensed data products. St Lucia, QLD 4072, Australia: TERN AusCover, 2015. p. 352.

THENKABAIL, P. S.; ENCLONA, E. A.; ASHTON, M. S.; VAN DER MEER, B. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3–4, p. 354–376, jun. 2004.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; DE PAUW, E. Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 158–182, fev. 2000.

TRIMBLE. **GreenSeeker 505 Hand held Sensor User Guide**, 2010. Disponível em: <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-493091/GS505_HandheldSensor_UG_500-1-030_RevM_MD.pdf>.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology,** v. 32, n. 13, p. 2088–2094, 15 nov. 2012.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A.; MACHADO, R. E. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/Landsat. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 421–430,

ago. 2004.

YAO, X.; YAO, X.; JIA, W.; TIAN, Y.; NI, J.; CAO, W.; ZHU, Y. Comparison and Intercalibration of Vegetation Indices from Different Sensors for Monitoring Above-Ground Plant Nitrogen Uptake in Winter Wheat. **Sensors,** Basel, v. 13, n. 3, p. 3109–3130, 5 mar. 2013.

ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture—a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture,** v. 36, n. 2–3, p. 113–132, nov. 2002.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, n. 3, p. 471–475, mar. 2003.

ZHENG, G.; MOSKAL, L. M. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: theories, methods and sensors. **Sensors,** Basel, v. 9, n. 4, p. 2719–2745, 17 abr. 2009.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Os sensores passivos (FieldSpec4 Standard-Res) e o sensor ativo (GreenSeeker 505 Handheld) obtiveram valores semelhantes de NDVI, sendo possível o processo de ajuste de seus valores de NDVI. Este procedimento permite que, na falha de um equipamento, seja suprida por valores de NDVI estimados pelo outro sensor;
- A utilização do NDVI do sensor ativo na estimativa de parâmetros biofísicos destacou-se por apresentar melhores resultados para estimar os parâmetros biofísicos de IAF e a altura para a soja e o feijão e IC para a soja. O NDVI do sensor passivo obteve melhores resultados para a estimativa dos valores de RFAI, principalmente para a soja. O IC obtido por clorofilômetro possui relações menores com o NDVI dos sensores utilizados;
- A saturação dos valores de NDVI no pico vegetativo e em eventos de condições climáticas adversas (geadas e excessos de chuva) foram registrados em algumas datas de coleta. Estes fatos resultaram em menores concordância entre os valores de NDVI medidos pelos equipamentos e entre os valores estimados e os observados a campo, principalmente para a soja. Houve também menores ajustes entre os valores estimados e os observados para os parâmetros biofísicos;
- A produtividade para a soja não apresentou relações diretas e significativas com as variáveis monitoradas (NDVIs e demais parâmetros biofísicos). A combinações de variáveis (soma total, soma parcial, multiplicação e razão entre variáveis monitoradas) conseguiu relação significativa com a produtividade, porém os modelos foram fracos na sua explicação. O método de amostragem dos dados de produtividade e a não utilização de modelos que associem dados meteorológicos, são fatores que podem ter interferido na falta de ajuste do modelo.

Mais estudos podem ser realizados na tentativa de melhor explicar associação entre os NDVIs de ambos os sensores e para melhor estimar os parâmetros biofísicos. Destacam-se:

- Variar os comprimentos de onda do cálculo do NDVI FS e testar suas correlações com os valores de NDVI GS. Incluir nas comparações os dados de satélite;
- Testar outros IVs provenientes do espectroradiômetro e incluir variáveis meteorológicas na determinação dos parâmetros biofísicos das culturas;
- Utilizar de técnicas de análise multivariada na busca de modelos que estimem os parâmetros biofísicos;
- Estudar os efeitos do evento climático da geada no feijão;

- Ampliar a série histórica de dados, criando modelos mais robustos e validando-os com dados de campo.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Assinaturas espectrais da soja e do feijão

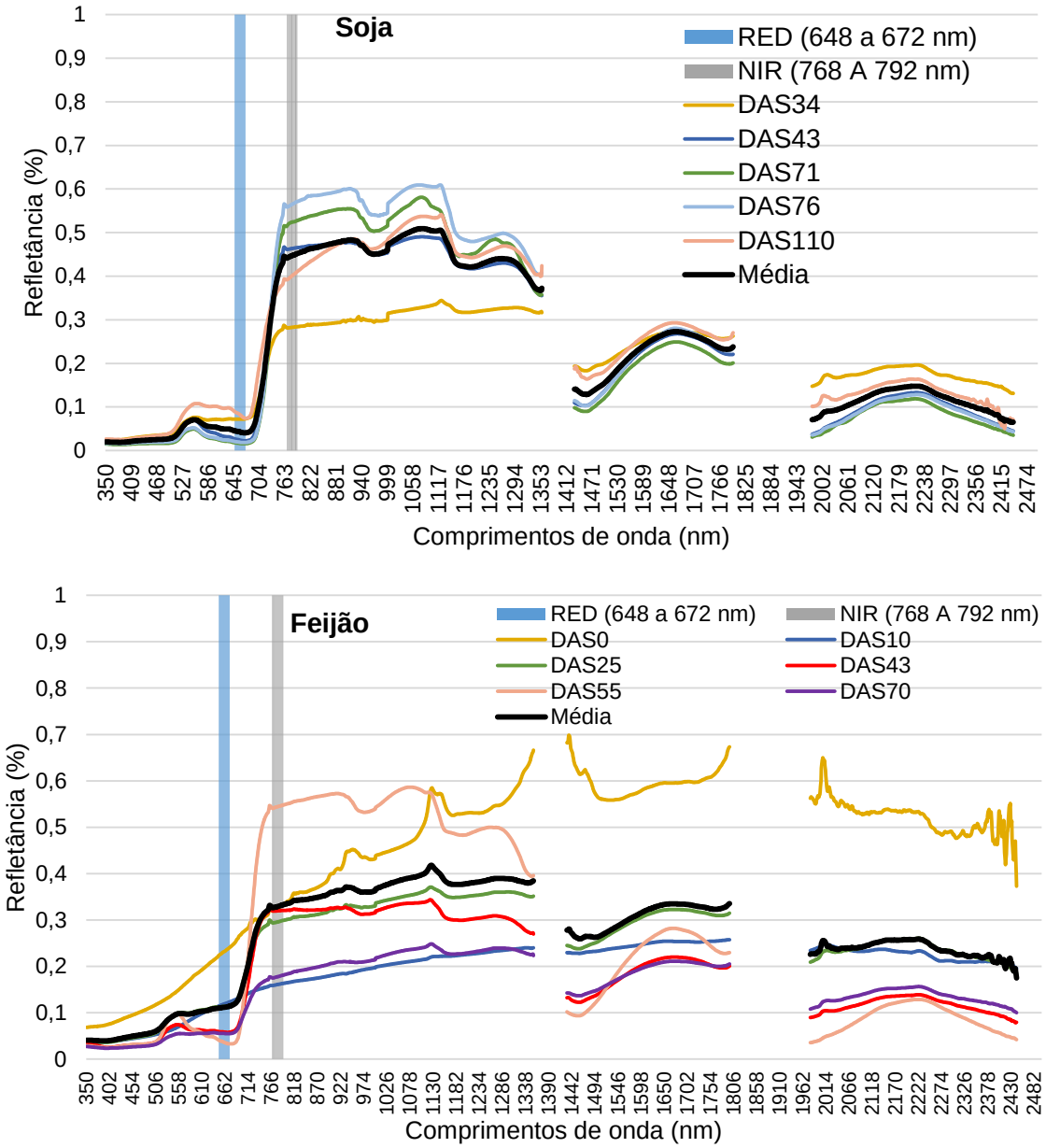


Figura 37 Assinaturas espectrais obtidas pelo FieldSpec 4 para a soja e o feijão.

APÊNDICE B – Estatísticas descritivas

Tabela 22 Estatística descritiva dos valores de NDVI para a soja

	Datas	Min	Q1	Md	μ	T	Q3	Máx	DP	cv
GreenSeeker	*Geral*	*0,380*	*0,627*	*0,821*	*0,756*	*a*	*0,877*	*0,902*	*0,141*	18,59%
	DAS34	0,538	0,581	0,616	0,615	a	0,646	0,724	0,046	7,53%
	DAS45	0,791	0,809	0,821	0,820	a	0,831	0,839	0,014	1,76%
	DAS71	0,877	0,884	0,889	0,888	a	0,892	0,902	0,006	0,69%
	DAS76	0,871	0,873	0,876	0,876	a	0,878	0,888	0,004	0,48%
	DAS110	0,380	0,524	0,577	0,581	a	0,651	0,729	0,097	16,69%
FieldSpec	*Geral*	*0,331*	*0,673*	*0,904*	*0,805*	*b*	*0,936*	*0,948*	*0,161*	20,05%
	DAS34	0,331	0,537	0,604	0,591	a	0,666	0,754	0,106	17,87%
	DAS45	0,850	0,895	0,904	0,900	b	0,909	0,917	0,014	1,57%
	DAS71	0,919	0,937	0,939	0,939	b	0,943	0,948	0,006	0,64%
	DAS76	0,924	0,929	0,935	0,934	b	0,940	0,944	0,006	0,65%
	DAS110	0,360	0,640	0,675	0,661	b	0,707	0,779	0,092	13,91%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; NDVI - Adimensional; T - letras iguais para datas iguais e diferentes sensores representam médias iguais pelo teste T a 5% de significância

Tabela 23 Estatística descritiva dos valores de NDVI para o feijão

		Min	Q1	Md	μ	T	Q3	Máx	DP	cv
GreenSeeker	*Geral*	*0,163*	*0,205*	*0,407*	*0,415*	*a*	*0,582*	*0,838*	*0,218*	52,48%
	DAS0	0,186	0,201	0,205	0,216	a	0,233	0,265	0,023	10,46%
	DAS10	0,163	0,182	0,191	0,188	a	0,197	0,208	0,013	6,91%
	DAS25	0,214	0,226	0,495	0,413	a	0,568	0,645	0,172	41,75%
	DAS43	0,372	0,454	0,680	0,614	a	0,710	0,838	0,142	23,06%
	DAS55	0,438	0,711	0,749	0,722	a	0,785	0,813	0,097	13,37%
	DAS70	0,369	0,420	0,461	0,456	a	0,507	0,541	0,055	12,07%
FieldSpec	*Geral*	*0,063*	*0,162*	*0,400*	*0,443*	*a*	*0,711*	*0,899*	*0,287*	64,72%
	DAS0	0,063	0,139	0,162	0,173	b	0,211	0,266	0,051	29,46%
	DAS10	0,125	0,142	0,148	0,150	b	0,155	0,201	0,016	10,50%
	DAS25	0,168	0,242	0,409	0,443	a	0,642	0,768	0,216	48,84%
	DAS43	0,262	0,545	0,794	0,672	a	0,853	0,886	0,211	31,41%
	DAS55	0,849	0,869	0,872	0,874	b	0,883	0,899	0,013	1,53%
	DAS70	0,267	0,500	0,541	0,530	b	0,573	0,666	0,095	17,94%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; NDVI - Adimensional; T - letras iguais para datas iguais e diferentes sensores representam médias iguais pelo teste T a 5% de significância

Tabela 24 Estatística descritiva dos valores de IAF para a soja e o feijão

		Min	**Q1**	**Md**	**μ**	**Q3.**	**Max**	**DP**	**cv**
Soja	*Geral*	*1,057*	*1,702*	*3,728*	*4,460*	*7,532*	*8,160*	*2,707*	60,70%
	DAS34	1,123	1,336	1,454	1,517	1,669	2,127	0,258	17,03%
	DAS45	2,780	3,506	3,728	3,732	3,998	5,010	0,435	11,67%
	DAS71	6,277	7,360	7,515	7,513	7,803	8,160	0,416	5,53%
	DAS76	7,137	7,559	7,672	7,672	7,816	8,120	0,218	2,84%
	DAS110	1,057	1,346	1,825	1,865	2,263	2,853	0,573	30,72%
Feijão	*Geral*	*0,000*	*0,387*	*1,407*	*1,510*	*2,248*	*4,930*	*1,237*	81,94%
	DAS0								
	DAS10	0,000	0,000	0,063	0,118	0,189	0,598	0,158	134,49%
	DAS25	0,138	0,724	1,679	1,423	1,893	2,612	0,804	56,48%
	DAS43	0,393	1,150	2,270	2,207	2,942	4,930	1,288	58,34%
	DAS55	1,233	1,950	3,003	2,843	3,720	4,260	0,975	34,28%
	DAS70	0,863	1,043	1,283	1,383	1,807	2,100	0,461	33,31%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; IAF - (m² de dossel)/(m² de solo).

Tabela 25 Estatística descritiva dos valores de IC para a soja e o feijão

		Min	Q1	Md	μ	Q3.	Max	DP	cv
Soja	*Geral*	*19,160*	*36,510*	*45,680*	*41,950*	*48,350*	*55,170*	*8,625*	*20,56%*
	DAS34	34,070	35,380	37,730	41,150	47,610	55,170	6,953	16,90%
	DAS45	40,450	44,040	46,620	46,650	49,240	51,640	3,078	6,60%
	DAS71	43,450	45,690	46,540	46,440	47,620	49,630	1,639	3,53%
	DAS76	43,530	46,570	48,430	47,910	49,210	50,590	1,835	3,83%
	DAS110	19,160	24,520	26,620	27,610	30,230	39,350	4,967	17,99%
Feijão	*Geral*	*33,530*	*38,790*	*40,500*	*40,830*	*42,830*	*49,380*	*3,595*	*8,81%*
	DAS0								
	DAS10								
	DAS25	36,220	37,390	39,190	39,760	40,790	49,380	3,202	8,05%
	DAS43	39,310	40,210	41,610	41,940	42,820	46,740	2,184	5,21%
	DAS55	39,690	40,970	45,230	44,100	46,450	48,250	3,027	6,86%
	DAS70	33,530	35,660	37,170	37,510	39,520	43,630	3,104	8,27%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação;IC - Adimensional.

Tabela 26 Estatística descritiva dos valores de RFAI para a soja e o feijão

		Min	Q1	Md	μ	Q3.	Max	DP	cv
Soja	*Geral*	116,50	334,20	1300,50	1098,80	1598,50	2343,40	623,64	56,76%
	DAS34	116,50	157,60	217,40	227,10	283,60	356,50	75,96	33,45%
	DAS45	1062,00	1463,00	1513,00	1510,00	1630,00	1746,00	153,18	10,14%
	DAS71	828,40	1344,50	1556,70	1564,10	1718,80	2343,40	351,81	22,49%
	DAS76	1093,00	1294,00	1523,00	1544,00	1809,00	2053,00	306,35	19,84%
	DAS110	204,10	298,20	500,90	649,10	1031,50	1607,40	391,09	60,25%
Feijão	*Geral*	0,00	71,84	429,20	419,30	700,50	1316,00	327,31	78,06%
	DAS0								
	DAS10	0,00	0,13	27,92	33,86	49,00	160,90	39,05	115,33%
	DAS25	0,00	143,80	323,10	376,40	626,20	892,60	299,50	79,57%
	DAS43	257,00	415,30	707,60	673,90	865,70	1316,00	289,18	42,91%
	DAS55	444,80	586,00	703,80	669,50	743,90	828,80	127,76	19,08%
	DAS70	150,10	297,50	443,00	436,30	549,20	861,40	196,98	45,15%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; RFAI - W m^{-2}.

Tabela 27 Estatística descritiva dos valores de Altura para a soja e o feijão

		Min	Q1	Md	μ	Q3.	Max	DP	cv
Soja	*Geral*	22,67	45,67	87,83	69,89	92,71	100,17	28,15	40,28%
	DAS34	22,67	24,67	25,67	25,53	26,33	28,67	1,51	5,90%
	DAS45	40,33	45,67	49,00	48,65	51,67	55,33	4,18	8,59%
	DAS71	79,67	88,67	92,00	91,10	95,08	99,00	5,00	5,49%
	DAS76	83,67	91,08	93,83	93,08	96,04	100,17	4,60	4,94%
	DAS110	85,00	89,17	90,83	91,08	92,42	100,00	3,33	3,66%
Feijão	*Geral*	6,33	14,83	32,67	28,34	41,17	49,67	14,01	49,42%
	DAS0								
	DAS10	6,33	8,63	9,25	9,33	9,92	12,17	1,26	13,54%
	DAS25	14,00	17,50	19,50	19,63	22,00	25,67	3,28	16,71%
	DAS43	33,33	38,25	39,83	40,47	42,42	49,67	3,90	9,63%
	DAS55	29,00	36,67	42,33	40,85	44,67	49,33	6,56	16,06%
	DAS70	32,00	37,33	40,33	39,85	43,67	43,67	3,98	9,99%

Min - valor mínimo; Q1 - primeiro Quartil; μ - média; Md - mediana; Q3 - terceiro Quartil; Máx - valor máximo; DP - desvio padrão; cv - coeficiente de variação; Altura - cm.

APÊNDICE C – Diagramas de dispersão entre NDVI GS observados e ajustados

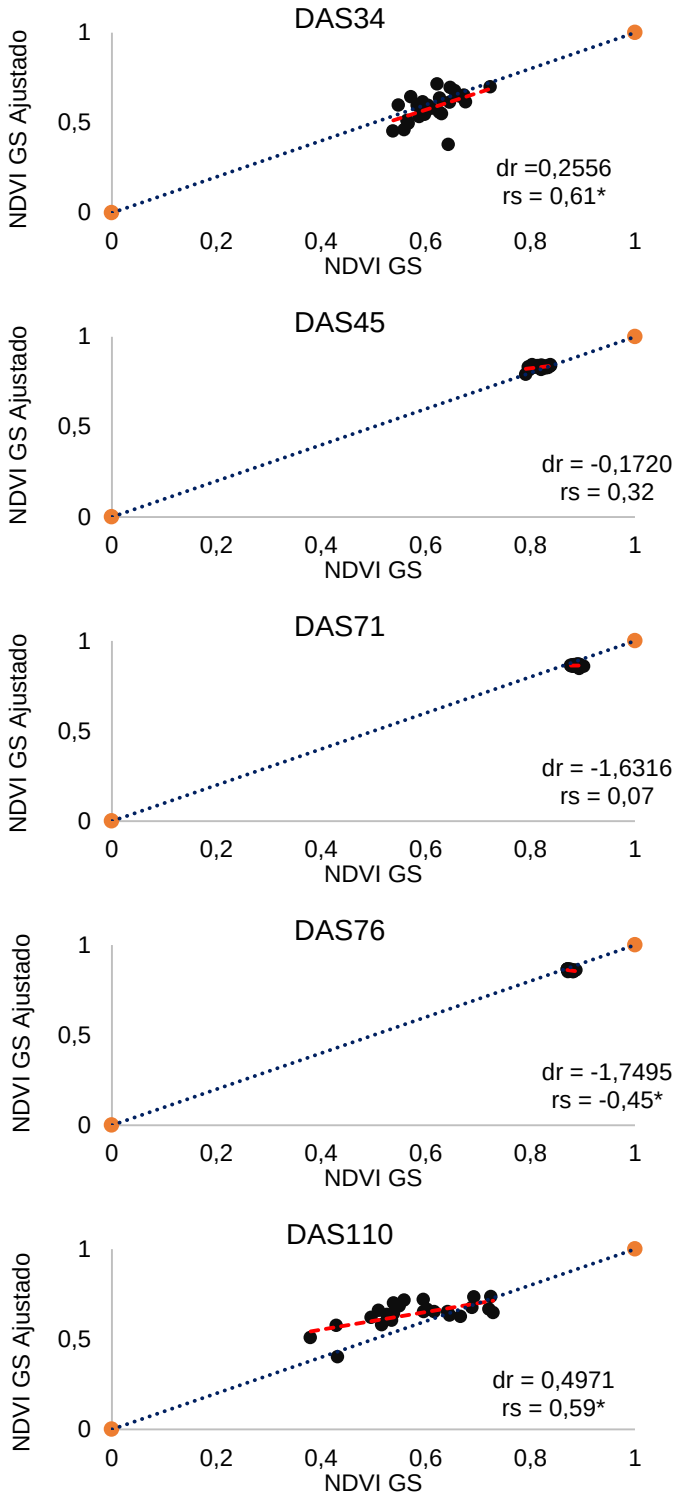


Figura 38 Gráficos de dispersão entre NDVI GS ajustados e observados a campo para a soja.

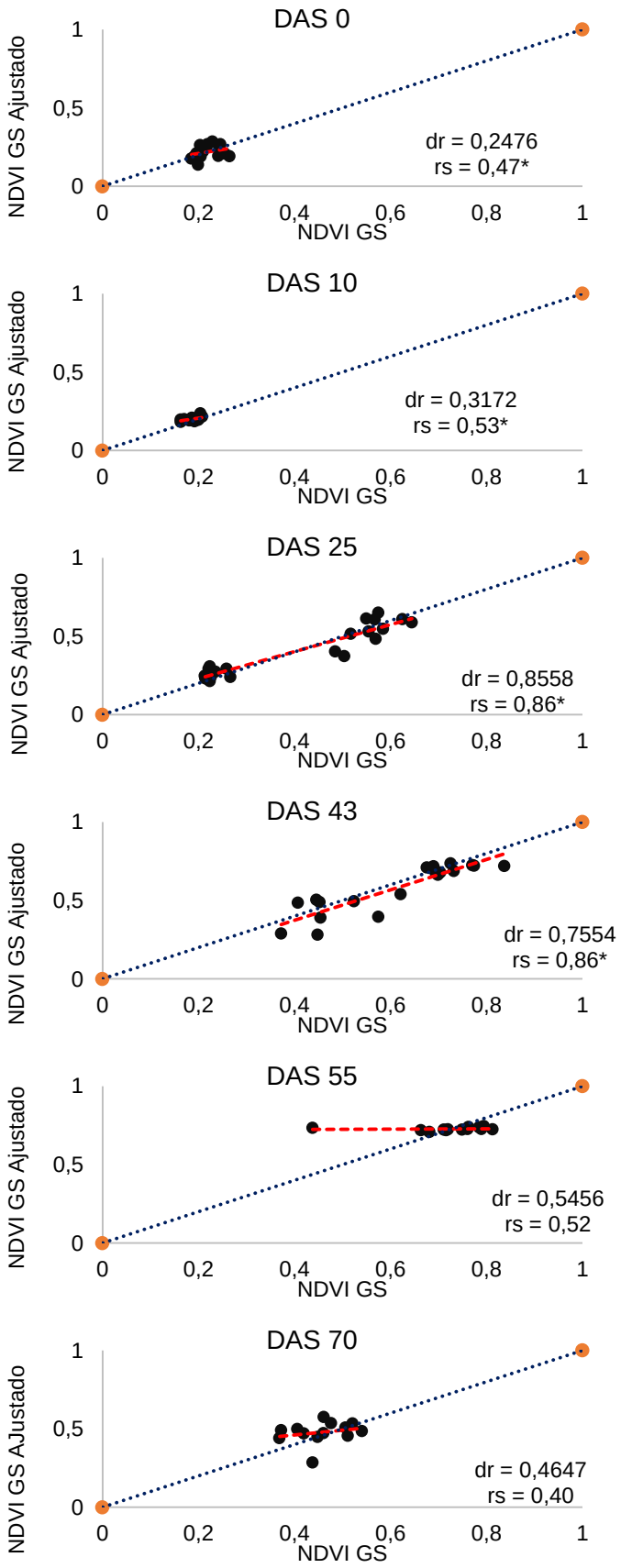


Figura 39 Gráficos de dispersão entre NDVI GS ajustados e observados a campo para o feijão.

APÊNDICE D – Teste de normalidade por Shapiro - Wilk

Tabela 28 Teste de normalidade por Shapiro-Wilk para os dados da soja

	Estatistica	IC	Altura	IAF	NIR_G	RED_G	NIR_F	RED_F	NDVI_G	NDVI_F	RFAI
	Statistic	0,865523	0,794403	0,820347	0,894891	0,872771	0,973859	0,813796	0,845498	0,80723	0,900375
GERAL	p.value	4,84E-09	1,14E-11	8,56E-11	1,08E-07	9,99E-09	0,019382	5,05E-11	7,37E-10	3,01E-11	2,05E-07
		Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman
	Statistic	0,842411	0,962467	0,951309	0,946291	0,904197	0,884972	0,942363	0,979949	0,964787	0,930776
DAS34	p.value	0,001586	0,489955	0,289159	0,224869	0,026444	0,01048	0,18412	0,894914	0,541775	0,101462
		Spearman	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson
	Statistic	0,949874	0,96092	0,946641	0,929327	0,920867	0,946444	0,956148	0,945636	0,82701	0,933895
DAS45	p.value	0,269251	0,457177	0,228887	0,09417	0,061046	0,226621	0,366013	0,217533	0,000843	0,119143
		Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson
	Statistic	0,975527	0,949114	0,935843	0,972204	0,910805	0,839296	0,91779	0,965011	0,890805	0,979912
DAS71	p.value	0,801437	0,259219	0,131721	0,721452	0,036718	0,001392	0,052206	0,546943	0,013811	0,894239
		Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson
	Statistic	0,963704	0,945809	0,985282	0,938052	0,942212	0,954628	0,97773	0,931153	0,945743	0,944911
DAS76	p.value	0,517207	0,219443	0,97019	0,147583	0,182705	0,340196	0,850623	0,103449	0,218707	0,209665
		Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson
	statistic	0,965046	0,970187	0,926529	0,961623	0,905426	0,929967	0,923316	0,9645	0,863061	0,897029
DAS110	p.value	0,547748	0,671596	0,081557	0,471894	0,028099	0,097322	0,069174	0,535208	0,003858	0,018628
		Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman

A 5% de significância

Tabela 29 Teste de normalidade por Shapiro-Wilk para os dados do feijão

	Estatistica	IC	Altura	IAF	NIR_G	RED_G	NIR_F	RED_F	NDVI_G	NDVI_F	RFAI
	statistic	0,983927195	0,887973	0,932935	0,850769	0,905708	0,90476	0,828529	0,867307	0,852602	0,927162
GERAL	p.value	0,550349778	1,93E-06	2,42E-04	6,09E-09	1,47E-06	1,31E-06	9,48E-10	2,73E-08	7,15E-09	1,21E-04
		Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman
	statistic				0,933888	0,944606	0,902275	0,904864	0,890741	0,960421	
DAS0	p.value				0,183394	0,292518	0,045503	0,05092	0,027749	0,552294	
					Pearson	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman
	statistic		0,980593	0,769171	0,976722	0,976218	0,917259	0,918648	0,942735	0,863493	0,799094
DAS10	p.value		0,941527	0,00031	0,88515	0,876568	0,087762	0,093326	0,269946	0,009047	0,000838
			Pearson	Spearman	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman
	statistic	0,878555404	0,973772	0,922437	0,914672	0,928514	0,934521	0,879774	0,794598	0,875583	0,906096
DAS25	p.value	0,016666789	0,831658	0,110394	0,078283	0,144568	0,18859	0,017528	0,000718	0,014749	0,053728
		Spearman	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Pearson
	statistic	0,912444256	0,974296	0,958261	0,938282	0,929903	0,954724	0,842125	0,910906	0,845723	0,950582
DAS43	p.value	0,070962116	0,841678	0,509726	0,222466	0,153752	0,444511	0,003945	0,066323	0,004523	0,376013
		Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson	Spearman	Pearson
	Statistic	0,886500501	0,941986	0,943372	0,923504	0,796679	0,925215	0,962501	0,753535	0,95924	0,916102
DAS55	p.value	0,087390478	0,483125	0,502018	0,279585	0,006226	0,294686	0,791756	0,002014	0,741893	0,222132
		Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson	Pearson
	Statistic	0,928943253	0,875328	0,875387	0,9664	0,908575	0,902276	0,870425	0,960209	0,848696	0,959926
DAS70	p.value	0,330123621	0,061668	0,06178	0,847928	0,175328	0,143699	0,052993	0,756879	0,027417	0,752514
		Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Pearson	Spearman	Pearson

A 5% de significância

APÊNDICE E – Estatística de concordância

Tabela 30 Estatística de concordância dos valores de IAF ajustado e observado para a soja por DAS

DAS	IV	rs	ME	RMSE	dr
DAS34	NDVI GS	0,05	-0,3724	0,3354	0,4019
DAS34	NDVI FS	0,18	-0,1507	0,4087	0,4096
DAS45	NDVI GS	0,58*	-1,0575	1,1105	0,4053
DAS45	NDVI FS	-0,04	-1,4184	1,4783	0,3026
DAS71	NDVI GS	-0,11	0,9338	1,0793	0,3305
DAS71	NDVI FS	-0,1	1,5250	2,5229	0,2630
DAS76	NDVI GS	0,28	1,4437	2,1359	0,1818
DAS76	NDVI FS	-0,27	1,7940	3,3019	0,1495
DAS110	NDVI GS	0,51	0,1384	0,4442	0,6976
DAS110	NDVI FS	0,35	1,2040	0,5114	0,5997

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

Tabela 31 Estatística de concordância dos valores de IC ajustado e observado para a soja por DAS

DAS	IV	rs	ME	RMSE	dr
DAS34	NDVI GS	0,45*	5,9304	75,1838	0,5173
DAS34	NDVI FS	0,37	6,7278	83,8213	0,5330
DAS45	NDVI GS	0,49*	1,6589	3,2124	0,5173
DAS45	NDVI FS	0,48*	1,3560	3,1325	0,4782
DAS71	NDVI GS	-0,11	-1,8357	6,1976	0,4343
DAS71	NDVI FS	-0,11	-0,2319	6,1503	-0,7975
DAS76	NDVI GS	-0,001	0,1961	3,3257	0,1861
DAS76	NDVI FS	-0,33	1,4066	5,5495	0,4096
DAS110	NDVI GS	0,68*	-5,9516	49,8745	0,6215
DAS110	NDVI FS	0,27	-9,2586	106,5002	0,4223

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

Tabela 32 Estatística de concordância dos valores de RFAI ajustado e observado para a soja por DAS

DAS	IV	rs	ME	RMSE	dr
DAS34	NDVI GS	-0,2	-208,9361	60127,7411	0,3202
DAS34	NDVI FS	0,1	-123,5159	43863,0975	0,3096
DAS45	NDVI GS	-0,07	377,6967	411,9721	0,3509
DAS45	NDVI FS	0,26	227,4381	272,0798	0,4438
DAS71	NDVI GS	-0,35	-4,3172	134256,5980	0,0706
DAS71	NDVI FS	-0,29	36,5934	128773,8724	0,1045
DAS76	NDVI GS	-0,23	60,9593	97190,4468	0,2225
DAS76	NDVI FS	0,61*	48,6021	77887,4291	0,3645
DAS110	NDVI GS	0,24	250,8395	225664,7184	0,4644
DAS110	NDVI FS	0,34	183,7234	182023,2093	0,4796

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

Tabela 33 Estatística de concordância dos valores de Altura ajustada e observada para a soja por DAS

DAS	IV	rs	ME	RMSE	dr
DAS34	NDVI GS	0,13	-0,0388	29,0250	0,2764
DAS34	NDVI FS	0,03	-2,7141	72,9222	0,1877
DAS45	NDVI GS	-0,36	-13,5149	15,0141	0,2685
DAS45	NDVI FS	0,2	-19,1438	19,6750	0,2574
DAS71	NDVI GS	0,1	6,9118	73,1101	0,4467
DAS71	NDVI FS	0,04	14,9849	249,9527	0,3233
DAS76	NDVI GS	-0,25	13,1882	201,3159	0,3012
DAS76	NDVI FS	-0,03	18,0450	347,1606	0,2709
DAS110	NDVI GS	--	--	--	--
DAS110	NDVI FS	--	--	--	--

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

Tabela 34 Estatística de concordância dos valores de IAF ajustado e observado para o feijão por DAS

DAS	IV	rs	ME	RMSE	dr
DAS0	NDVI GS	--	--	--	--
DAS0	NDVI FS	--	--	--	--
DAS10	NDVI GS	0,03	-0,0083	0,0290	0,2392
DAS10	NDVI FS	0,15	-0,0589	0,0316	0,2684
DAS25	NDVI GS	0,59*	0,1548	0,3140	0,8745
DAS25	NDVI FS	0,71*	0,1516	0,2883	0,8772
DAS43	NDVI GS	0,75*	-0,0834	0,5804	0,8405
DAS43	NDVI FS	0,74*	0,0755	0,7146	0,8105
DAS55	NDVI GS	0,82*	0,0072	0,4338	0,7543
DAS55	NDVI FS	0,51	-0,0437	0,8342	0,1500
DAS70	NDVI GS	0,08	-0,1046	0,2489	0,5101
DAS70	NDVI FS	0,17	-0,2152	0,2708	0,5602

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

Tabela 35 Estatística de concordância dos valores de IC ajustado e observado para o feijão por DAS

DAS	IV	rs	ME	RMSE	dr
DAS0	NDVI GS	--	--	--	--
DAS0	NDVI FS	--	--	--	--
DAS10	NDVI GS	--	--	--	--
DAS10	NDVI FS	--	--	--	--
DAS25	NDVI GS	-0,03	0,0937	11,8141	0,3627
DAS25	NDVI FS	0,08	0,1194	11,1498	0,3632
DAS43	NDVI GS	0,59*	0,4734	3,2263	0,6732
DAS43	NDVI FS	0,60*	0,7055	3,3576	0,7072
DAS55	NDVI GS	-0,1	1,6762	13,1053	-0,2961
DAS55	NDVI FS	0,41	1,4720	10,4822	0,4372
DAS70	NDVI GS	0,02	-2,5469	15,9048	0,4152
DAS70	NDVI FS	-0,38	-2,7393	19,1016	0,3360

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

Tabela 36 Estatística de concordância dos valores de RFAI ajustado e observado para o feijão por DAS

DAS	IV	rs	ME	RMSE	dr
DAS0	NDVI GS	--	--	--	--
DAS0	NDVI FS	--	--	--	--
DAS10	NDVI GS	0,01	-31,9154	3091,9153	0,2657
DAS10	NDVI FS	-0,04	-30,5618	2576,6689	0,4085
DAS25	NDVI GS	0,65*	18,9799	39540,2886	0,8366
DAS25	NDVI FS	0,72*	20,7219	39652,6921	0,8348
DAS43	NDVI GS	0,66*	55,5115	36743,2062	0,9450
DAS43	NDVI FS	0,72*	89,4149	43417,9534	0,8119
DAS55	NDVI GS	0,55	-88,2129	25967,1296	0,5457
DAS55	NDVI FS	0,57*	-115,9802	26485,3925	0,4870
DAS70	NDVI GS	0,17	22,7900	36808,8778	0,3751
DAS70	NDVI FS	0,37	-6,4247	24449,7859	0,6496

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

Tabela 37 Estatística de concordância dos valores de Altura observada e ajustada para o feijão por DAS

DAS	IV	rs	ME	RMSE	dr
DAS0	NDVI GS		--	--	--
DAS0	NDVI FS		--	--	--
DAS10	NDVI GS	0,31	-1,8617	4,8945	0,4510
DAS10	NDVI FS	-0,1	-1,6664	5,2679	0,3654
DAS25	NDVI GS	0,73*	-5,0018	91,4994	0,5182
DAS25	NDVI FS	0,65*	-5,2996	87,4673	0,4936
DAS43	NDVI GS	0,50*	3,7835	64,3915	0,5216
DAS43	NDVI FS	0,56*	5,5776	87,8506	0,4405
DAS55	NDVI GS	0,36	-2,2690	43,4849	0,6864
DAS55	NDVI FS	0,39	-2,2690	43,3846	0,3986
DAS70	NDVI GS	0,05	12,6260	178,2519	0,3426
DAS70	NDVI FS	-0,14	10,6525	150,9082	0,3142

*5% de significância; R^2 - Coeficiente de Determinação; rs - correlação de Spearman ME - Erro Médio; RMSE - Raiz do Erro Médio Quadrático e d_r - Coeficiente de Concordância Aprimorado de Willmott

APÊNDICE F – Diagramas de dispersão entre valores observados e ajustados (IAF, IC, RFAI e Altura)

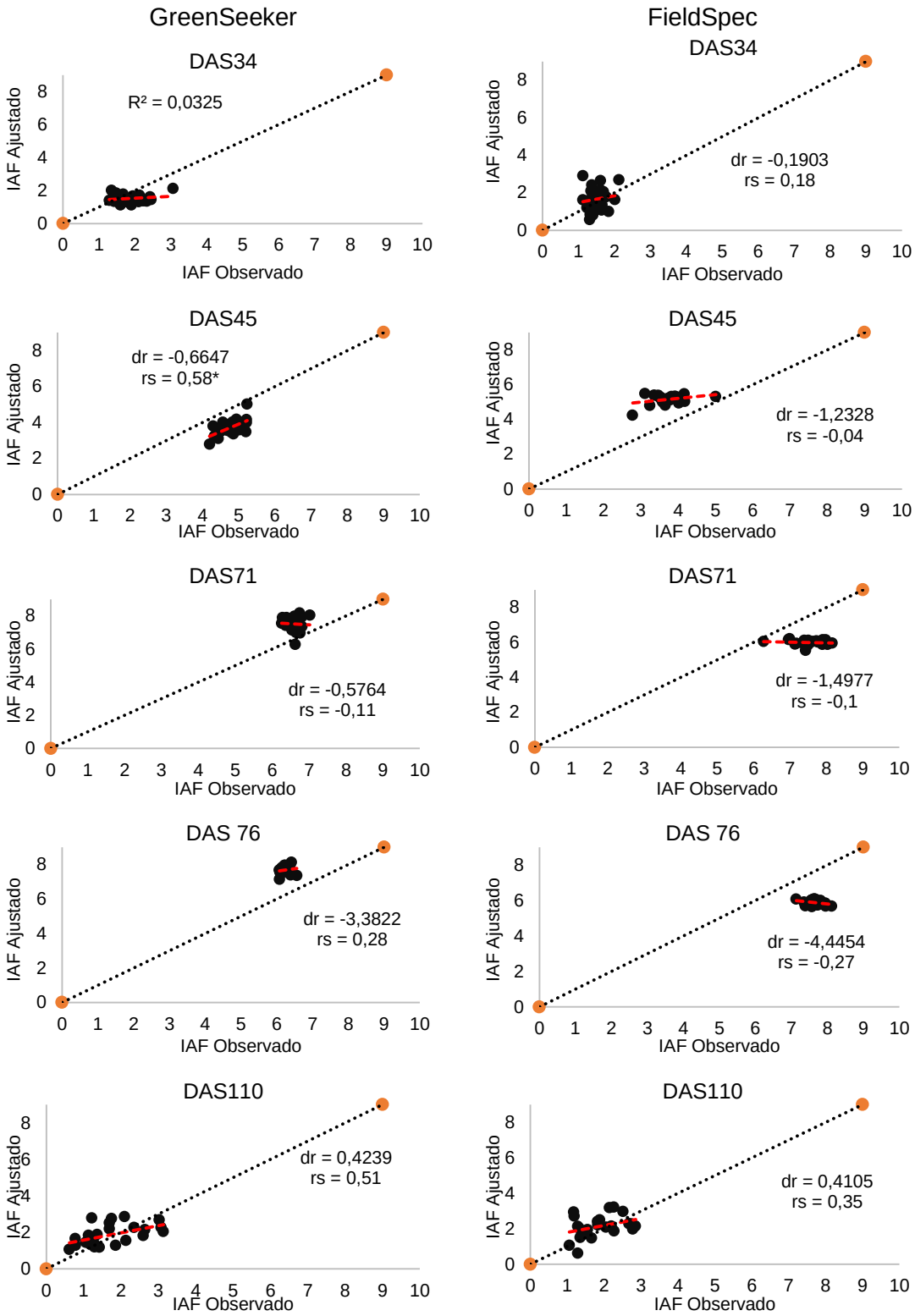


Figura 40 Relação entre IAF observado e ajustado para a soja.

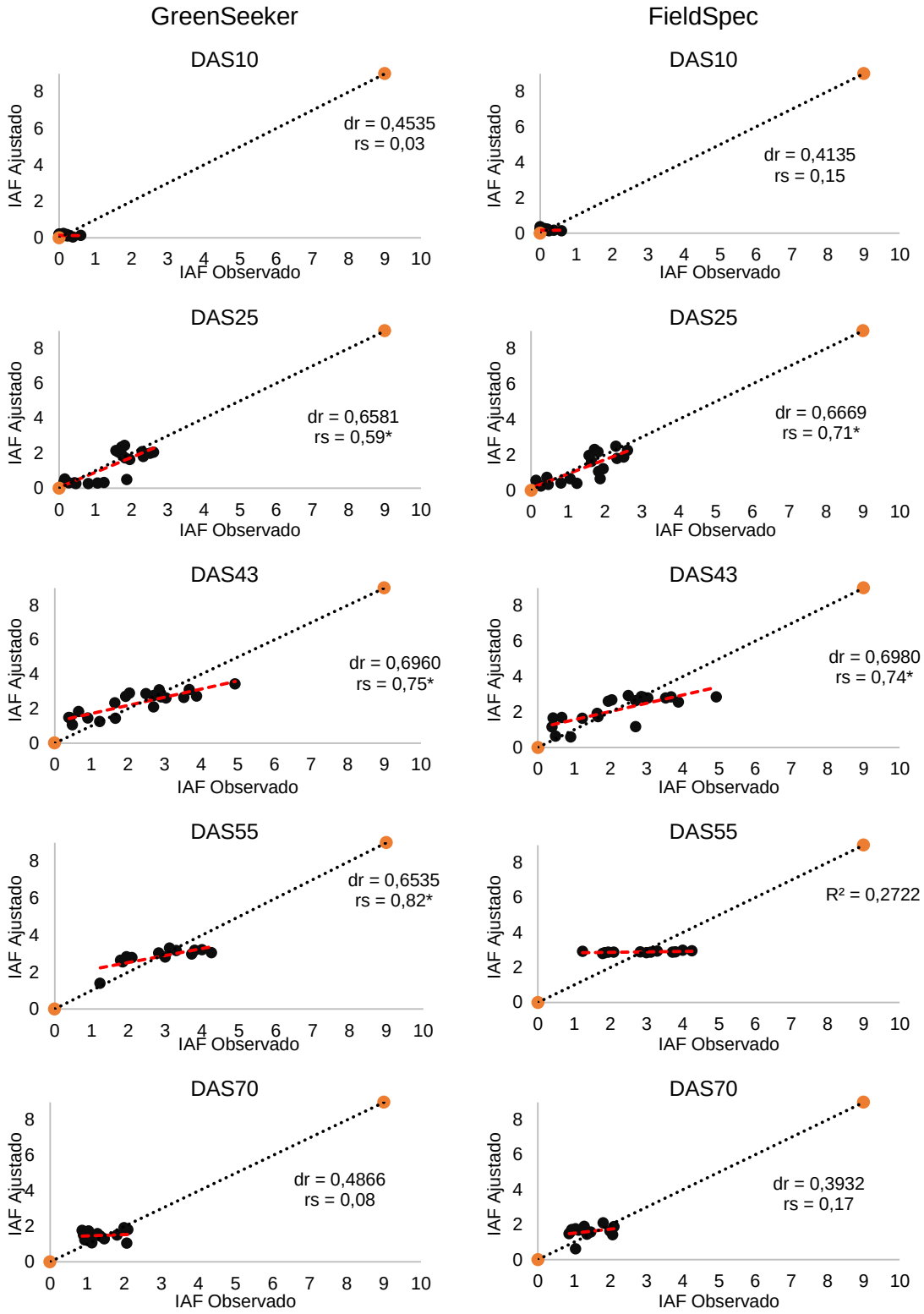


Figura 41 Relação entre IAF observado e ajustado para o feijão.

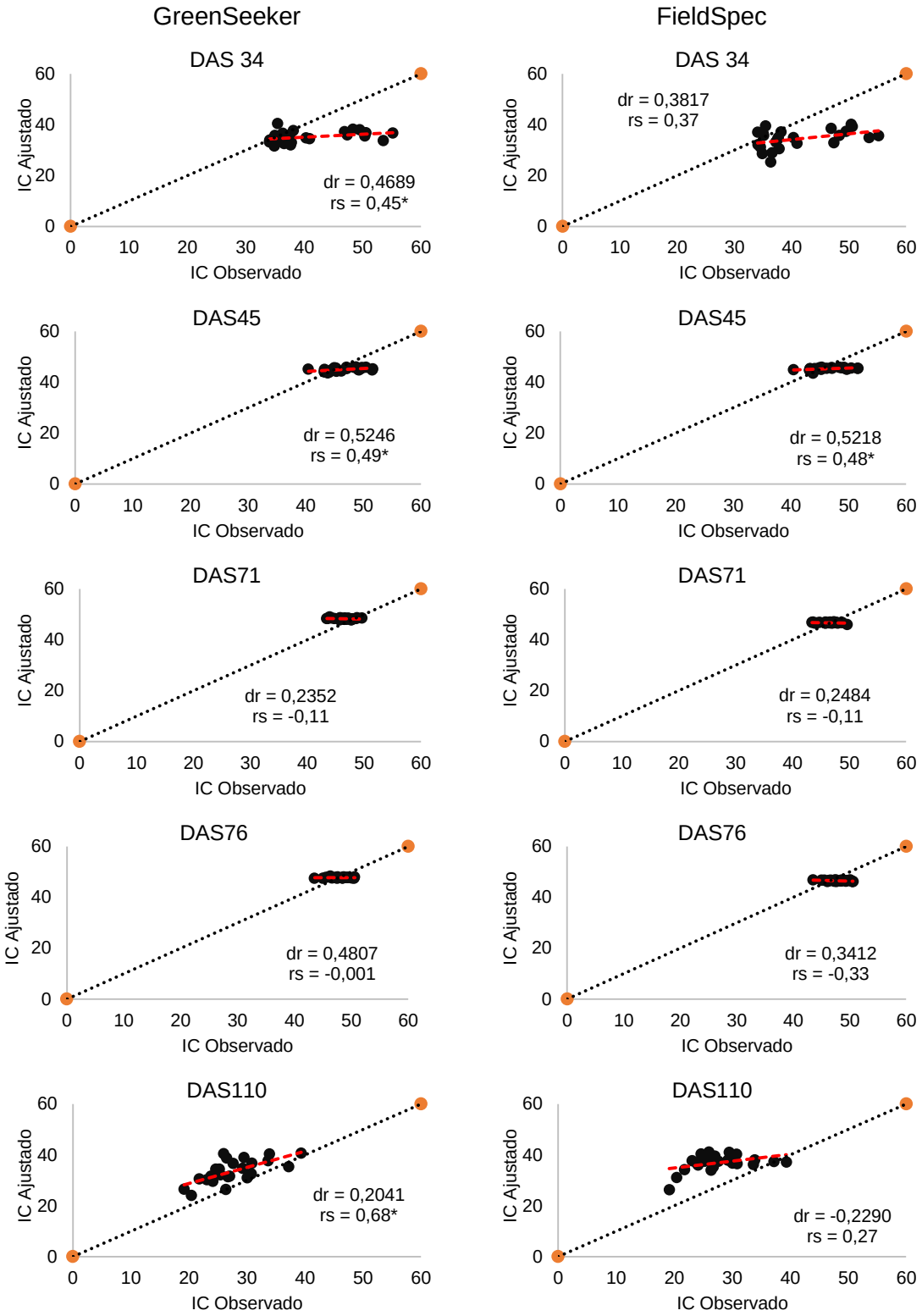


Figura 42 Relação entre IC observado e ajustado para a soja.

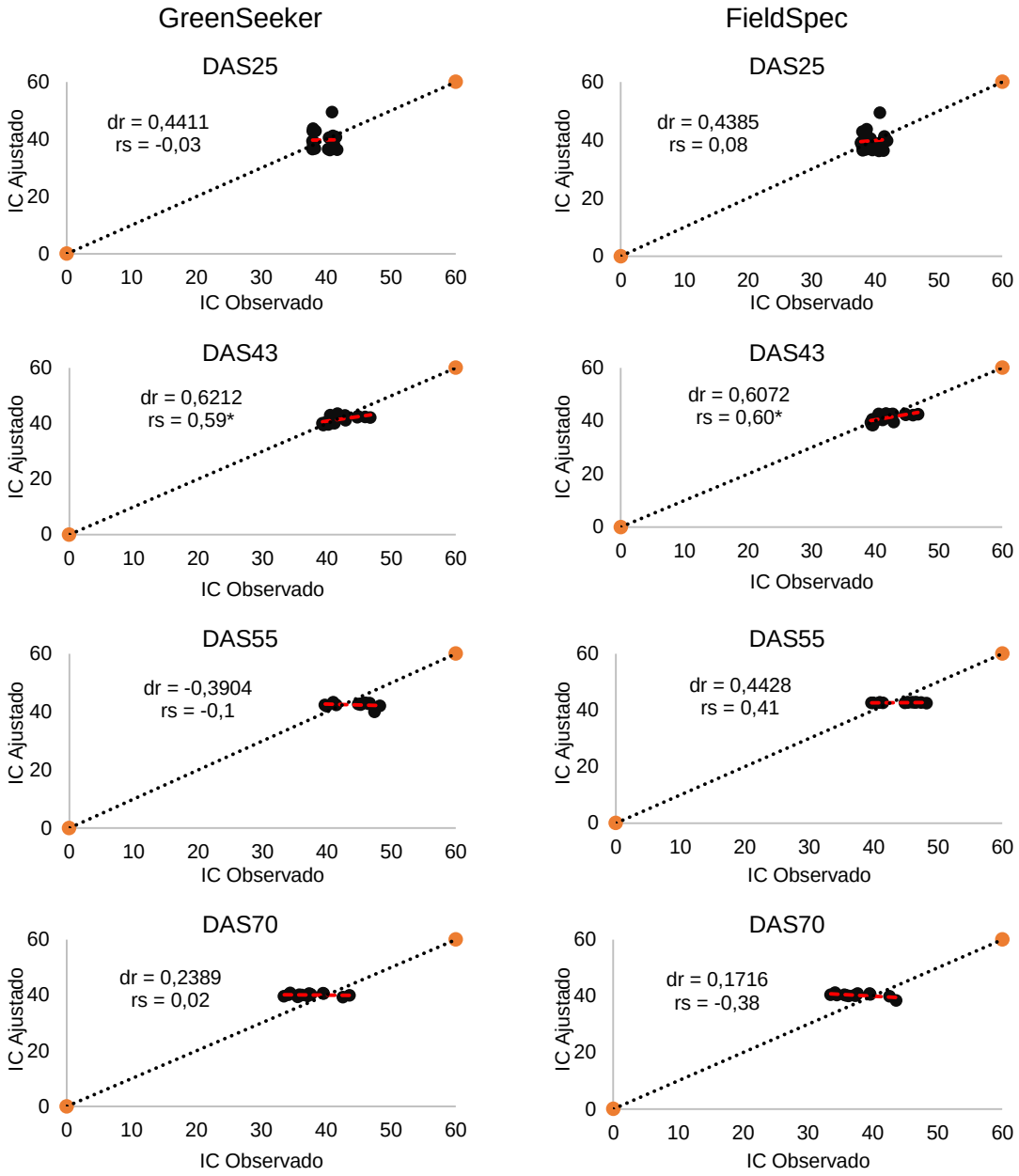


Figura 43 Relação entre IC observado e ajustado para o feijão.

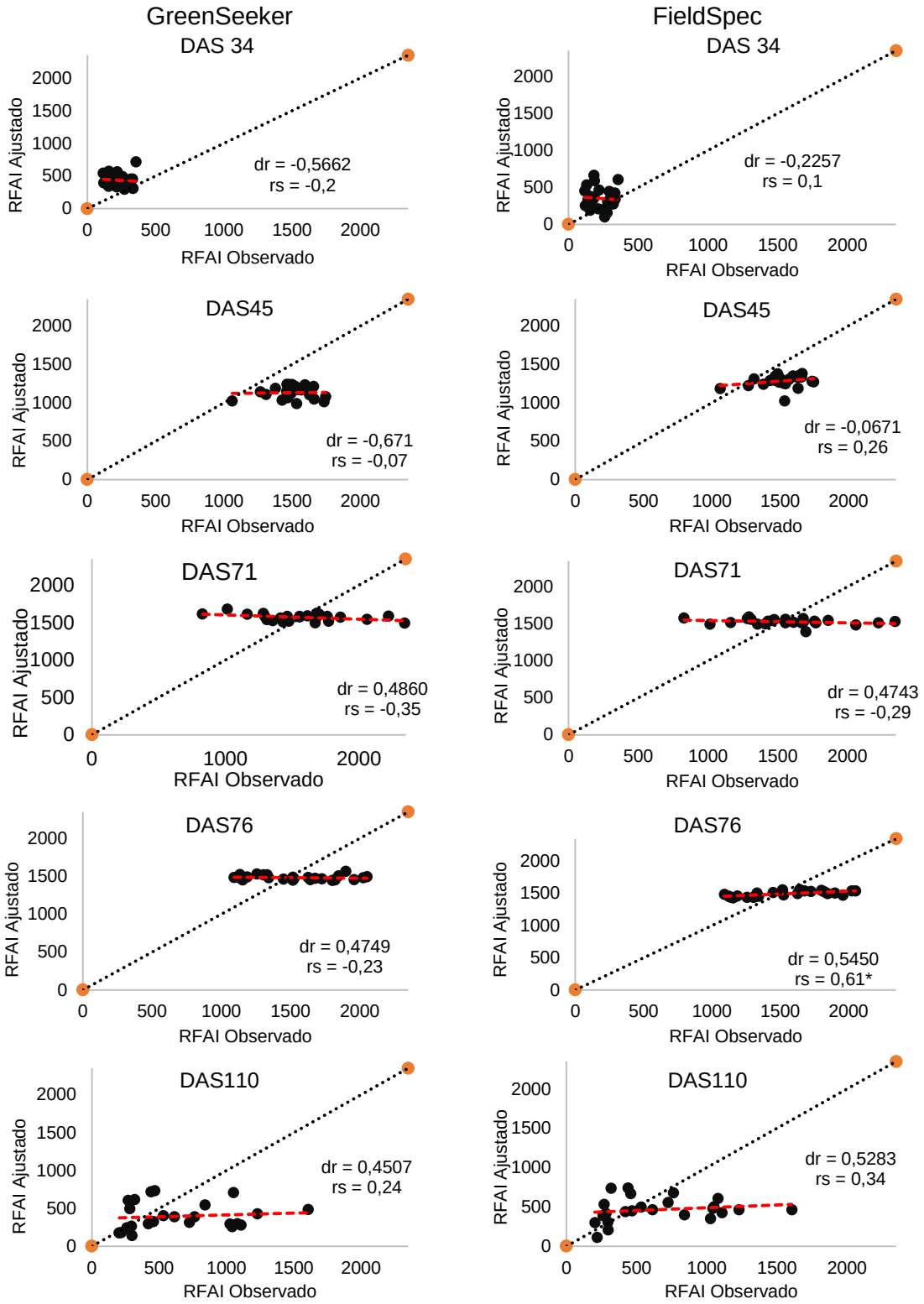


Figura 44 Relação entre RFAI observado e ajustado para a soja.

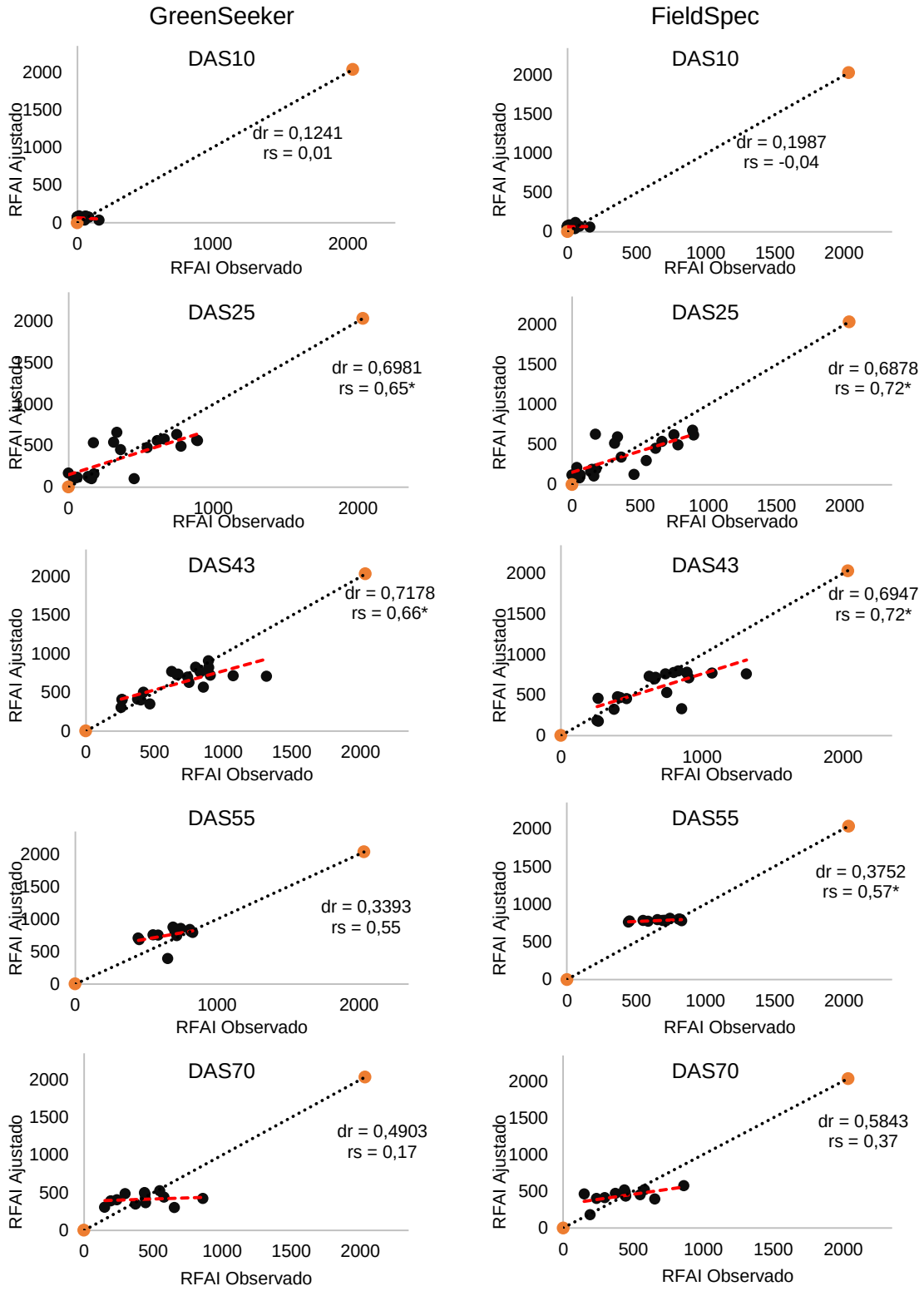


Figura 45 Relação entre RFAI observado e ajustado para o feijão.

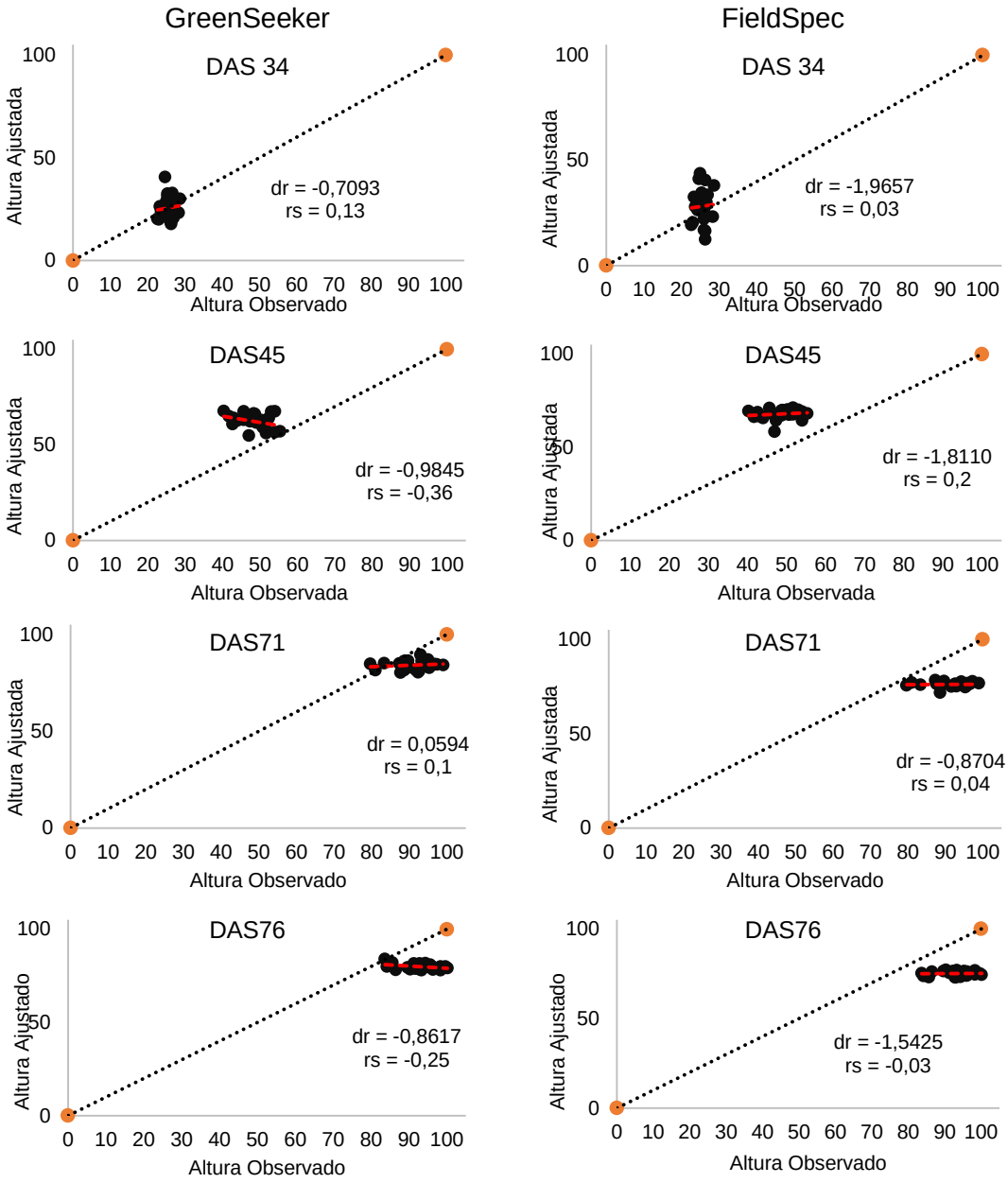


Figura 46 Relação entre Altura observada e ajustada para a soja.

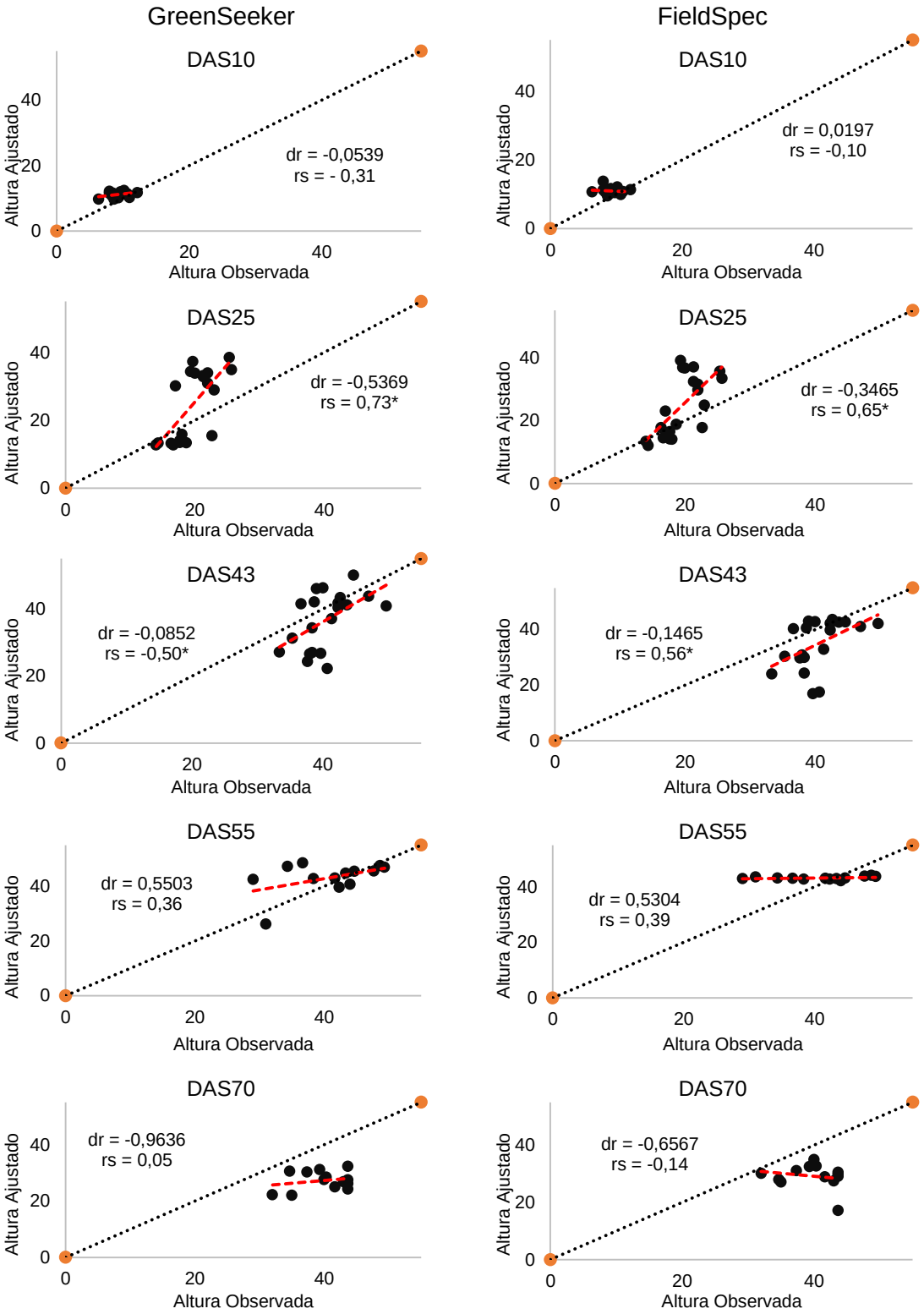


Figura 47 Relação entre Altura observada e ajustada para o feijão.

APÊNDICE G – Variáveis confeccionadas

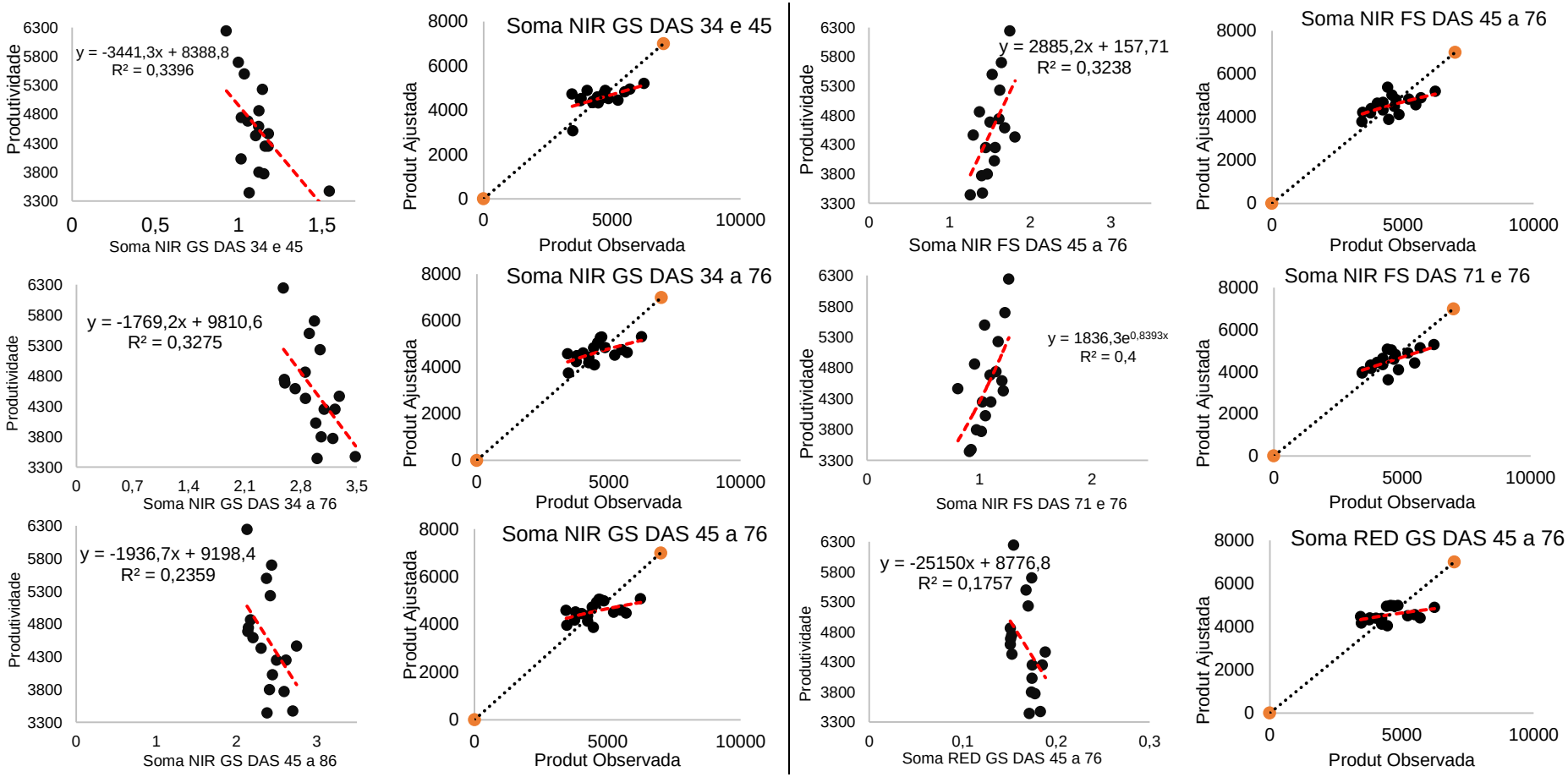
Tabela 38 Correlação entre Produtividade e variáveis correlacionadas para a soja

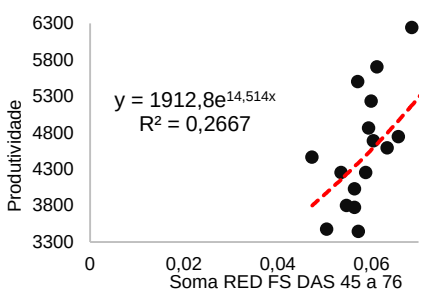
Variáveis	Rs	p-valor	Variáveis	rs	p-valor	Variáveis	rs	p-valor
Soma NDVI GS	-0,069	0,794	Soma IC	0,054	0,837	RED GS DAS76	-0,534	0,027*
Máximo NDVI GS	-0,064	0,808	Máximo IC	0,458	0,064	NIR FS DAS76	0,576	0,013*
Soma NDVI GS DAS 34 e 45	-0,007	0,978	Soma IC DAS 34 e 45	0,223	0,390	RED FS DAS76	0,596	0,012*
Soma NDVI GS DAS 34 a 71	0,039	0,871	Soma IC DAS 34 a 71	0,113	0,667	NDVI GS DAS76	-0,392	0,119
Soma NDVI GS DAS 34 a 76	-0,010	0,970	Soma IC DAS 34 a 76	0,113	0,667	NDVI FS DAS76	-0,346	0,174
Soma NDVI GS DAS 45 e 71	-0,164	0,529	Soma IC DAS 45 e 71	0,047	0,859	RFAI DAS76	-0,473	0,055
Soma NDVI GS DAS 45 a 76	-0,154	0,554	Soma IC DAS 45 a 76	0,006	0,971	IC DAS110	-0,343	0,178
Soma NDVI GS DAS 45 a 110	-0,042	0,874	Soma IC DAS 45 a 110	-0,137	0,599	Altura DAS110	-0,210	0,418
Soma NDVI GS DAS 71 e 76	-0,199	0,445	Soma IC DAS 71 e 76	0,130	0,619	IAF DAS110	0,449	0,071
Soma NDVI GS DAS 71 a 110	0,010	0,970	Soma IC DAS 71 a 110	-0,155	0,554	NIR GS DAS110	0,243	0,348
Soma NDVI GS DAS 76 e 110	0,015	0,955	Soma IC DAS 76 e 110	-0,132	0,613	RED GS DAS110	0,140	0,593
Soma NDVI FS	0,147	0,573	Soma Altura	-0,211	0,416	NIR FS DAS110	0,176	0,474
Máximo NDVI FS	-0,211	0,417	Máximo Altura	-0,204	0,433	RED FS DAS110	-0,032	0,903
Soma NDVI FS DAS 34 e 45	0,157	0,548	Soma Altura DAS 34 e 45	-0,071	0,757	NDVI GS DAS110	0,015	0,955
Soma NDVI FS DAS 34 a 71	0,159	0,541	Soma Altura DAS 34 a 71	-0,278	0,271	NDVI FS DAS110	0,360	0,155
Soma NDVI FS DAS 34 a 76	0,127	0,626	Soma Altura DAS 34 a 76	-0,148	0,570	RFAI DAS110	-0,054	0,837
Soma NDVI FS DAS 45 e 71	-0,007	0,978	Soma Altura DAS 45 e 71	-0,356	0,161	IAF X Altura	0,027	0,806
Soma NDVI FS DAS 45 a 76	-0,147	0,573	Soma Altura DAS 45 a 76	-0,176	0,474	IAF x IC	0,056	0,610
Soma NDVI FS DAS 45 a 110	0,417	0,096	Soma Altura DAS 45 a 110	-0,228	0,379	IAF x RFAI	-0,057	0,604
Soma NDVI FS DAS 71 e 76	-0,353	0,165	Soma Altura DAS 71 e 76	-0,131	0,615	IAF x NDVI GS	0,003	0,976
Soma NDVI FS DAS 71 a 110	0,333	0,191	Soma Altura DAS 71 a 110	-0,074	0,779	IAF x NDVI FS	0,015	0,889
Soma NDVI FS DAS 76 e 110	0,338	0,184	Soma Altura DAS 76 e 110	0,005	0,985	IAF X NIR GS	-0,015	0,891
Soma NIR GS	-0,456	0,066	Soma RFAI	-0,328	0,198	IAF X RED GS	-0,025	0,719
Máximo NIR GS	0,015	0,955	Máximo RFAI	-0,370	0,144	IAF X NIR FS	0,110	0,316
Soma NIR GS DAS 34 e 45	-0,527	0,030*	Soma RFAI DAS 34 e 45	-0,235	0,363	IAF X RED FS	0,160	0,144
Soma NIR GS DAS 34 a 71	-0,417	0,096	Soma RFAI DAS 34 a 71	-0,248	0,338	IC X Altura	0,001	0,993
Soma NIR GS DAS 34 a 76	-0,630	0,007*	Soma RFAI DAS 34 a 76	-0,419	0,094	IC X RFAI	-0,093	0,398
Soma NIR GS DAS 45 e 71	-0,176	0,474	Soma RFAI DAS 45 e 71	-0,213	0,411	IC x NDVI GS	0,032	0,770
Soma NIR GS DAS 45 a 76	-0,532	0,028*	Soma RFAI DAS 45 a 76	-0,395	0,117	IC x NDVI FS	0,051	0,640
Soma NIR GS DAS 45 a 110	-0,397	0,115	Soma RFAI DAS 45 a 110	-0,353	0,165	IC X NIR GS	-0,064	0,562
Soma NIR GS DAS 71 e 76	-0,458	0,064	Soma RFAI DAS 71 e 76	-0,419	0,094	IC X RED GS	-0,111	0,311
Soma NIR GS DAS 71 a 110	-0,255	0,323	Soma RFAI DAS 71 a 110	-0,363	0,152	IC X NIR FS	0,116	0,291
Soma NIR GS DAS 76 e 110	-0,346	0,174	Soma RFAI DAS 76 e 110	-0,387	0,125	IC X RED FS	0,085	0,438
Soma NIR FS	0,343	0,178	IC médio	0,054	0,837	Altura X RFAI	-0,092	0,405
Máximo NIR FS	0,294	0,252	Altura médio	-0,211	0,416	Altura x NDVI GS	-0,024	0,825
Soma NIR FS DAS 34 e 45	0,078	0,765	IAF médio	0,407	0,105	Altura x NDVI FS	-0,013	0,906
Soma NIR FS DAS 34 a 71	0,260	0,314	NIR GS médio	-0,456	0,066	Altura X NIR GS	-0,063	0,565
Soma NIR FS DAS 34 a 76	0,468	0,058	RED GS médio	-0,377	0,135	Altura X RED GS	-0,087	0,430
Soma NIR FS DAS 45 e 71	0,304	0,236	NIR FS médio	0,343	0,178	Altura X NIR FS	0,094	0,392

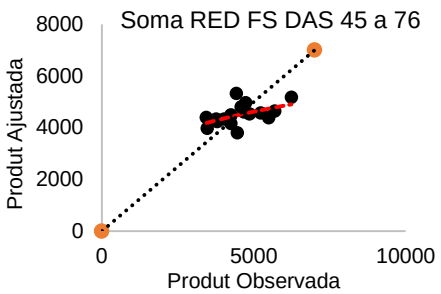
Variáveis	Rs	p-valor	Variáveis	rs	p-valor	Variáveis	rs	p-valor
Soma NIR FS DAS 45 a 76	0,539	0,026*	RED FS médio	0,076	0,743	Altura X RED FS	0,080	0,465
Soma NIR FS DAS 45 a 110	0,390	0,122	NDVI GS médio	-0,069	0,794	RFAI x NDVI GS	-0,112	0,307
Soma NIR FS DAS 71 e 76	0,615	0,009*	NDVI FS médio	0,147	0,573	RFAI x NDVI FS	-0,106	0,334
Soma NIR FS DAS 71 a 110	0,333	0,191	RFAI médio	-0,328	0,198	RFAI X NIR GS	-0,105	0,337
Soma NIR FS DAS 76 e 110	0,341	0,171	IC DAS34	0,157	0,548	RFAI X RED GS	-0,164	0,134
Soma RED GS	-0,377	0,135	Altura DAS34	0,363	0,152	RFAI X NIR FS	-0,023	0,834
Máximo RED GS	-0,336	0,188	IAF DAS34	-0,140	0,593	RFAI X RED FS	-0,028	0,796
Soma RED GS DAS 34 e 45	-0,355	0,162	NIR GS DAS34	-0,571	0,014*	NDVI GS x NDVI FS	-0,012	0,916
Soma RED GS DAS 34 a 71	-0,370	0,144	RED GS DAS34	-0,368	0,147	NDVI GS X NIR GS	-0,058	0,596
Soma RED GS DAS 34 a 76	-0,439	0,078	NIR FS DAS34	0,027	0,918	NDVI GS X RED GS	-0,104	0,345
Soma RED GS DAS 45 e 71	-0,260	0,314	RED FS DAS34	-0,069	0,794	NDVI GS X NIR FS	0,116	0,289
Soma RED GS DAS 45 a 76	-0,500	0,041*	NDVI GS DAS34	-0,020	0,940	NDVI GS X RED FS	0,076	0,487
Soma RED GS DAS 45 a 110	-0,093	0,722	NDVI FS DAS34	0,132	0,613	NIR GS X RED GS	-0,148	0,175
Soma RED GS DAS 71 e 76	-0,461	0,063	RFAI DAS34	-0,262	0,309	NIR GS X NIR FS	0,006	0,957
Soma RED GS DAS 71 a 110	-0,078	0,765	IC DAS45	0,118	0,653	NIR GS X RED FS	0,001	0,994
Soma RED GS DAS 76 e 110	-0,083	0,751	Altura DAS45	-0,185	0,477	RED GS X NIR FS	0,025	0,719
Soma RED FS	0,076	0,743	IAF DAS45	0,260	0,314	RED GS X RED FS	0,000	1,000
Máximo RED FS	-0,140	0,593	NIR GS DAS45	-0,179	0,492	NIR FS X RED FS	0,193	0,077
Soma RED FS DAS 34 e 45	-0,076	0,743	RED GS DAS45	-0,172	0,510	IC^2	0,099	0,367
Soma RED FS DAS 34 a 71	-0,032	0,903	NIR FS DAS45	0,000	1,000	Altura^2	-0,034	0,760
Soma RED FS DAS 34 a 76	0,093	0,722	RED FS DAS45	-0,002	0,993	IAF^2	0,016	0,887
Soma RED FS DAS 45 e 71	0,071	0,776	NDVI GS DAS45	-0,105	0,687	NIR GS^2	-0,108	0,324
Soma RED FS DAS 45 a 76	0,576	0,016*	NDVI FS DAS45	0,012	0,963	RED GS^2	-0,103	0,349
Soma RED FS DAS 45 a 110	0,061	0,715	RFAI DAS45	-0,223	0,390	NIR FS^2	0,149	0,173
Soma RED FS DAS 71 e 76	0,618	0,008*	IC DAS71	0,042	0,874	RED FS^2	0,075	0,495
Soma RED FS DAS 71 a 110	0,078	0,765	Altura DAS71	-0,277	0,282	NDVI GS^2	-0,023	0,836
Soma RED FS DAS 76 e 110	0,088	0,736	IAF DAS71	-0,250	0,333	NDVI FS^2	-0,011	0,919
Soma IAF	0,407	0,105	NIR GS DAS71	0,015	0,955	RFAI^2	-0,117	0,285
Máximo IAF	-0,076	0,743	RED GS DAS71	0,015	0,955	IC^1/2	0,099	0,367
Soma IAF DAS 34 e 45	0,078	0,765	NIR FS DAS71	0,338	0,184	Altura^1/2	-0,034	0,760
Soma IAF DAS 34 a 71	-0,076	0,743	RED FS DAS71	0,316	0,216	IAF^1/2	0,016	0,887
Soma IAF DAS 34 a 76	-0,265	0,305	NDVI GS DAS71	0,074	0,779	NIR GS^1/2	-0,108	0,324
Soma IAF DAS 45 e 71	-0,007	0,978	NDVI FS DAS71	-0,179	0,492	RED GS^1/2	-0,103	0,349
Soma IAF DAS 45 a 76	-0,152	0,560	RFAI DAS71	-0,218	0,400	NIR FS^1/2	0,149	0,173
Soma IAF DAS 45 a 110	0,505	0,039*	IC DAS76	0,284	0,269	RED FS^1/2	0,075	0,495
Soma IAF DAS 71 e 76	-0,103	0,694	Altura DAS76	0,118	0,653	NDVI GS^1/2	-0,023	0,836
Soma IAF DAS 71 a 110	0,363	0,152	IAF DAS76	-0,194	0,456	NDVI FS^1/2	-0,011	0,919
Soma IAF DAS 76 e 110	0,373	0,141	NIR GS DAS76	-0,657	0,004*	RFAI^1/2	-0,117	0,285

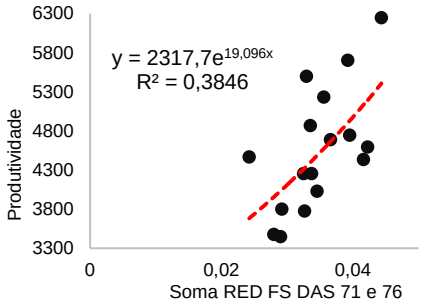
*a 5% de significância

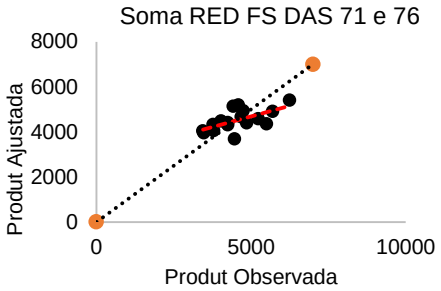
APÊNDICE H – Dispersão entre variáveis confeccionadas e produtividade

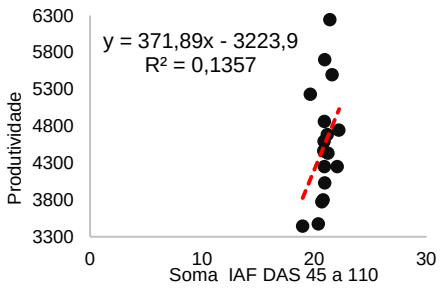


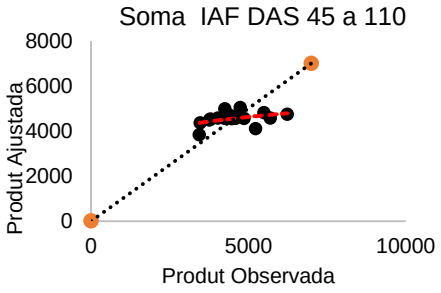

y = 1912,8e14,514x
R² = 0,2667
Produtividade
Soma RED FS DAS 45 a 76

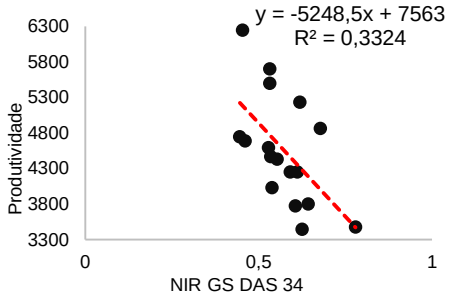

Soma RED FS DAS 45 a 76
Produt Ajustada
Produt Observada

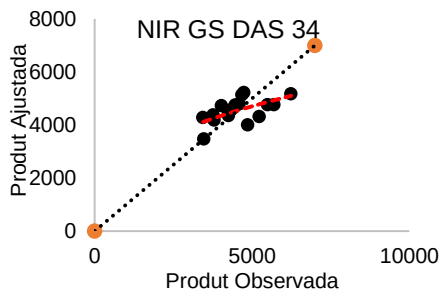

y = 2317,7e19,096x
R² = 0,3846
Produtividade
Soma RED FS DAS 71 e 76

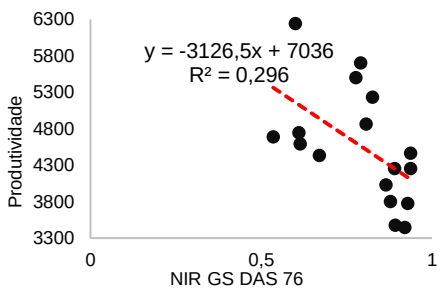

Soma RED FS DAS 71 e 76
Produt Ajustada
Produt Observada

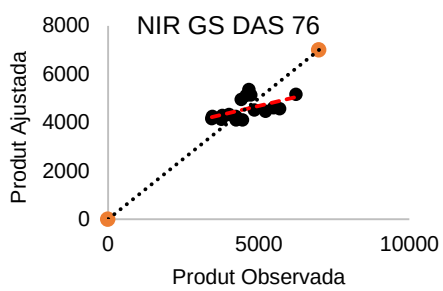

y = 371,89x - 3223,9
R² = 0,1357
Produtividade
Soma IAF DAS 45 a 110

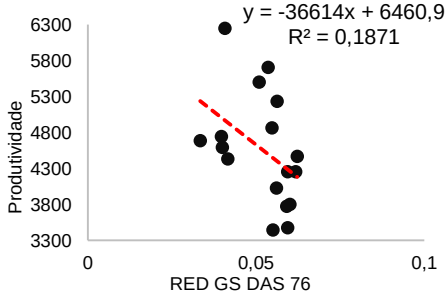

Soma IAF DAS 45 a 110
Produt Ajustada
Produt Observada

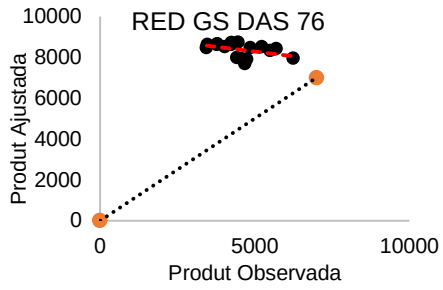

y = -5248,5x + 7563
R² = 0,3324
Produtividade
NIR GS DAS 34


NIR GS DAS 34
Produt Ajustada
Produt Observada


y = -3126,5x + 7036
R² = 0,296
Produtividade
NIR GS DAS 76


NIR GS DAS 76
Produt Ajustada
Produt Observada


y = -36614x + 6460,9
R² = 0,1871
Produtividade
RED GS DAS 76


RED GS DAS 76
Produt Ajustada
Produt Observada

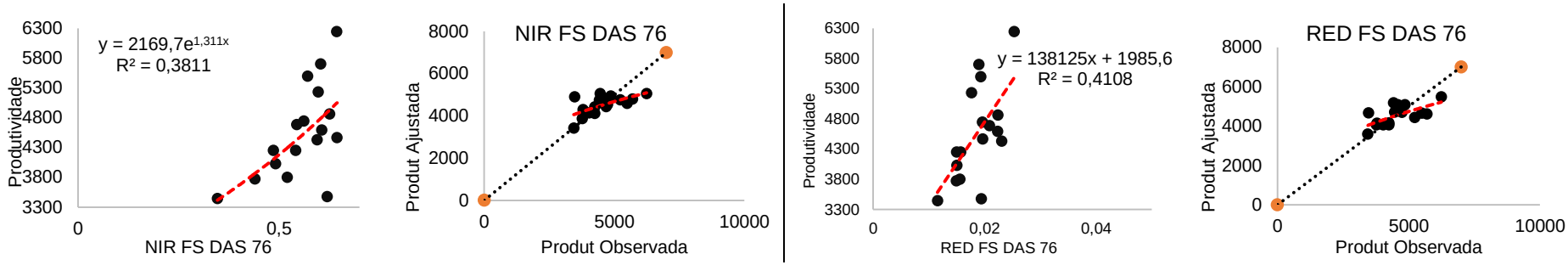


Figura 48 Relação entre Produtividade observada e ajustada para a soja.

APÊNDICE I – Dados meteorológicos

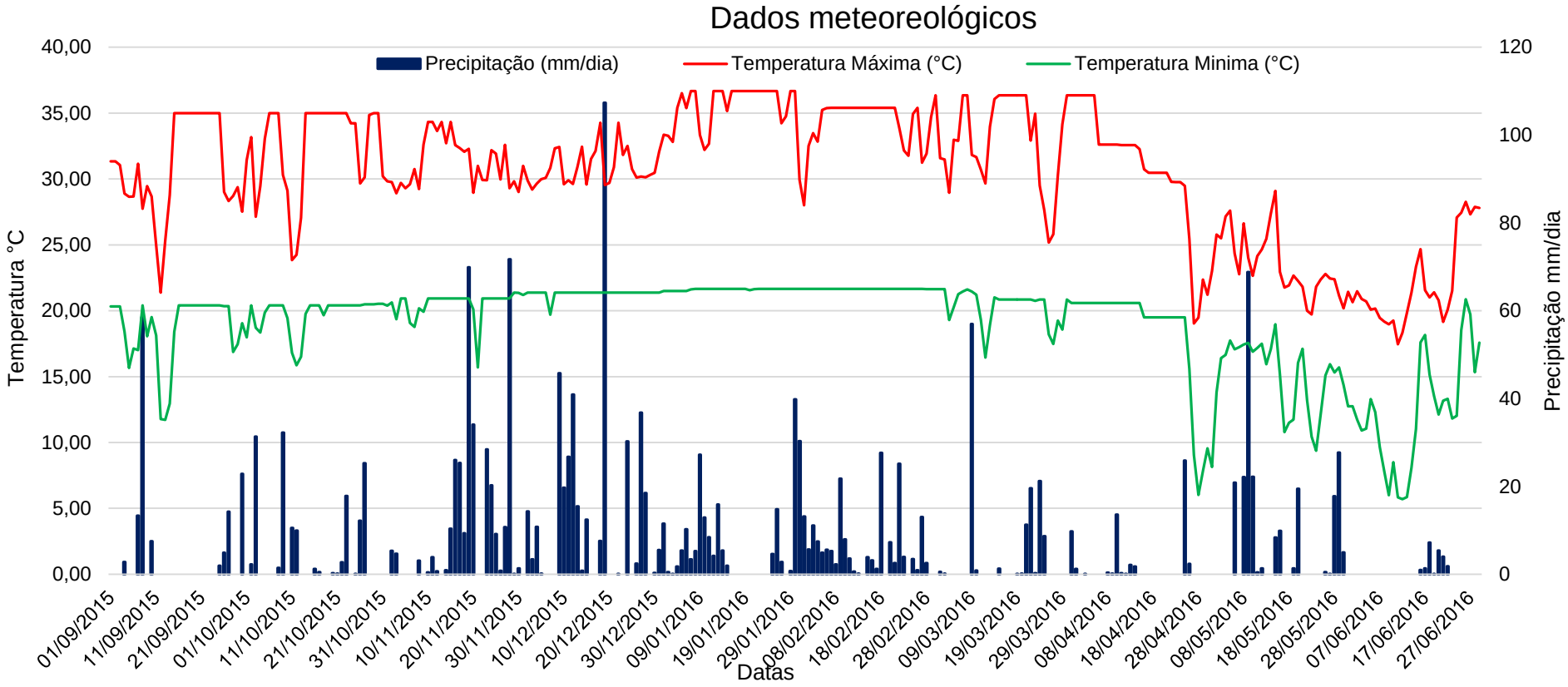


Figura 49 Dados meteorológicos para o período de monitoramento.

Fonte: Pricenton University (2016)