

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SOFTWARE APLICADO A MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE
AGRÍCOLA**

RENNAN ANDRES PALOSCHI

CASCAVEL

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SOFTWARE APLICADO A MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE
AGRÍCOLA**

Dissertação submetida à banca examinadora para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração de Sistema Biológicos e Agroindustriais, com a temática Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão.

Orientador: Prof. Dr. Jerry Adriani Johann

Co-Orientador: Prof. Dr. Adair Santa Catarina

CASCADEL

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

P211s

Paloschi, Rennan

Software aplicado a modelos de estimativa de produtividade agrícola./Rennan Paloschi. Cascavel, 2016.

98 p.

Orientador: Prof. Dr. Jerry Adriani Johann

Coorientador: Dr. Adair Santa Catarina

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
Campus de Cascavel, 2016

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola

1. Geotecnologias. 2. Balanço hídrico. 3. Sensoriamento remoto. 4.
Padrões de projeto. 5. Análise UML. I. Johann, Jerry Adriani. II. Catarina,
Adair Santa. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 21.ed. 630.285

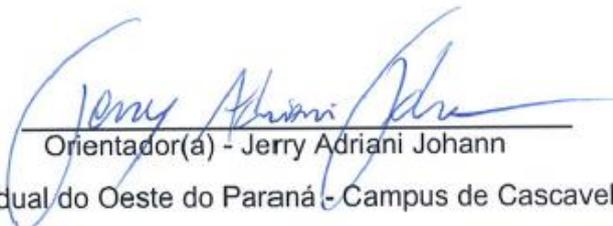
CIP-NBR 12899

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

RENNAN ANDRES PALOSCHI

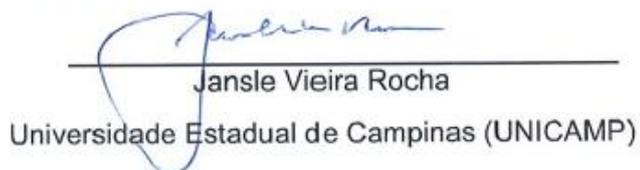
SOFTWARE APLICADO A MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação stricto sensu em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas biológicos e agroindustriais, linha de pesquisa Geoprocessamento, estatística espacial e agricultura de precisão, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Jerry Adriani Johann

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



Jansle Vieira Rocha

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)



Erivelto Mercante

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

Cascavel, 4 de fevereiro de 2016

BIOGRAFIA

Rennan Andres Paloschi, nascido em 25 de novembro de 1992, natural do município de Medianeira, no Paraná, cursou o ensino fundamental e médio no Colégio Estadual João Manuel Mondrone, finalizando o ensino médio em 2009. É graduado Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de sistemas pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, cuja graduação foi concluída em 2013. Ingressou no programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola no ano de 2014, finalizando o mestrado em 2016.

- a Deus todo poderoso criador de todas as coisas, aquele que é Pai Filho e Espírito Santo, pois todo e qualquer trabalho deve vir para engrandecê-lo e louva-lo.
- a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, para o desenvolvimento da universidade e região.
- a República Federativa do Brasil, para a prosperidade da nação.

AGRADECIMENTOS

A todos os colegas do Laboratório de Estatística Aplicada (LEA), do Laboratório de Estatística Espacial (LEE) e do Laboratório de Geoprocessamento (GEOLAB) da UNIOESTE.

Aos professores doutores Jerry Adriani Johann, Adair Santa Catarina, Erivelto Mercante e Luciana Pagliosa Carvalho Guedes, pelos ensinamentos e orientações.

Aos meus pais Diomar Paloschi e Adnara Paloschi, por imensuráveis motivos.

Em especial, aos colegas Clóvis Cechim Júnior, Willyan Becker, Joyce Mafra, Alex Paludo e Jonathan Richetti pela parceria dentro e fora do laboratório.

A CAPES pelo apoio financeiro.

SOFTWARE APLICADO A MODELOS DE ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

RESUMO

Embora haja estudos que busquem modelar as influências de variáveis agrometeorológicas em relação à produtividade das culturas agrícolas, a aplicação destes modelos em escala global e a consequente obtenção de resultados de forma espacial é um verdadeiro desafio dada a complexidade de variáveis envolvidas. Assim, este trabalho buscou analisar e implementar um *software* que permita a aplicação de modelos de estimativa de produtividade agrícola, baseados em imagens de sensoriamento remoto, de forma espacial e automatizada. O modelo de estimativa de produtividade, utilizando o balanço hídrico FAO, assim como os índices necessários para obtê-lo, foi implementado e posteriormente testado para o cultivar soja no Estado do Paraná para a safra 2011/2012. Padrões de projeto e análises utilizando a *Unified Modeling Language* (UML) foram utilizados na construção de estruturas de *software* e padronização de ferramentas computacionais. Tais estruturas foram implementadas para tratamento de dados, estimativa de balanço hídrico e estimativa de produtividade para dar origem ao *software Crop-yield Modeling Platform – CyMP*, versão 1.0.1. Sua estrutura torna, de formas prática, automatizada, reutilizável e escalável, a implementação e a utilização de modelos de estimativa de produtividade agrícola. De acordo com o *software* proposto, foi possível suavizar ruídos em índices de vegetação provenientes de imagens do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS*, interpolar imagens provindas do modelo climático europeu - *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF* - para resolução MODIS, determinar o balanço hídrico FAO, estimar as datas do ciclo de desenvolvimento da cultura da soja, estimar o fator de estresse hídrico da cultura, estimar a evapotranspiração real e, por fim, estimar tanto a produtividade potencial bruta como a produtividade atingível da cultura da soja no Estado do Paraná para safra 2011/2012.

PALAVRAS-CHAVE: geotecnologias, balanço hídrico, sensoriamento remoto, padrões de projeto, análise UML.

SOFTWARE APPLIED TO CROP YIELD ESTIMATION MODELS

ABSTRACT

Although there are studies that have been seeking modeling the influence of meteorological variables in relation to crop yield, the application of such models on a global scale and the consequent achievement concerning spatial results is a real challenge due to the complexity of the involved variables. Thus, this study aimed to analyze and implement *software* that allows the application of models to estimate agricultural yield based on remote sensing images, in a spatial and automated way. Yield estimation model using FAO water balance, as well as the needed indices to calculate it were implemented and subsequently tested for soybean cropping in Parana state for the 2011/2012 harvesting season. Design standards and analyses by language Unified Modeling Language (UML) were used to create a *software* structures and standardize computational tools. Such structures were implemented to data processing, water balance estimation and yield estimation, whose result was a version 1.0.1 *software* Crop-yield Modeling Platform - CyMP. Its structure makes implementation and use of estimation models more practical, automated, reusable and scalable for cropping yield. According to the proposed *software*, it was possible to reduce noise in vegetation indices from the orbital sensor images of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS, interpolate images from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF, climate model to MODIS resolution, determine FAO water balance, estimate dates of development cycle of soybean crop, estimate hydric stress factor, estimate real evapotranspiration, and finally estimate both gross potential yield and attainable yield of soybean crop in Paraná State for the 2011/2012 harvesting season.

KEYWORDS: geotechnologies, water balance, remote sensing, design patterns, UML analysis.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| LISTA DE TABELAS | XI |
| LISTA DE FIGURAS | XII |
| LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS | XV |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 OBJETIVOS | 3 |
| 2.1 Objetivo geral | 3 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1 Atividade agrícola no Brasil | 4 |
| 3.2 Modelos de estimativa de produtividade agrícola | 6 |
| 3.2.1 Balanço hídrico do solo - Método de esgotamento FAO (BHFAO) | 7 |
| 3.2.2 Cálculo de produtividade – Modelo FAO | 8 |
| 3.3 Sensoriamento remoto orbital..... | 10 |
| 3.3.1 Sensor Modis | 10 |
| 3.3.2 Modelo ECMWF | 12 |
| 3.4 <i>Software</i> e geotecnologias | 13 |
| 3.4.1 <i>Software</i> relacionado à estimativa de produtividade agrícola | 13 |
| 3.4.2 Abstração de dados geoespaciais | 14 |
| 3.4.3 Linguagem Python | 15 |
| 3.4.4 Orientação a objetos | 15 |
| 3.4.5 Linguagem de modelagem unificada | 16 |
| 3.4.6 Padrões de projeto | 16 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS | 17 |
| 4.1 Procedimentos necessários à implementação do <i>software</i> | 17 |
| 4.1.1 Determinação das datas da cultura | 17 |
| 4.1.2 Balanço hídrico..... | 18 |
| 4.1.3 Estimativa de produtividade de culturas agrícolas | 22 |
| 4.1.4 <i>Software</i> | 23 |
| 4.1.4.1 Requisitos de <i>software</i> | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1.4.2 Python..... | 24 |
| 4.1.4.3 GDAL | 24 |
| 4.1.4.4 Qt Designer | 24 |
| 4.1.4.5 Eclipse..... | 24 |
| 4.1.4.6 Bibliotecas diversas..... | 25 |
| 4.1.4.7 Modelo visão e controle..... | 25 |
| 4.1.4.8 Padrões de projeto | 26 |
| 4.1.4.9 Análise orientada a objetos usando UML | 26 |
| 4.1.4.10 Estrutura de referência dos dados | 27 |
| 4.1.4.11 Padronização de ferramentas/operações..... | 27 |
| 4.2 Estudo de caso: aplicação do <i>software</i> a dados reais | 28 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 5.1 Análise UML..... | 34 |
| 5.2 <i>Crop-yield Modeling Platform</i> 1.0.1..... | 39 |
| 5.2.1 Tratamento de dados | 41 |
| 5.2.1.1 Interpoladores | 41 |
| 5.2.1.2 Filtro | 43 |
| 5.2.1.3 Estimativa de datas da cultura..... | 44 |
| 5.2.1.4 Distribuidor de índice..... | 46 |
| 5.2.1.5 Decendial para diário..... | 48 |
| 5.2.2 Balanço hídrico (FAO)..... | 49 |
| 5.2.2.1 Evapotranspiração (ET _c - ET _a) | 49 |
| 5.2.2.2 Capacidade hídrica (TAW/RAW) | 50 |
| 5.2.2.3 Valor de esgotamento (Dr) | 51 |
| 5.2.2.4 Fator de estresse hídrico da cultura (K _s) | 51 |
| 5.2.3 Estimativa de produtividade (FAO)..... | 52 |
| 5.2.3.1 Produtividade potencial bruta (PPB)..... | 52 |
| 5.2.3.2 Produtividade atingível (Y _a)..... | 53 |
| 5.2.4 Estatísticas | 54 |
| 5.3 Estudo de caso: uso do <i>software</i> em dados reais..... | 55 |
| 6 CONCLUSÕES | 74 |
| 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 75 |
| REFERÊNCIAS | 76 |

| | |
|---|-----------|
| APÊNDICE | 81 |
| APÊNDICE A – CyMP V1.0.1 E IMAGENS DO ESTUDO DE CASO | 82 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------------|---|----|
| Tabela 1 | Valores de referência para cultura da soja milho e trigo | 30 |
| Tabela 2 | Valores de referência ponderados por estágio fenológico da soja | 31 |
| Tabela 3 | Simulação de distribuição do índice Zr para a cultura da soja | 47 |
| Tabela 4 | Média de produtividade atingível (Ya) estimada, produtividade estimada por Richetti e produtividade oficial para o estado para a safra 2011/2012 | 72 |
| Tabela 5 | Estatísticas descritivas para a produtividade estimada, produtividade de campo e diferença entre a produtividade estimada e a produtividade de campo..... | 72 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------------|--|----|
| Figura 1 | Concentração das exportações por <i>commodities</i> - Projeção para 2024..... | 4 |
| Figura 2 | Produção total de grãos por cultura. | 5 |
| Figura 3 | Produção total de grãos, por unidade da federação..... | 6 |
| Figura 4 | Evolução da área e da produção. | 6 |
| Figura 5 | Perfil temporal do índice de vegetação EVI de culturas agrícolas..... | 17 |
| Figura 6 | Balanço hídrico do solo. | 19 |
| Figura 7 | Fluxograma do método do esgotamento da FAO (BHFAO). | 20 |
| Figura 8 | Fluxograma do método de estimativa de produtividade FAO..... | 22 |
| Figura 9 | Diagramas UML e diagramas selecionados..... | 27 |
| Figura 10 | Mapa de localização do Estado do Paraná, com suas 10 mesorregiões e 399 municípios. | 28 |
| Figura 11 | Área de soja - ano safra 2011/2012..... | 29 |
| Figura 12 | Valores de CAD (mm), para o estado do Paraná..... | 30 |
| Figura 13 | Localização do talhão A analisado..... | 32 |
| Figura 14 | Localização do talhão B analisado..... | 33 |
| Figura 15 | Diagrama de casos de uso. | 34 |
| Figura 16 | Diagrama de atividades de tratar dados, estimar balanço hídrico e estimar produtividade..... | 35 |
| Figura 17 | Diagrama de atividades do caso de uso gerar estatísticas descritivas..... | 36 |
| Figura 18 | Diagrama de arquitetura. | 36 |
| Figura 19 | Diagrama de pacotes..... | 37 |
| Figura 20 | Diagrama de classe do pacote <i>Beans</i> | 37 |
| Figura 21 | Diagrama de classes do pacote Função..... | 38 |
| Figura 22 | Diagrama de classes do pacote Controle. | 39 |
| Figura 23 | IDE Eclipse..... | 39 |
| Figura 24 | UI principal. | 40 |
| Figura 25 | UI de progresso. | 40 |
| Figura 26 | Menu Tratamento de dados..... | 41 |
| Figura 27 | UI Interpolador <i>shape</i> ECMWF para <i>raster</i> | 42 |
| Figura 28 | UI Interpolador raster pra raster..... | 43 |
| Figura 29 | UI Filtro Savitzky-golay. | 44 |
| Figura 30 | UI Estimativa de datas da cultura - aba 1. | 44 |
| Figura 31 | UI Estimativa de datas da cultura - aba 2. | 45 |
| Figura 32 | UI Estimativa de datas da cultura - aba 3. | 46 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Figura 33 | UI Distribuidor de índice por estágio fenológico. | 47 |
| Figura 34 | UI Decendial para diário. | 48 |
| Figura 35 | UI Nova série temporal. | 48 |
| Figura 36 | Menu Balanço Hídrico (FAO). | 49 |
| Figura 37 | UI Evapotranspiração da cultura, ETc. | 49 |
| Figura 38 | UI Evapotranspiração real, ETa. | 50 |
| Figura 39 | UI Capacidade hídrica (TAW/RAW). | 50 |
| Figura 40 | UI Valor de esgotamento (Dr). | 51 |
| Figura 41 | UI Fator de estresse hídrico da cultura (Ks). | 51 |
| Figura 42 | Menu Estimativa de produtividade (FAO). | 52 |
| Figura 43 | UI Produtividade potencial bruta (PPB). | 53 |
| Figura 44 | UI Produtividade atingível (Ya). | 54 |
| Figura 45 | Menu Estatísticas. | 54 |
| Figura 46 | UI Estatísticas descritivas (Perfil) - abas 1 e 2. | 54 |
| Figura 47 | UI Estatísticas descritivas - aba 3. | 55 |
| Figura 48 | Perfil de EVI sem filtro no talhão A. | 56 |
| Figura 49 | Perfil de EVI filtrado no talhão A. | 56 |
| Figura 50 | Perfis médios para talhões de soja 2011/2012. | 57 |
| Figura 51 | Estimativa de datas de semeadura (dias julianos) - safra 2011/2012. | 58 |
| Figura 52 | Estimativa de datas de máximo desenvolvimento vegetativo (dias julianos) - safra 2011/2012. | 58 |
| Figura 53 | Estimativa de datas de colheita (dias julianos) - safra 2011/2012. | 59 |
| Figura 54 | Estimativa de DS no talhão A analisado - safra 2011/2012. | 59 |
| Figura 55 | Estimativa de DMDV no talhão A analisado - safra 2011/2012. | 60 |
| Figura 56 | Estimativa de DC no talhão A analisado - safra 2011/2012. | 60 |
| Figura 57 | Perfil de Kc para o talhão A. | 61 |
| Figura 58 | Perfil de Zr para o talhão A. | 61 |
| Figura 59 | Imagem de ET0 25 km - 2011/01/01. | 62 |
| Figura 60 | Imagem de ET0 interpolada 250 m - 2011/01/01. | 63 |
| Figura 61 | ET0 e P média (mm) para o talhão A. | 63 |
| Figura 62 | T média (°C) para o talhão A. | 64 |
| Figura 63 | Perfil de ETc para o talhão A. | 64 |
| Figura 64 | Perfil TAW para o talhão A - analisado. | 65 |
| Figura 65 | Perfil RAW para o talhão A. | 66 |
| Figura 66 | Perfil Dr para o talhão A. | 66 |
| Figura 67 | Iteração do balanço hídrico para o talhão A. | 67 |
| Figura 68 | Perfil de Ks para o talhão A. | 67 |

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 69 | Ks para a safra 2011/2012 - dia 23/10/2011..... | 68 |
| Figura 70 | Ks para a safra 2011/2012 - dia 23/12/2011..... | 68 |
| Figura 71 | Perfil ETa para o talhão A..... | 69 |
| Figura 72 | Perfil PPB para o talhão A analisado. | 69 |
| Figura 73 | Perfil de Ya (kg/ha) para o talhão A analisado. | 70 |
| Figura 74 | Produtividade atingível do talhão A analisado - safra 2011/2012..... | 70 |
| Figura 75 | Produtividade atingível (kg/ha) - safra 2011/2012..... | 71 |
| Figura 76 | Histograma de frequência da produtividade atingível - safra 2011/2012..... | 71 |
| Figura 77 | Produtividade estimada, produtividade real e diferença entre a produtividade real e a produtividade estimada..... | 73 |

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

DC – Data de Colheita

DMDV – Data de Máximo Desenvolvimento Vegetativo

DOD – *Department of Defense*

DS – Data de Semeadura

ECMWF – *European Center for Medium-Range Weather Forecast*

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO – *Food and Agricultural Organization*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IV – Índice de Vegetação

JRC – *Joint Research Center*

MARS – *Monitoring Agriculture with Remote Sensing*

MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

SEAB – Secretaria de Agricultura e Abastecimento

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

UI – *User Interface*

1 INTRODUÇÃO

Em julho de 2014, foi divulgado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) que a produção de soja em grãos nos EUA, para o ano safra 2013/2014, seria de 103,42 milhões de toneladas e que o país teria estoques finais de 11,28 milhões de toneladas, sendo esse o maior estoque dos últimos 10 anos. Isso fez que a Bolsa de Mercadoria de Chicago (CBOT) sofresse uma desvalorização de 18%, em menos de duas semanas. Ao mesmo tempo, devido às intempéries climáticas ocorridas em estados produtores brasileiros no início de 2014, as importações chegaram 403,79 mil toneladas, valor 42% maior que todas as importações do ano de 2013 (CONAB, 2014). O USDA estima que a produção americana da safra 2015/2016 será de 104,78 milhões de toneladas e os estoques em 13,61 milhões de toneladas, os mais altos historicamente. Previsão que, somada à elevada produção da safra 2014/2015 colhida no Brasil e Argentina, segundo e terceiro maiores produtores mundiais, respectivamente, derrubou os preços internacionais (CONAB, 2015). Esse recente cenário demonstra o forte impacto e a importância que as estimativas ou previsões de produção e produtividade de uma cultura têm na especulação financeira global e nas tomadas de decisões estratégicas governamentais.

A implementação de técnicas de monitoramento de forma sistemática das áreas cultivadas e da produtividade das culturas agrícolas tornaram-se essenciais devido à extensão territorial do Brasil. Para tal, a geotecnologia tem se mostrado uma ferramenta muito útil, por auxiliar a construção de estimativas de safras agrícolas, principalmente ao diminuir o seu nível de subjetividade.

O uso de sensoriamento remoto tem sido associado com dados agrometeorológicos, pois um dos fatores que exerce maior influência na produtividade é a disponibilidade hídrica (RUDORFF; BATISTA, 1990; CORAL *et al.*, 2005). Embora haja várias metodologias, com relativo êxito na utilização de sensoriamento remoto para a atividade agrícola (ESQUERDO *et al.*, 2011; FERNANDES *et al.*, 2011; RICHETTI, 2015), elas envolvem tempo e custos, com grande repetitividade de processos para a execução em alto grau de detalhamento espacial, além da necessidade de desenvolver essas metodologias de forma sistemática, que permitam sua operacionalização de acordo com cronogramas oficiais (JOHANN, 2012).

Modelos agrometeorológicos foram aplicados em estudos para o estado do Paraná na estimativa da produtividade de soja, atualmente esses estudos são realizados em locais específicos e os resultados são pontuais utilizando dados de satélites como o ECMWF, em forma de estações virtuais pontuais (RICHETTI, 2015, JOHANN, 2012) ou estações meteorológicas (BERKA; RUDORFF; SHIMABUKURO, 2003 - no estado de São Paulo;

CORAL *et al.*, 2005; ARAÚJO; SOUZA; TSUKAHARA, 2011), sendo que estes dados, tratados como dados pontuais, são posteriormente interpolados para que haja a espacialização da estimativa.

A fim de contribuir com o aprimoramento desses modelos, reduzindo ao máximo processos repetitivos e permitindo a obtenção rápida de resultados, a proposta deste trabalho foi desenvolver um *software* capaz de realizar procedimentos de estimativa de produtividade de culturas agrícolas de forma automatizada, aproveitando a grande diversidade de dados de imagens de satélite em diferentes resoluções temporais e espaciais, sendo este aplicado pixel a pixel na área de interesse.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Elaborar e implementar um *software* que possibilite gerar, testar e calibrar modelos espacializados de estimativa de produtividade agrícola (pixel a pixel).

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos estão evidenciados como sendo elaborar e implementar ferramentas de *software* para:

- manipular dados matriciais (imagens) e vetoriais (arquivos *shape*) georreferenciados (filtro, interpolação e ajuste de resoluções temporais);
- estimar datas do ciclo de desenvolvimento das culturas agrícolas (semeadura, máximo desenvolvimento vegetativo e colheita);
- distribuir índices de cultura, segundo estádios fenológicos de forma temporal e espacial;
- estimar o fator de estresse hídrico da cultura pelo método FAO (ALLEN *et al.*, 1998);
- estimar a evapotranspiração real da cultura e determinar do balanço hídrico da cultura de interesse pelo método FAO (ALLEN *et al.*, 1998);
- implementar de forma genérica (utilizável a diversas culturas agrícolas) e automatizada a estimativa de produtividade pelo método FAO (ALLEN *et al.*, 1998).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Atividade agrícola no Brasil

O setor econômico considerado como mais importante do país é o setor primário, composto pela agricultura e pecuária extrativistas. O setor agrícola, além de fornecer matérias primas e alimento, essenciais para a sobrevivência humana, é responsável também por fontes de energias renováveis e responsáveis como parcela considerável em combustível, seja etanol ou biodiesel (CONAB, 2014).

O Brasil está entre as dez maiores economias do mundo e é o segundo maior fornecedor mundial de alimentos e produtos agrícolas. Segundo a *Organization for Economic Co-operation and Development* - OCDE e a *Food and Agriculture Organization* - FAO, o Brasil tornar-se-á o principal fornecedor, para atender à demanda mundial adicional. O crescimento da oferta deverá ser impulsionado por melhorias contínuas na produtividade, com o aumento do rendimento das culturas, conversão de pastagens em lavouras e a intensificação da produção de gado. Segundo projeções da OECD/FAO (2015), o Brasil deverá se tornar o maior exportador agropecuário do mundo em 2024 (Figura 1).

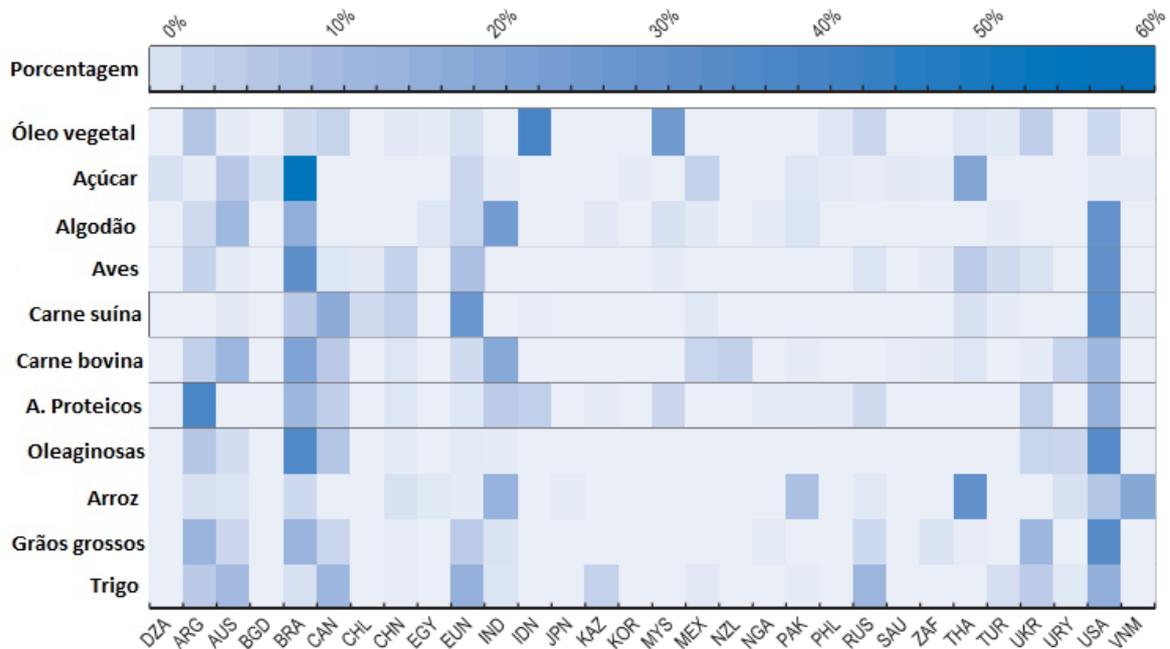


Figura 1 Concentração das exportações por *commodities* - Projeção para 2024.

Fonte: Adaptado de OECD/FAO (2015).

Nos últimos anos, a agricultura brasileira vem apresentando importantes transformações em sua estrutura. Ao longo dessas transformações, o governo vem sustentando uma ampla parcela da agricultura por meio de uma política direcionada ao desenvolvimento tecnológico, que pode ser facilmente compreendida quando se analisa a composição do agronegócio brasileiro (34% do PIB), distribuído entre agropecuária (30%), insumos agropecuários (6%), agroindústria (31%) e distribuição (33%) (ROCHA *et al.*, 2014).

A produção de grãos da safra de 2014/2015, estimada em 204,53 milhões de toneladas, é 5,6% superior à obtida na safra 2013/2014, quando atingiu 193,62 milhões de toneladas. Esse resultado representa um crescimento de 10,9 milhões de toneladas. O maior crescimento é observado na soja (9,92 milhões de toneladas), no milho segunda safra (978,5 mil toneladas) e no arroz (422,4 mil toneladas). Esse crescimento se deve às condições climáticas favoráveis e ao aumento na área plantada de soja e milho segunda safra (milho safrinha) (CONAB, 2015). Na Figura 2 é mostrada a produção de grãos por cultura, segundo o levantamento de junho/2015 feito pela Conab (2015).

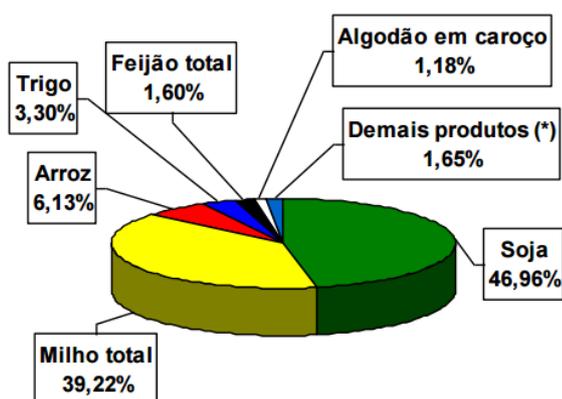


Figura 2 Produção total de grãos por cultura.

Fonte: Conab (2015).

Legenda: (*) Amendoim total, girassol, mamona, sorgo, aveia, canola, centeio, cevada e tritcale.

Os estados do Mato Grosso, Paraná e Rio Grande do Sul são atualmente os maiores produtores do Brasil e lideraram a produção total de grãos em 2015 (Figura 3) (CONAB, 2015).

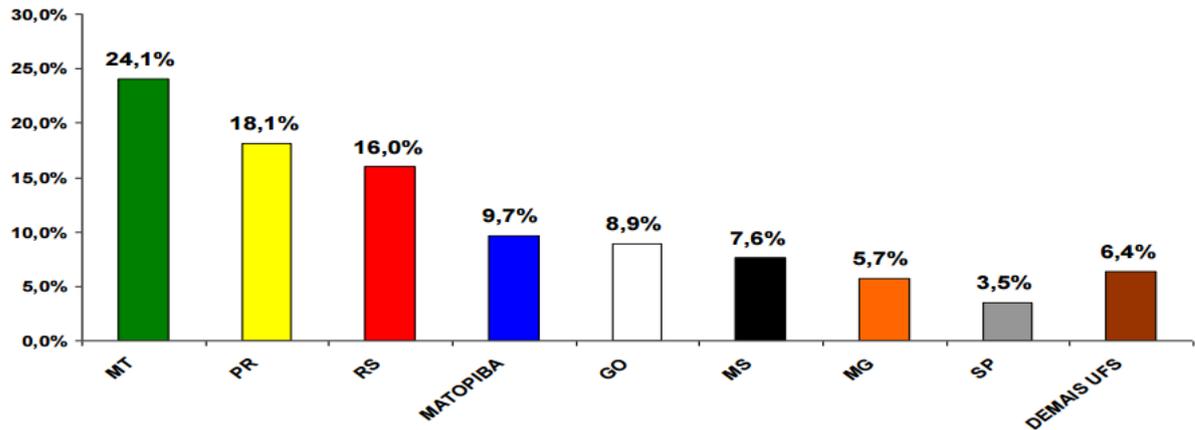


Figura 3 Produção total de grãos, por unidade da federação.

Fonte: Conab (2015).

É possível observar um grande aumento da produção em relação à área plantada no decorrer das safras, ou seja, um aumento de produtividade devido à melhora de tecnologia aplicada em todas as áreas da agricultura (Figura 4).

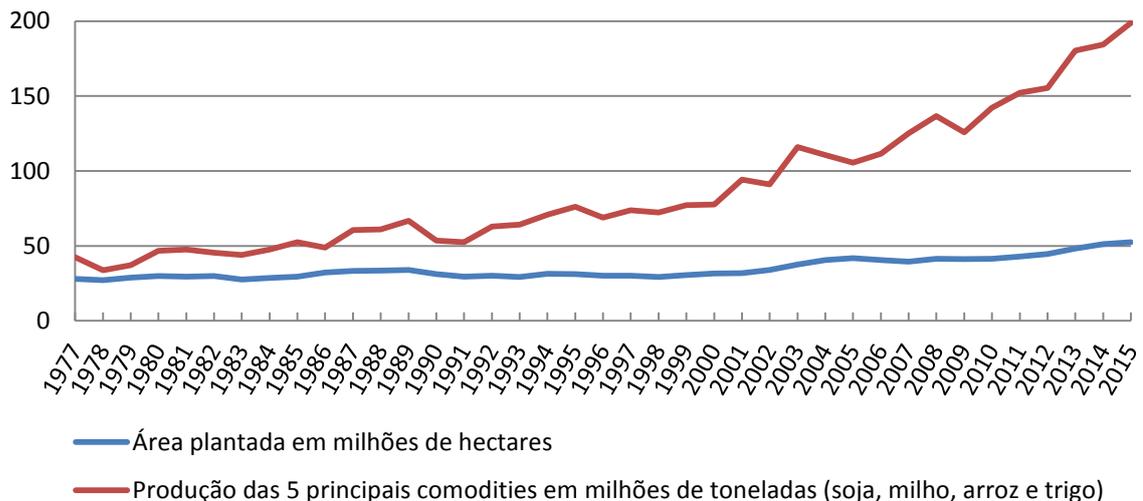


Figura 4 Evolução da área e da produção.

Fonte: Conab (2015).

3.2 Modelos de estimativa de produtividade agrícola

O principal objetivo do manejo da cultura agrícola em qualquer país é garantir recursos alimentares para a sua população. Vários fatores podem causar a escassez de alimentos, resultando em fome ou no desencadeamento de crises econômicas. A previsão da produção antes do tempo de colheita, envolvendo grandes regiões, é, dessa forma, uma

questão importante para muitos países, sendo de suma importância no norteamoento, gerenciamento e planejamento de políticas agrícolas, podendo ser realizada: diretamente, por meio de amostras coletadas antes da colheita, período de maturação de acordo com calendário; indiretamente, pela utilização de ferramentas, métodos e técnicas de previsão como modelos. No entanto, existe uma grande variedade de modelos e um número de problemas associados a eles (DELÉCOLLE *et al.*, 1992; SORIA-RUIZ; FERNANDEZ-ORDONEZ; GRANADOS-RAMIREZ, 2004).

Os estudos que buscam relacionar as interações entre o clima e a produtividade são geralmente desenvolvidos com o uso de modelos que procuram quantificar os efeitos das variações do clima sobre o comportamento vegetal (ROBERTSON, 1983). Acock e Acock (1991) e Delécolle *et al.* (1992) definem os estudos do efeito do clima na produtividade em três tipos de modelos: empírico-estatístico ou estatístico, matemático-mecanicista ou de crescimento e conceitual ou semiempírico.

Os modelos estatísticos utilizam relações empíricas em que os fatores ambientais são inseridos em equações de regressão para predizer a produtividade. Segundo Camargo e Pereira (1994), o modelo empírico-estatístico descreve as relações entre as variáveis, sem considerar os processos, apresentando muitas restrições para a extrapolação de resultados.

O modelo conceitual, o mais complexo, requer grande número de informações dos processos físicos e biológicos envolvidos, como o modelo de simulação de crescimento, maturação e produtividade em cítricos, proposto por Ben Mechlia e Carroll (1989).

O modelo matemático-mecanicista descreve matematicamente a casualidade ou a relação entre os processos envolvidos no ciclo da cultura, possuindo menores restrições, em relação à extrapolação de resultados, do que o empírico-estatístico e menores restrições em relação ao número de informações necessárias do que o conceitual.

3.2.1 Balanço hídrico do solo - Método de esgotamento FAO (BHFAO)

A determinação do balanço hídrico do solo é fundamental para o entendimento da relação solo-planta e permite determinar o nível de água no solo na zona de raízes em uma base temporal, diária, decendial ou mensal (STEDUTO *et al.*, 2012). Por meio dele, é possível determinar se a cultura está em estresse hídrico ou não e, dessa forma, se seu desenvolvimento será ou não prejudicado. Em casos extremos, a ausência da água necessária pode ocasionar a perda completa da safra.

Para a determinação do balanço hídrico, dados agrometeorológicos, dados da cultura e, também, dados do solo são utilizados, tendo como entradas: precipitação, irrigação e ascensão capilar; como saídas: evapotranspiração, escoamento superficial e percolação profunda. Assim, o balanço hídrico é a variação da água armazenada ou do esgotamento dessa água (RICHETTI, 2014).

Dentre as formas de determinar a necessidade hídrica da cultura, neste trabalho, apresenta-se para validação do *software* o cálculo do balanço hídrico apresentado por Allen *et al.* (1998), doravante BHFAO.

O método de esgotamento da FAO (BHFAO) vem sendo aplicado a estudos que utilizam dados agrometeorológicos para estimativas de produtividade. Richetti *et al.* (2014) geraram dados do balanço hídrico BHFAO para a cultura da soja no oeste do Paraná; Rojas (2007) utilizou a BHFAO para determinação de estresse hídrico e evapotranspiração real para a cultura do milho no Quênia. Maiores detalhes sobre o balanço hídrico FAO estarão presentes na seção materiais e métodos.

3.2.2 Cálculo de produtividade – Modelo FAO

O modelo utilizado pela FAO propõe uma equação simples em que a redução relativa da produtividade está relacionada com a correspondente redução relativa da evapotranspiração (ALLEN *et al.*, 1998). Especificamente, a resposta da produtividade é expressa pela Equação 1:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c}\right) \quad (1)$$

Em que:

Y_x e Y_a são os valores respectivos de produtividade potencial e produtividade atingível ($t\ ha^{-1}$);

ET_c e ET_a são os valores máximo e atual de evapotranspiração (mm);

K_y é o fator de produtividade que representa a sensibilidade da produtividade da cultura a estresses hídricos (adimensional).

O fator K_y captura a essência das complexas relações entre a produtividade de uma cultura e sua necessidade de água, em que diversos processos biológicos, químicos e físicos estão envolvidos (STEDUTO *et al.*, 2012). É o fator de sensibilidade ao estresse hídrico da cultura. Esses valores são específicos para cada cultura e variam de acordo com o estágio da cultura, sendo que:

- $K_y > 1$: a cultura é muito sensível, com reduções de produtividade proporcionais ao estresse hídrico sofrido;
- $K_y < 1$: a cultura é tolerante, recuperando-se parcialmente de estresses hídricos sofridos; sendo, assim, apresenta redução de produtividade menor, proporcionalmente à redução da água disponível;
- $K_y = 1$: a produtividade é diretamente proporcional ao déficit hídrico.

Para determinar o valor máximo de produtividade, também chamado de produção bruta de matéria seca da cultura padrão (Y_x , kg ha⁻¹), utiliza-se o método de Kassam (1977), que se baseia em níveis de radiação, temperatura e dias nublados e limpos. Determina-se a produtividade potencial pelo somatório das produtividades potenciais brutas (PPB , kg ha⁻¹) para a cultura (Equação 2).

$$Y_x = \sum PPB \quad (2)$$

A produtividade potencial bruta para a cultura é determinada pela produtividade potencial bruta para cultura padrão (PPB , kg ha⁻¹, Equação 3) e o índice de colheita (Cc , adimensional). Esse índice de colheita é responsável pela calibração do modelo na região em estudo.

$$PPB = 0,265455 * Cc * PPBp \quad (3)$$

O valor de $PPBp$ é a produtividade potencial bruta para dias nublados ($PPBn$, Equação 4) somada à produtividade potencial bruta para dias limpos ($PPBc$, Equação 5)

$$PPBn = (31,7 + 0,219 * Q_0) * ctn * 0,6 \quad (4)$$

$$PPBc = (107,2 + 0,36 * Q_0) * ctc * 0,6 \quad (5)$$

As produtividades potenciais são dependentes das correções de temperatura, para dias nublados (ctn , Equação 6) e para dias limpos (ctc , Equação 7), e da radiação no topo da atmosfera (Q_0 , Equação 8).

$$ctn = \begin{cases} 0,583 + 0,014 * T + 0,0013 * T^2 - 0,000037 * T^3, & \text{se } 16,5 \leq T \leq 37 \\ -0,0425 + 0,035 * T + 0,00325 * T^2 - 0,0000925 * T^3, & \text{se } 16,5 > T > 37 \end{cases} \quad (6)$$

$$ctc = \begin{cases} -0,0425 + 0,035 * T + 0,00325 * T^2 - 0,0000925 * T^3, & \text{se } 16,5 \leq T \leq 37 \\ -1,085 + 0,07 * T + 0,0065 * T^2 - 0,000185 * T^3, & \text{se } 16,5 > T > 37 \end{cases} \quad (7)$$

$$Q_0 = 97,3 * DR * \left(\frac{\pi}{180} * hn + \text{sen}(lat) * \text{sen}(\delta) \right) + \cos((\delta) + \cos(lat)) * \cos(\delta) * \text{sen}(hn) \quad (8)$$

Em que:

Q_0 = radiação no topo da atmosfera ($MJ m^{-2}$);

- DR = distância relativa Sol-Terra (UA, Equação 9);
 lat = latitude do local ($^{\circ}$);
 hn = ângulo horário ($^{\circ}$, Equação 10);
 δ = declinação solar ($^{\circ}$, Equação 11).

$$DR = 1 + 0,033 * \cos\left(\frac{360}{365 * \delta}\right) \quad (9)$$

$$hn(^{\circ}) = \text{acos}\left(-\tan((lat) * \tan(\delta)) * \frac{180}{\pi}\right) \quad (10)$$

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 * \text{sen}\left(\frac{360}{365} * (DJ - 80)\right) \quad (11)$$

Em que DJ é o dia Juliano.

3.3 Sensoriamento remoto orbital

Relacionar as variáveis agrometeorológicas com a produtividade de uma cultura não é tarefa fácil (ARAÚJO; SOUZA; TSUKAHARA, 2011). Segundo Rudorff e Batista (1990), parte das questões que dificultam o estudo dessa relação pode ser solucionada ao se incorporar informações espectrais de culturas agrícolas no modelo, que podem ser obtidas em imagens de satélites por sensoriamento remoto e são expressas como índice de vegetação. Resultados parecidos foram encontrados por Johann (2012), que realizou estimativas de produtividade de soja, obtidas por meio dos modelos espectrais e modelos agrometeorológicos, observando que o desempenho dos modelos melhora com a inserção de dados agrometeorológicos.

3.3.1 Sensor Modis

A técnica de sensoriamento remoto mostra-se eficiente no monitoramento da cobertura vegetal, evidenciando as variações temporais, detectando mudanças, a dinâmica sazonal e a fenologia (YU *et al.*, 2003). O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* - MODIS é um espectroradiômetro orbital a bordo das plataformas (satélites) Terra e Aqua, lançadas, respectivamente, em 1999 e 2002. Com 36 bandas, abrangendo as radiações do visível e do infravermelho, esse sensor permite a obtenção de dados relacionados à vegetação, cobertura terrestre, nuvens e aerossóis, incidência de

fogo, neve e cobertura de gelo no mar. As imagens permitem o monitoramento da cobertura global quase em tempo real, possuindo as seguintes resoluções: espacial (250, 500 e 1.000 m), espectral (545 a 14.385 nm) e temporal (de 1 a 2 dias) (JUSTICE *et al.*, 1998; TOWNSHEND; JUSTICE, 2002; COUTO JUNIOR *et al.*, 2011).

Índices de vegetação podem ser obtidos a partir de dados do sensor MODIS, disponibilizados gratuitamente na forma composições de imagens de 16 dias, com resolução espacial de 250 m. Entre os diversos produtos MODIS, são disponibilizados dois índices de vegetação: o *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e o *Enhanced Vegetation Index* - EVI (Índice de Realce da Vegetação) (JUNGES; ALVES; FONTANA, 2007).

Os índices de vegetação são baseados em valores digitais de intensidade, para avaliar a biomassa ou vigor vegetativo. São formados por várias combinações de valores espectrais que são somados, divididos ou multiplicados de modo a produzir um valor único que indica a quantidade de biomassa ou o vigor vegetativo dentro de um pixel. Altos valores do IV identificam pixels cobertos por proporções substanciais de vegetação saudável. Algumas relações entre bandas têm sido definidas, aplicando-se os conhecimentos de comportamento espectral da vegetação viva. No caso da vegetação viva, essa estratégia pode ser especialmente efetiva por causa da relação inversa entre a refletância nas regiões espectrais do vermelho e do infravermelho (CAMPBELL; WYNNE, 2011).

Os índices de vegetação minimizam as interferências relativas às variações provenientes do ângulo solar e dos efeitos atmosféricos, observados em dados multitemporais. Enquanto o NDVI é sensível à clorofila, o EVI é mais sensível às variações na resposta estrutural do dossel, incluindo o índice de área foliar (LAI), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (COUTO JUNIOR *et al.*, 2011, HUETE *et al.*, 2002)

O EVI foi desenvolvido para otimizar o sinal de resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de proporcionar o monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e da redução das influências atmosféricas (HUETE *et al.*, 1999). O EVI pode ser calculado por meio da Equação 12.

$$EVI = G \left(\frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + C1 * \rho_V - C2 * \rho_A + L} \right) \quad (12)$$

Em que, segundo Justice *et al.* (1998):

- ρ_{IVP} = reflectância no infravermelho próximo;
- ρ_V = reflectância no vermelho;
- ρ_A = reflectância no azul;
- $C1$ = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o vermelho (6);

- $C2$ = coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para o azul (7,5);
 L = fator de correção para a interferência do solo (1);
 G = fator de ganho (2,5).

O NDVI é um bom estimador de biomassa, sendo o índice mais utilizado em pesquisas que são relacionadas à dinâmica da cobertura vegetal, tais como o acompanhamento e a avaliação de rendimento de culturas na agricultura de precisão (PONTES, 2005; JUNGES; ALVES; FONTANA, 2007). O NDVI, proposto por Rouse *et al.* (1973), é dado pela Equação 13:

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_v}{\rho_{IVP} + \rho_v} \quad (13)$$

Em que:

- ρ_{IVP} = reflectância no infravermelho próximo;
 ρ_v = reflectância no vermelho.

Embora numericamente os valores do NDVI possam variar entre -1 e 1, a vegetação está associada aos valores positivos. Materiais que refletem mais intensamente na porção do vermelho em comparação com o infravermelho próximo (nuvens, água e neve) apresentam NDVI negativo (PONTES, 2005).

3.3.2 Modelo ECMWF

Grande parte dos estudos realizados obtêm informações de dados de superfície provenientes de estações meteorológicas. Porém, os órgãos responsáveis pela coleta e organização destes dados não os disponibilizam aos usuários em tempo real, numa quantidade (séries históricas) e formato que possam ser utilizados para análises espaciais (JOHANN, 2012).

Uma fonte alternativa para obtenção de informações de dados agrometeorológicos tem sido o modelo chamado de ECMWF, sigla do nome do Centro Europeu de Precisão Meteorológica de Médio-Alcance (*European Center for Medium-Range Weather Forecast - ECMWF*) que apresenta dados globais e gratuitos (ECMWF, 2015). O Centro Europeu de Precisão Meteorológica de Médio-Alcance é uma organização intergovernamental com 34 países e com base em Reading, no oeste de Londres – Reino Unido (WOODS, 2006).

O ECMWF apresenta variáveis agrometeorológicas importantes para o estudo e aplicação de modelos de estimativa agrícola, as variáveis disponíveis no sistema são: temperatura média (°C), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), precipitação total (somatório, mm), evapotranspiração total sobre a água (somatório, mm), evapotranspiração total sobre o solo (somatório, mm), evapotranspiração de Penman-

Monteith (somatório, mm), radiação global total (somatório, kJ.m^{-2}), espessura média de da neve (cm), espessura mínima de neve (cm), profundidade máxima de neve (cm), balanço hídrico climatológico (somatório, mm), velocidade média do vento (média, m.s^{-1}) e pressão de vapor de água médio (média, hPa). Além dos campos adicionais, como latitude, longitude, ano, mês, decêndio e data da aquisição dos dados (ECMWF, 2015).

Os dados são coletados por um sistema que engloba dados de estações meteorológicas espalhadas pelo mundo, radares meteorológicos, satélites, entre outras fontes. Esses dados são coletados a cada 6 horas. Os dados globais, numa resolução espacial de um grau de longitude e latitudes, são obtidos, processados, organizados em forma de uma grade de 25 km ($0,25^\circ$) e disponibilizados gratuitamente no *website* do *Joint Research Center* (Centro Comum de Investigação - JRC) em formato *shape*. Os dados, desde 1989, estão disponíveis no modelo ERA INTERIN, que é o modelo de reanálise em escala reduzida, isto é, com a grade de $0,25^\circ$ no lugar da antiga grade de um grau (JRC, 2015).

3.4 Software e geotecnologias

Para desenvolvimento das ferramentas e estruturas de *software* propostas, uma série de tecnologias foi estudada, visando garantir a agilidade nos processos de construção, maleabilidade nas estruturas, reusabilidade de códigos e facilidade de utilização e de manutenção.

3.4.1 Software relacionado à estimativa de produtividade agrícola

Na literatura específica é possível encontrar a citação de *softwares* desenvolvidos para a estimativa de produtividade.

A FAO criou um aplicativo chamado *Agrometshell* (AMS) para executar seu modelo, que foi desenvolvido para suportar os serviços meteorológicos nacionais permitindo configurar sistemas locais de alerta rápido. Para responder a este objetivo, o *software* FAO *Agrometshell* utiliza estações meteorológicas e, geralmente, é executado na escala nacional ou subnacional (GOMMES, 1993).

O GWSI desenvolvido por CCI baseia-se no mesmo algoritmo proposto pela FAO, mas segue uma abordagem espacial diferente, usando uma resolução espacial de $0,1$ grau e seu principal produto é o *Water Requirement Satisfaction Index* - WSI (Índice de Satisfação à Necessidade Hídrica), em escala mundial para as culturas alimentares mais

importantes. O principal objetivo do GWSI é identificar rapidamente pontos quentes de estresse das culturas, em escala global. Suas principais entradas são dados provindos do modelo ECMWF, coeficientes da cultura disponibilizados pela FAO e datas de plantio (REMBOLD *et al.*, 2006).

Esse *software*, embora utilize um modelo robusto, é simples em comparação com algoritmos muito mais sofisticados, utilizados na escala local e em situações de grande disponibilidade de dados, como por exemplo, o modelo de CGMS utilizado na Europa (SUPIT; VAN DER GOOT, 2003; BOUMAN *et al.*, 1996).

No Brasil o sistema PrevSafras, desenvolvido no projeto GeoSafras, realiza a estimativa da produtividade das culturas, por uma função de produção acoplada a um módulo de balanço hídrico, alimentado com dados meteorológicos diários (FARIA *et al.*, 2006). Para cálculo da produção regional, a área cultivada e a evolução da semeadura são ainda implementadas no PrevSafras com dados obtidos em levantamento de campo.

É possível observar, portanto, que existe uma demanda para um *software* que permita estimar a produtividade em larga escala, de forma robusta, espacial e em melhor resolução, tanto temporal quanto espacial, sem ter seus resultados dependentes da disponibilidade de estações meteorológicas, muitas vezes escassas, ou de calendários agrícolas, que fornecem informações regionais ou estaduais e não em uma boa resolução. Além disso, um *software* com boa escalabilidade, de fácil manutenção e entendimento, que seja aberto à comunidade também é uma necessidade.

3.4.2 Abstração de dados geoespaciais

A biblioteca *Geospatial Data Abstraction* - GDAL (Abstração de Dados Geoespaciais) consiste em uma biblioteca construída na linguagem C++ para tradução de formatos de dados matriciais (imagens, *raster*) e dados vetoriais (*shapefiles*) geoespaciais/georeferenciados. Abstraindo os mais diferentes formatos de arquivos matriciais e vetoriais possibilitando trabalhar com quaisquer tipos da mesma forma. Além disso, a GDAL fornece uma série de algoritmos de processamento em linha de comando, como quatro tipos de algoritmo para interpolação, algoritmos de proximidade, para composição de *raster* e outros (WARMERDAM, 2008).

A GDAL é distribuída pela *Open Source Geospatial Foundation* (Fundação de Código Aberto Geoespacial), sob a licença X/MIT estilo código aberto (*Open Source*). Possui distribuições disponíveis para as linguagens: Perl; Python; VB6 Bindings; Java; C# / .Net; Ruby; R.

As vantagens de se utilizar essa biblioteca em *Geographic Information Systems* - SIG's (Sistemas de Informação Geográfica) são a capacidade de abstração dos variados tipos e o fornecimento de um grande desempenho computacional.

3.4.3 Linguagem Python

Python é uma linguagem de alto nível, não tipada, orientada a objetos e livre para ser utilizada em fins comerciais. A linguagem Python foi concebida nos anos de 1980, mas só foi implementada em 1989 por Guido van Rossum nos Países Baixos, sua versão 2.0, criada em 2000, foi amplamente distribuída e sua utilização vem sendo também associada ao processamento de imagens para os mais diversos ramos da ciência justamente por suas características de ser orientada a objetos, não ter tipagem e permitir sobrecarga de operadores (VENNERS, 2003). A utilização da linguagem Python para SIG's não é recente, hoje ela é utilizada para SIG's mundialmente conhecidos como ArcGis e QGIS.

Modificações importantes foram feitas ao longo de sua evolução, que tornaram a linguagem limpa, de fácil aprendizado e de muito bom desempenho, apesar disso suas versões 2.6 e 2.7 ainda são as utilizadas na maioria dos SIG's atuais, por questões de compatibilidade e estabilidade, embora já esteja na versão 3.0, lançada em 2008.

Para este trabalho a versão Python utilizada será a 2.7, por fornecer maior compatibilidade com diversas distribuições de bibliotecas interessantes ao escopo do *software*.

3.4.4 Orientação a objetos

A metodologia de programação orientada a objetos (OO) é um paradigma que inclui um conjunto de mecanismos como heranças, hierarquias abstratas de tipos de dados (polimorfismo) e transmissão de dados para permitir a construção desse *design*. Cada tipo de dado é decorado com características e comportamentos próprios que consistem em atributos e procedimentos/funções. Esses dados podem herdar características por meio de uma hierarquia, dadas as particularidades e limitações de cada linguagem. A OO é diferentemente implementada em cada linguagem, porém, segue sempre os mesmos princípios conceituais (ABREU; GOULÃO; ESTEVES, 1995).

A modelagem orientada a objetos pode ser definida como uma técnica de projeto de *software*. Para essa técnica admite-se que se esteja interessado, principalmente, na clareza e organização do projeto, tendo por base uma representação clara e eficiente da aplicação, facilitando ao máximo o desenvolvimento e a manutenção do *software* (AGOSTINI; DECKER; SILVA, 2002; RUMBAUGH *et al.*, 1994).

3.4.5 Linguagem de modelagem unificada

A *Unified Modeling Language* - UML (Linguagem de Modelagem Unificada) é um dos métodos de modelagem mais utilizados no desenvolvimento de *software*. Ele inclui vários pontos de vista e diagramas para diferentes fins e uso. O UML também é utilizado para formar modelos conceituais de vários tipos de objetivos (LI; CHEN, 2009).

A UML é uma linguagem de modelagem gráfica de propósito geral. Os objetivos da UML incluem (LI; CHEN, 2009):

- especificar, visualizar, construir e documentar os artefatos de um sistema de *software*;
- entender, desenhar, pesquisar, configurar, manter e controlar informações sobre os sistemas de *software*;
- ser usado com todos os métodos de evolução, ciclos de vida, domínios de aplicativos e mídia.

3.4.6 Padrões de projeto

Os padrões de projeto tornam mais fácil reutilizar padrões bem sucedidos e arquiteturas. Utilizando técnicas comprovadas e conhecidas como padrões de projeto a aplicação se torna mais acessível aos novos desenvolvedores do sistema. Os padrões de projeto podem, até mesmo, melhorar a documentação e manutenção de sistemas existentes, fornecendo uma definição explícita de classe e objeto, interações e sua intenção subjacente (GAMMA *et al.*, 1994).

O movimento ao redor de padrões de projeto ganhou popularidade com o livro de Gamma *et al.* (1994). Os autores desse livro, Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson e John Vlissides são conhecidos como a "Gangue dos Quatro" (*Gang of Four*) ou simplesmente GoF.

Os padrões GoF são organizados em 3 famílias:

- padrões de criação: relacionados à criação de objetos;
- padrões estruturais: tratam das associações entre classes e objetos;
- padrões comportamentais: tratam das interações e divisões de responsabilidades entre as classes ou objetos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção foi dividida em: 1) procedimentos relativos ao *software* desenvolvido: *Crop-yield Modeling Platform* – CyMP (Plataforma de Modelagem para a Produtividade Agrícola); 2) procedimentos relativos ao estudo de caso, que é a aplicação do *software* desenvolvido a dados reais.

4.1 Procedimentos necessários à implementação do *software*

4.1.1 Determinação das datas da cultura

A função de determinação das Datas de Semeadura (DS), Datas de Máximo Desenvolvimento Vegetativo (DMDV) e Datas Colheita (DC) foi implementada para utilizar índices de vegetação (IV). Ao se analisar perfis temporais de IV, como o EVI, a função identifica as regiões de pico e os pontos de inflexão correspondentes às áreas nas quais se encontram as datas da cultura (GRZEGOZEWSKI *et al.*, 2013; JOHANN *et al.*, 2016), como exemplificado na Figura 5.

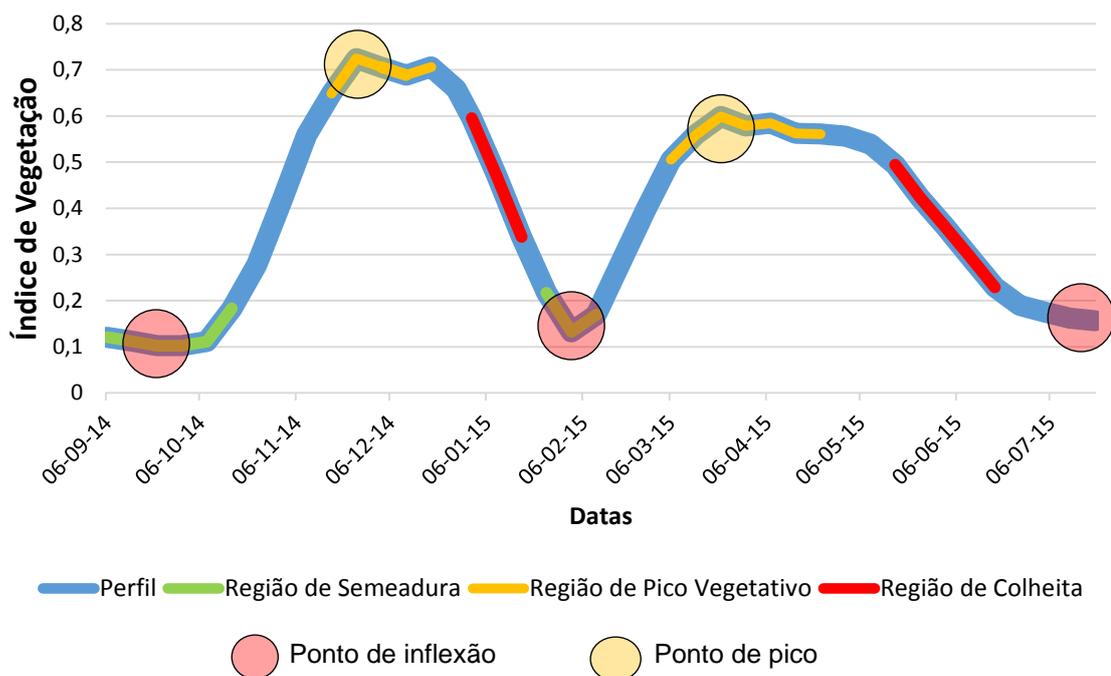


Figura 5 Perfil temporal do índice de vegetação EVI de culturas agrícolas.

Segundo Johann *et al.* (2016), as datas de semeadura, máximo desenvolvimento vegetativo e colheita podem ser identificadas com base nos pontos de pico e inflexão do perfil de EVI. Identificadas as datas dos pontos de pico e inflexão, é calculado um fator de calibragem, diminuindo o erro médio e estimando as datas de semeadura e colheita, utilizando os pontos de inflexão e pico; a DMDV fica sendo a própria data do pico no perfil de EVI. Dessa forma, cria-se um ajuste percentual em relação à diferença de tempo entre o ponto de inflexão e o pico no perfil que é somado ao ponto de inflexão (Equação 14).

$$D = I + Ca(P - I) \quad (14)$$

Em que:

D = data da cultura a ser estimada (data de semeadura ou colheita);

I = data do ponto de inflexão;

P = data do ponto de máximo desenvolvimento vegetativo;

Ca = coeficiente de ajuste percentual.

Normalmente, as séries temporais de índices de vegetação apresentam restrições ocasionadas por interferências atmosféricas, gerando ruídos. Para suavizar os ruídos foi implementado o filtro Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964; LUO *et al.*, 2005). Johann *et al.* (2016) testaram o filtro Savitzky-Golay para perfis de EVI Modis, em comparação com outros filtros espectrais e concluíram que este se mostrou o de melhor desempenho para eliminação ou minimização de valores anômalos (ruídos) na série temporal de EVI, permitindo melhoria na estimativa da Data de Semeadura (DS), Data de Máximo Desenvolvimento Vegetativo (DMDV) e Data de Colheita (DC) da soja no Paraná. Como coeficiente de ajuste percentual foram utilizados os mesmos ajustes identificados em Johann *et al.* (2016), de 3% de avanço na semeadura e 4% de recuo na semeadura. Johann *et al.* (2016) utilizaram no cálculo dos ajustes dados reais informados pelos produtores, referentes ao mesmo ano safra deste estudo.

4.1.2 Balanço hídrico

A determinação do balanço hídrico, pelo método de esgotamento da FAO (BHFAO, ALLEN *et al.*, 1998), foi implementada de forma a ser realizada com dados agrometeorológicos do ECMWF. Os dados do ECMWF (25 km) são interpolados para que sua resolução espacial corresponda à mesma resolução obtida no mapeamento e na estimativa de datas da cultura que, neste trabalho, foi 250 m por ser a resolução do Modis.

O método BHFAO (ALLEN *et al.*, 1998) determina o balanço hídrico pelo esgotamento hídrico na zona radicular. Assim, considera-se um sistema formado por determinada camada de solo e analisam-se as entradas e saídas de água do sistema.

Basicamente, o esgotamento hídrico é a quantidade de água que falta no solo para atingir-se à capacidade de campo (Equação 15). Portanto, é a diferença entre entradas e saídas. O valor resultante dessa diferença é a quantidade de água no sistema em determinado período de tempo, logo, quanto maior o esgotamento, maior o estresse hídrico.

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - P_i + RO_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (15)$$

Em que:

- $D_{r,i}$ = esgotamento na zona radicular no final do período i (mm);
- $D_{r,i-1}$ = esgotamento na zona radicular no período anterior $i-1$ (mm);
- P_i = precipitação no período i (mm);
- RO_i = escoamento superficial no tempo i (mm);
- I_i = irrigação no tempo i (mm);
- CR_i = ascensão capilar do solo no tempo i (mm);
- $ET_{c,i}$ = evapotranspiração da cultura no tempo i (mm);
- DP_i = percolação profunda para fora da zona radicular no tempo i (mm).

Na Figura 6 é possível observar uma ilustração das entradas (irrigação, precipitação e ascensão capilar) e das saídas (evapotranspiração da cultura, escoamento superficial e percolação profunda), bem como outros elementos (TAW, ARM e D_r que serão explicados em seguida) do balanço hídrico.

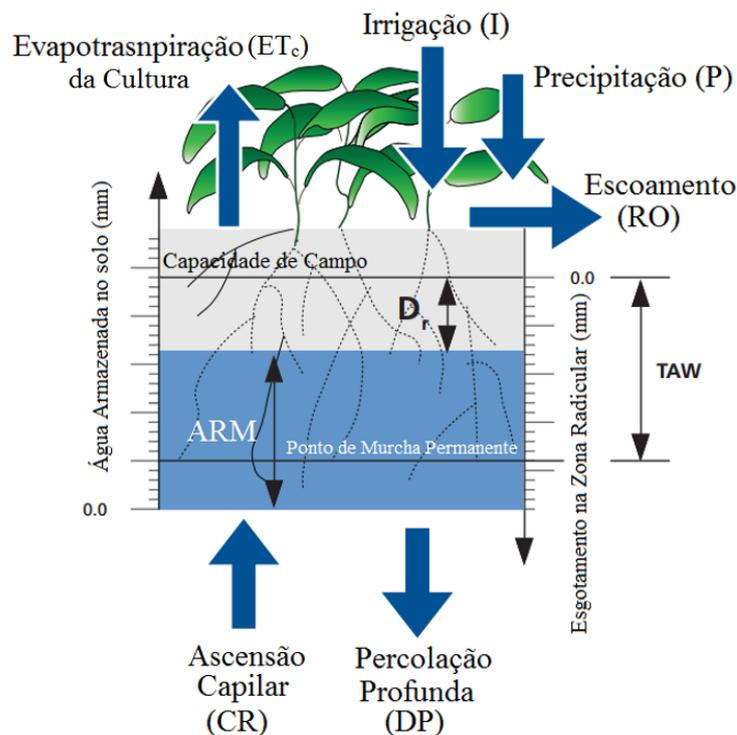


Figura 6 Balanço hídrico do solo.

Fonte: Adaptado de Steduto *et al.* (2012).

Os valores de ascensão capilar (CR), percolação profunda (DP), escoamento superficial (RO) e irrigação (I) são desconsiderados neste trabalho. Os primeiros: ascensão capilar, percolação profunda e escoamento superficial, pela impossibilidade de determinar tais valores; a irrigação, pois as áreas não possuem sistema de irrigação.

Os dados gerados a partir dos processos envolvidos no cálculo do balanço hídrico foram utilizados, posteriormente, para a estimativa de produtividade. O procedimento geral de determinação do balanço hídrico é mostrado por meio do fluxograma presente na Figura 7.

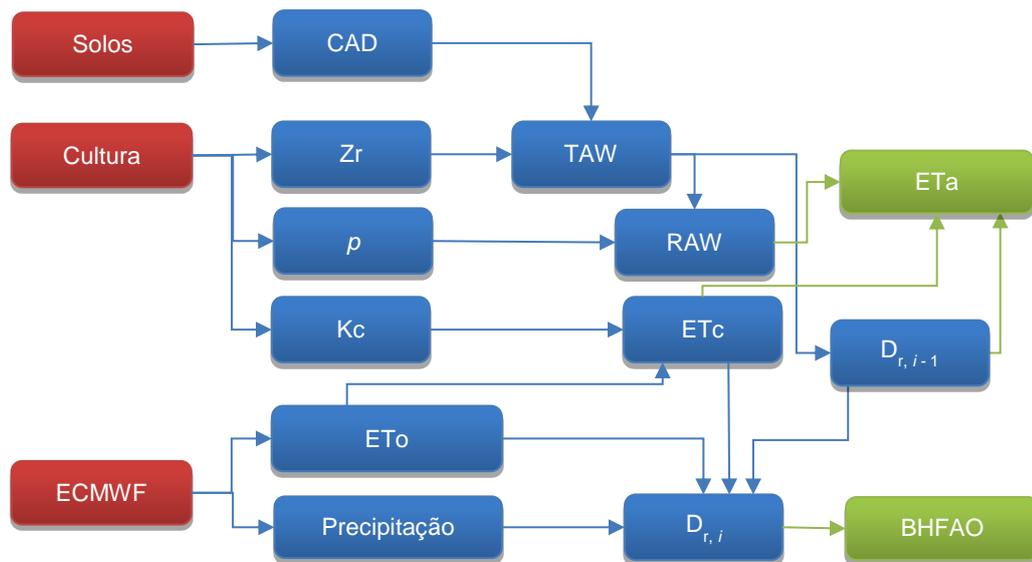


Figura 7 Fluxograma do método do esgotamento da FAO (BHFAO).

Fonte: Richetti *et al.* (2015).

Para determinar a evapotranspiração da cultura (ET_c), utilizam-se os valores de K_c , dependente da cultura e os valores de evapotranspiração de referência (ET_0) (Equação 16).

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (16)$$

Em que:

ET_c = evapotranspiração da cultura (mm);

K_c = fator da cultura (adimensional);

ET_0 = evapotranspiração de referência (mm).

Os valores da evapotranspiração real (ET_a) são difíceis de serem determinados. Entretanto, podem ser medidos utilizando-se um tanque classe A, ou por outras formas. As características climáticas de cada local influenciam nos valores médios da evapotranspiração real. Uma das formas de se calcular a ET_a é por meio do fator k_s de estresse hídrico da cultura (Equação 17). O fator k_s quantifica a redução da evapotranspiração, em relação à disponibilidade hídrica do solo (Equação 18).

$$ET_a = k_s ET_c \quad (17)$$

Em que:

ET_a = evapotranspiração real (mm);
 k_s = fator de estresse hídrico da cultura.

$$k_s = \begin{cases} 1 & \text{se } D_{r,i} < RAW \\ \frac{TAW - D_{r,i}}{TAW - RAW} & \text{se } D_{r,i} \geq RAW \end{cases} \quad (18)$$

Em que:

TAW = total de água disponível em determinada profundidade do solo (mm);
 RAW = água prontamente disponível para a cultura (mm).

O total de água disponível no solo (TAW) é a capacidade de armazenamento de água do solo multiplicada pela profundidade desejada, ou seja, a capacidade de água disponível (CAD) multiplicada pela profundidade efetiva das raízes da cultura (Equação 19).

$$TAW = CAD * Z_r \quad (19)$$

O valor do esgotamento ($D_{r,i}$) é dependente do valor da TAW e do valor do esgotamento anterior: $D_{r,i-1}$ (Equação 20).

$$D_{r,i} = \begin{cases} TAW, & \text{se } D_{r,i-1} > TAW. \\ D_{r,i-1}, & \text{se } D_{r,i-1} \leq TAW \end{cases} \quad (20)$$

A água prontamente disponível (RAW) representa a quantidade de água em que a planta não necessita nenhum esforço para sua utilização, e é calculada multiplicando-se o valor de TAW pelo coeficiente p , que é o coeficiente de esgotamento que representa essa dificuldade que a planta sofre, conforme a quantidade de água no solo não esteja prontamente disponível.

Com esses dados, foi possível calcular o esgotamento na zona radicular no final do tempo que, tendo todos os parâmetros necessários para a realização do cálculo do balanço hídrico para a cultura da soja (BHFAO, Equação 21), é o valor oposto do esgotamento na zona radicular no final do tempo.

$$BHFAO = D_{r,i} * (-1) \quad (21)$$

Assim, determina-se o BHFAO para o período determinado, no caso, o ciclo da cultura da soja.

Os fatores K_c , Z_r e o coeficiente p de cada cultura foram estimados para as principais culturas agrícolas do mundo pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998) e estão disponíveis na URL: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>.

4.1.3 Estimativa de produtividade de culturas agrícolas

Para o cálculo de produtividade das culturas agrícolas foram implementadas funções que permitem implementar estimativas de produtividade por meio de modelos agrometeorológicos.

As equações utilizadas no cálculo de Produtividade Potencial Bruta (PPB) e Produtividade Atingível (Y_a) estão presentes na sessão 3.2.2. O procedimento geral de determinação da produtividade é mostrado por meio do fluxograma da Figura 8.

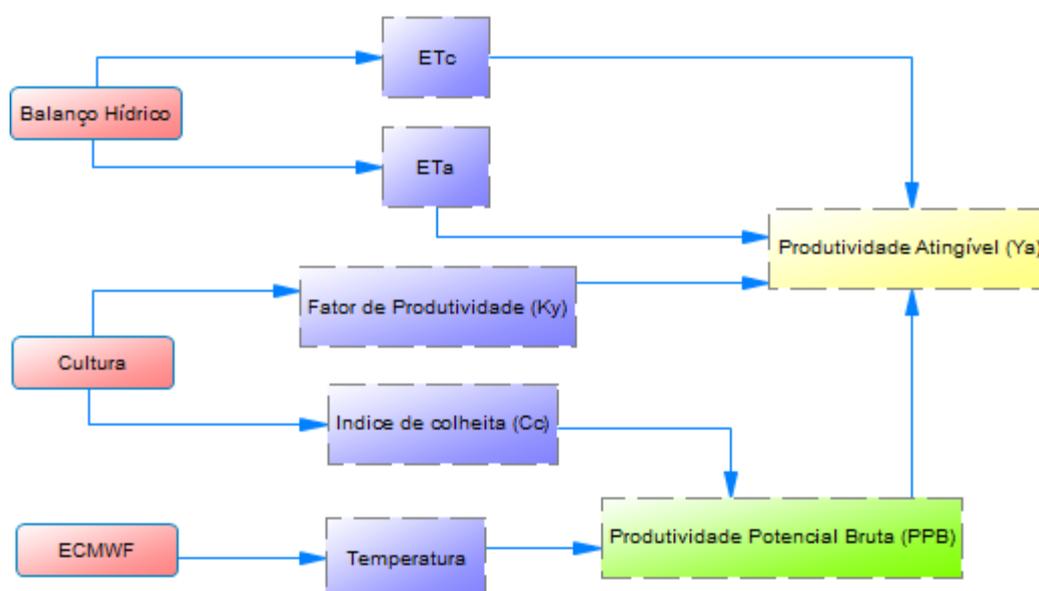


Figura 8 Fluxograma do método de estimativa de produtividade FAO.

Para determinar a radiação no topo da atmosfera (Q_0 , $MJ m^{-2}$, Equação 8), a distância relativa Sol-Terra (DR, UA, Equação 9), o ângulo horário (hn , $^\circ$, Equação 10) e a declinação solar (δ , $^\circ$, Equação 11) foi utilizada a latitude (lat , $^\circ$) de cada pixel e a data de cada imagem de temperatura média do ar ($^\circ C$), provindas do ECMWF.

Foram utilizados os seguintes dados de entrada das funções no modelo agrometeorológicos:

- dados agrometeorológicos:
 - precipitação pluvial (mm);
 - temperatura média do ar ($^\circ C$);

- evapotranspiração de referência (ET_0 , mm).
- características da cultura:
 - fases fenológicas das culturas;
 - profundidade do sistema radicular;
 - coeficientes k_c e k_y .
- dados de sensoriamento remoto:
 - EVI do satélite MODIS.
- características do solo:
 - tipos de solo;
 - capacidade de armazenamento de água do solo - CAD (mm);
 - balanço hídrico.
- características da produção:
 - índices de colheita de referência.

Como dados de saída obtiveram-se:

- produtividade estimada ($t\ ha^{-1}$);
- balanço hídrico (mm);
- evapotranspiração real (mm).

4.1.4 Software

O *software* proposto foi denominado *Crop-yield Modeling Platform* – CyMP (Plataforma de modelagem para a produtividade agrícola) e sua versão atual de desenvolvimento é a V1.0.1. As tecnologias e metodologias utilizadas para o desenvolvimento do *software* estão descritas nas subseções a seguir.

4.1.4.1 Requisitos de *software*

O CyMP V:1.0.1 possui apenas uma distribuição, compilada para rodar no sistema operacional *Windows 7* 64 bits. Dando continuidade ao desenvolvimento do *software*, as versões serão compiladas também para ambiente *Linux x64*.

As especificações mínimas de *hardware* variam muito, dependendo da área de estudo e das resoluções espaciais e temporais utilizadas. As especificações mínimas recomendadas para o estudo de caso descrito neste trabalho, possibilitando a conclusão de todos os procedimentos em menos de um dia, são:

- processador: 4 núcleos à 2.2Ghz;
- armazenamento: 50GB;
- velocidade de armazenamento (leitura e gravação) 200MB/s.

4.1.4.2 Python

A linguagem de programação utilizada para construir o *software* foi a Python V:2.7.9, por fornecer maior compatibilidade com diversas distribuições de bibliotecas interessantes ao escopo do *software*. A linguagem está disponível para *download* na URL: <https://www.python.org/downloads/release/python-279/>. Sua instalação é desnecessária para a execução do mesmo.

4.1.4.3 GDAL

A versão da biblioteca de tradução e abstração de rasters e vetores GDAL, utilizada para o CyMP V:1.0.1, é a distribuição gdal-201-1800-x64-core.msi, que está disponível para *download* na URL: <http://www.gisinternals.com/query.html?content=filelist&file=release-1800-x64-gdal-mapserver.zip>. Essa distribuição consiste em um instalador genérico para os componentes do núcleo (*core*) da GDAL. Este *core* é necessário para o funcionamento total do *software* CyMP V:1.0.1, pois ele fornece diversos recursos de linha de comando que são utilizados no *software* como interpolação e outros. As informações sobre a instalação e configuração estão no Apêndice A.

4.1.4.4 Qt Designer

Qt Designer é uma das ferramentas fornecidas pela Qt. E foi utilizada para construção das interfaces de usuário (*User Interface – UI*). Ela fornece um código único descritivo de interface. A versão é a 4.5.1, utilizada neste trabalho para desenhar as interfaces de usuário (QT, 2015). O Qt Designer é livre para aplicações não comercializadas. Sua instalação é desnecessária para a execução do *software*.

4.1.4.5 Eclipse

Eclipse é um *Integrated Development Environment - IDE* (Ambiente de Desenvolvimento Integrado), que fornece um ambiente para programação e diversos recursos e que foram aplicados para a otimização do processo de implementação e teste do *software* (ECLIPSE, 2015). A versão utilizada foi o Eclipse Luna. Sua instalação não é necessária para a execução do *software*.

4.1.4.6 Bibliotecas diversas

As bibliotecas utilizadas na construção do *software* CyMP V1.0.1, foram as seguintes:

- Pip: utilizada para fazer download e atualização de outras bibliotecas;
- GDAL-1.11.2-cp27-none-win_amd64: tradução e abstração de *rasters* e *layers*;
- lxml-3.4.2-cp27-none-win_amd64: utilizada para configurações de arquivos XML entre o core GDAL e o CyMP;
- numpy-1.9.2rc1+mkl-cp27-none-win_amd64: biblioteca de cálculos matemáticos;
- py2exe-0.6.10a1-cp27-none-win_amd64: gera a distribuição executável do programa;
- PyQt4-4.11.3-cp27-none-win_amd64: desenho e formatação de *User Interfaces* (UI), fornece uma série de recursos e componentes visuais para elaboração das telas de *software* para interação com o usuário;
- Fiona-1.5.0+gdal111-cp27-none-win_amd64: para leitura edição e gravação de arquivos *shape* (vetores) georreferenciados;
- rasterio-0.17.1+gdal111-cp27-none-win_amd64: para leitura edição e gravação de arquivos *rasters* (matrizes) georreferenciados.

4.1.4.7 Modelo visão e controle

O padrão *Model View Controller* - MVC (Modelo Visão e Controle) sugere dividir a arquitetura de *software* em componentes, tornando o desenvolvimento mais claro e enxuto e possibilitando, posteriormente, a reciclagem e manutenção do sistema com maior facilidade e segurança. Para que isso ocorra, deve haver independência dos componentes e ela só será atingida se houver uma organização do sistema em camadas para garantir a escalabilidade, eficiência e a reusabilidade (GAMMA *et al.*, 2000; BALTHAZAR *et al.*, 2007).

Para a organização e estrutura do *software*, foi utilizada arquitetura de desenvolvimento Modelo Visão Controle (MVC):

- Modelo: camada onde estão as implementações das funções objetivo do *software*, a implementação das regras de negócio bem como todas as ferramentas internas de acesso a dados e manipulação dos dados.
- Visão: camada na qual estão as implementações referentes às interfaces gráficas, ou interface de usuário, presentes no *software*. É nessa camada que as interações entre *software* e usuário acontecem.

- Controle: camada na qual estão as implementações relativas ao controle de fluxo de informação interna no *software*, é nesta camada que as informações são validadas, organizadas e, então, submetidas às funções.

4.1.4.8 Padrões de projeto

O padrão de projeto utilizado foi o Método Modelo (*Template Method*). Como um dos padrões comportamentais, esse método auxilia na definição de um algoritmo com partes do mesmo; é definido por métodos abstratos. As subclasses devem se responsabilizar pelas partes abstratas, deste algoritmo, que serão implementadas, possivelmente de várias formas, ou seja, cada subclasse irá implementar a sua necessidade e oferecer um comportamento concreto construindo todo o algoritmo. Maiores informações sobre estes e outros padrões de projeto podem ser encontradas em Gamma *et al.* (1994).

4.1.4.9 Análise orientada a objetos usando UML

A análise Orientada a Objetos (OO), com diagramas em UML, foi utilizada no decorrer de todo o desenvolvimento do *software*. Ela foi usada como ferramenta de elaboração, análise e documentação do *software*, permitindo que ele se torne padronizado e de fácil entendimento, pois se destina não só a esta, mas também a futuras pesquisas e implementações de modelos para a estimativa de produtividade agrícola.

O UML 2.2, conforme a OMG (2011), possui 14 tipos de diagramas, divididos em duas grandes categorias: estruturais e comportamentais. Sete tipos de diagramas representam informações estruturais, e os outros sete representam tipos gerais de comportamento, incluindo quatro diagramas em uma subcategoria que representam diferentes aspectos de interação (Figura 9).

A análise UML é extensa e sua complexidade pode tornar sua utilização completa um empecilho, quando se trata metodologias ágeis e *software* de estrutura relativamente simples, como o proposto. Portanto, foram selecionados diagramas de maior utilidade, dado o contexto atual de desenvolvimento.

Os diagramas selecionados para o estudo (destacados em verde na Figura 9) foram:

- diagrama de casos de uso: descreve as funcionalidades propostas para o novo sistema;
- diagrama de pacotes: descreve os pacotes ou pedaços do sistema divididos em agrupamentos lógicos mostrando as dependências entre eles;
- diagrama de classes: é uma representação da estrutura e relações entre classes;

- diagrama de atividades: mostra o fluxo de controle de uma atividade para outra.

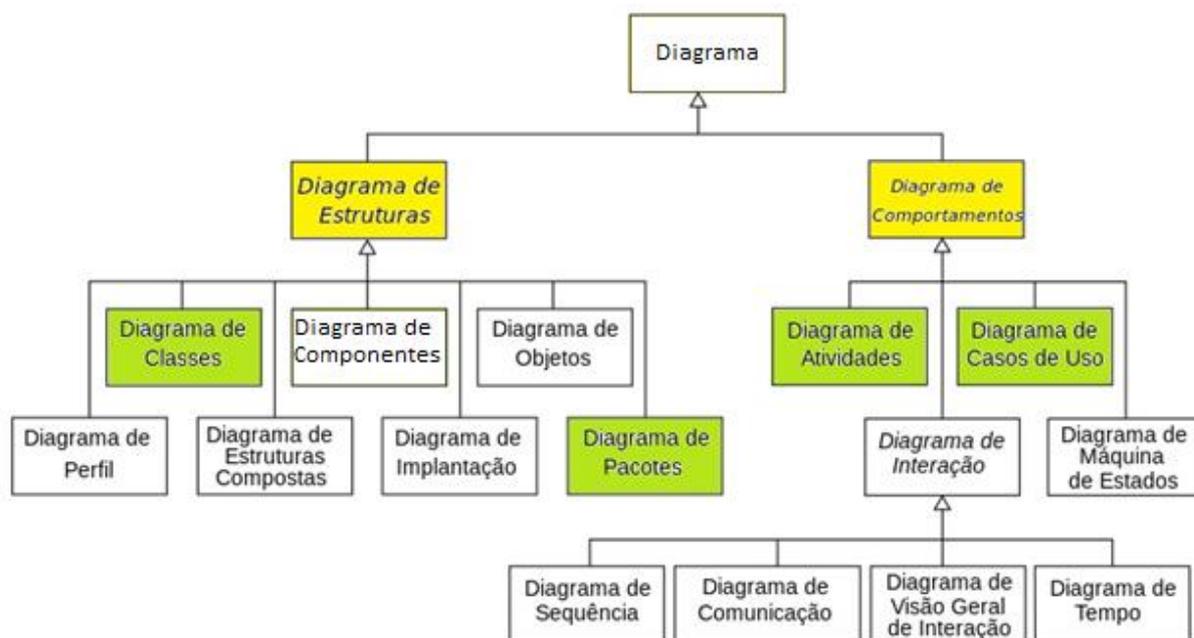


Figura 9 Diagramas UML e diagramas selecionados.

Fonte: Adaptado de OMG (2011).

4.1.4.10 Estrutura de referência dos dados

Para que o sistema tenha um nível de abstração que permita implementar diversos tipos de modelos, seja para balanço hídrico, como o que foi aplicado ou em modelos de previsão de safra completos, todas as entradas de dados do sistema são abstraídas e divididas em categorias. As categorias abstraídas são mostradas na seção resultados.

4.1.4.11 Padronização de ferramentas/operações

Todos os requisitos funcionais realizados pelo sistema, como interpolação e cálculos de BH, são abstraídos em uma estrutura padronizada de operações, de forma que possam ser implementados, sempre, novos recursos ao sistema, reaproveitando as funções existentes, para isso foi utilizado o padrão de projeto *Template Method*, padronizando as funções de forma que o sistema se torne modular.

4.2 Estudo de caso: aplicação do *software* a dados reais

De forma a testar e validar o *software* criado, o mesmo foi utilizado na estimativa de produtividade da cultura da soja, devido à importância deste cultivar no cenário agrícola nacional e sua grande representação no Estado do Paraná. O estudo de caso compreendeu os 399 municípios, localizados entre as longitudes 48°2'W e 54°38'W e latitudes 22°29'S e 26°43'S (Figura 10).

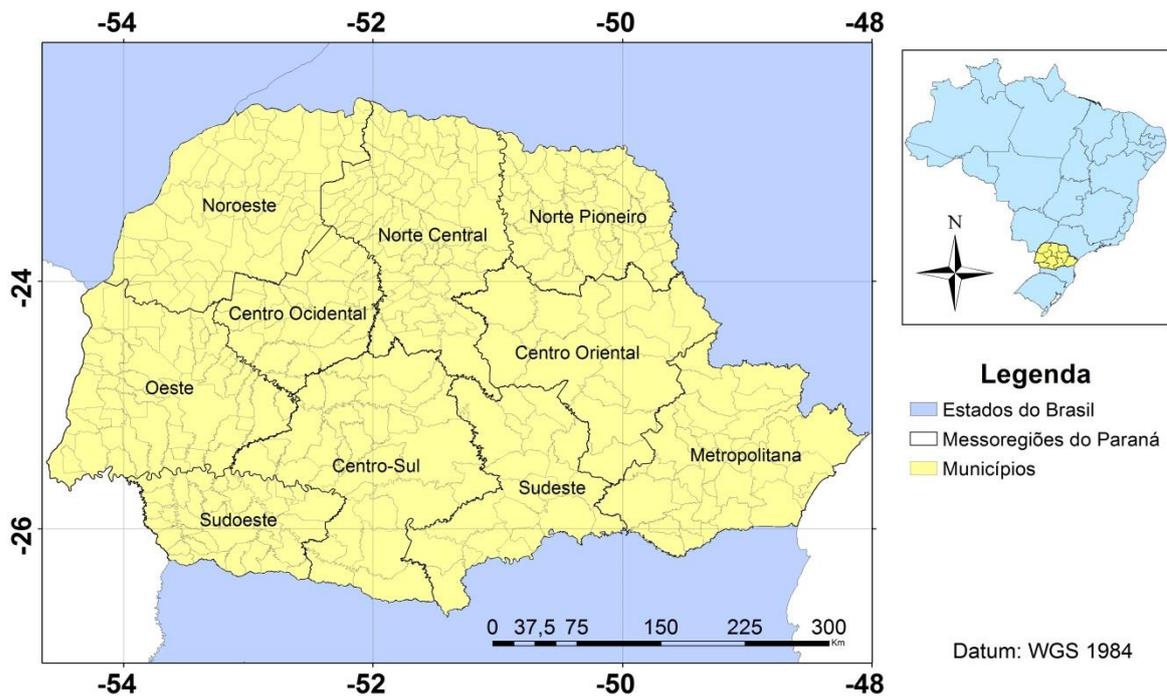


Figura 10 Mapa de localização do Estado do Paraná, com suas 10 mesorregiões e 399 municípios.

Para mapeamento dessa cultura, foi utilizada a máscara de soja do ano-safra 2011/2012, feita por Souza *et al.* (2015), obtida por sensoriamento remoto através de índices de vegetação EVI provindos do sensor MODIS (Figura 11).

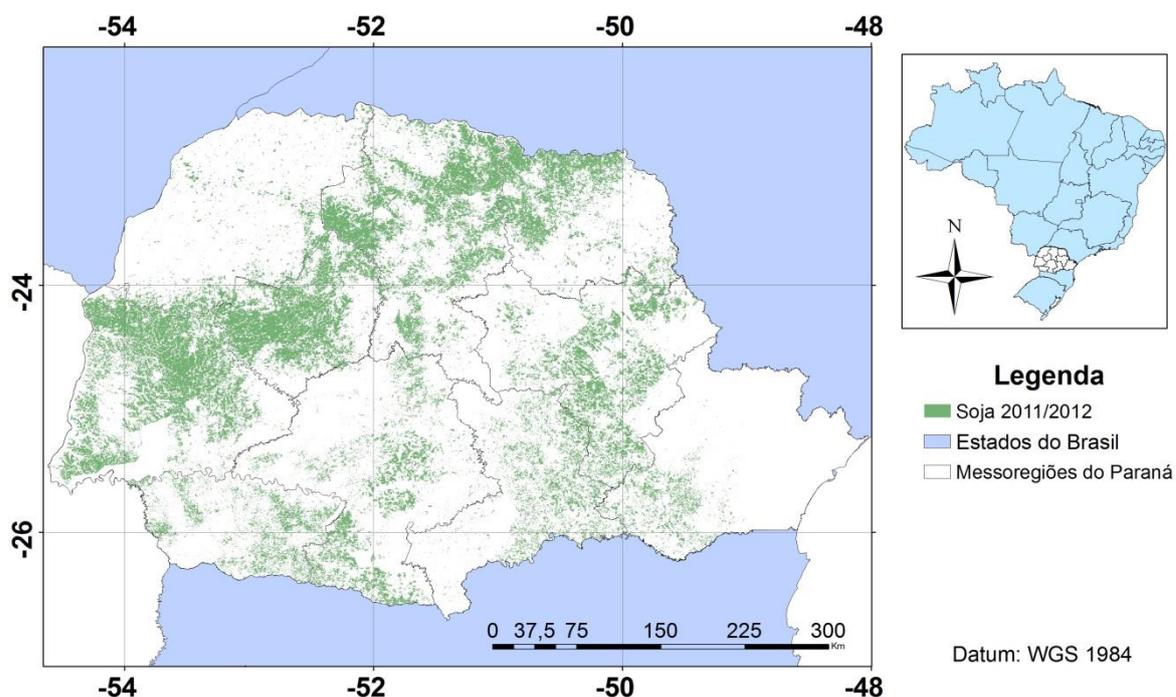


Figura 11 Área de soja - ano safra 2011/2012.

Para a identificação das datas da cultura (colheita e semeadura) foi utilizado o perfil do índice de EVI proveniente do sensor Modis, a bordo dos satélites Terra e Aqua (Resolução temporal de 8 dias e espacial de 250 m). Para remoção de ruídos nos perfis de EVI foi utilizado o filtro *Flat Smother Filter*, em conjunto com o filtro Savitzky-Golay, por apresentar melhor recuperação do perfil sem perder características importantes (PALOSCHI; CECHIM JR; JOHANN, 2015).

Johann *et al.* (2016) realizaram a estimativa das datas relativas à cultura de soja, comparando com dados reais informados pelos produtores do ano safra 2011/2012, e encontraram um ajuste de 3% para a semeadura (i.e., um atraso de 3%, em relação ao ponto de inflexão) e um ajuste de 4% para a colheita (i.e. um adiantamento de 4%, em relação ao ponto de inflexão). Para determinar os intervalos de semeadura, máximo desenvolvimento vegetativo e colheita foi feita uma análise gráfica de todos os pixels contidos nos talhões mapeados por Becker *et al.* (2015). Esses intervalos foram ajustados de forma incremental, a fim de minimizar erros de inclusão.

A capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) é o intervalo de umidade do solo entre a capacidade de campo (CC%) e o ponto de murcha permanente (PMP%), tais dados dependem do tipo de solo de cada região (RICHETTI *et al.*, 2014). Assim, foram utilizadas informações da capacidade de armazenamento de água do solo (CAD) geradas, conforme Embrapa (2004), a partir dos tipos de solo obtidos do Novo mapa de solos do Brasil (EMBRAPA, 2011), determinando assim o valor de CAD para o estado do Paraná (Figura 12).

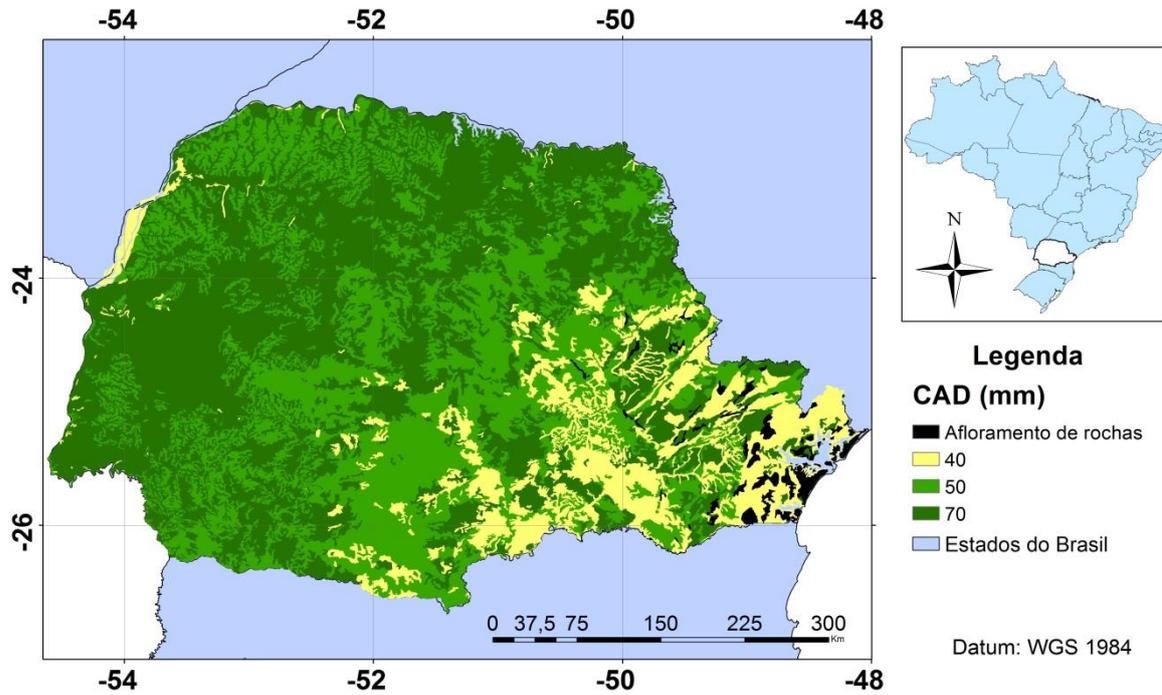


Figura 12 Valores de CAD (mm), para o estado do Paraná.

Os dados da cultura da soja, como profundidade do sistema radicular e coeficientes da cultura (k_c , k_y , p), foram obtidos do boletim nº 56 da FAO (ALLEN *et al.*, 1998).

A cultura da soja foi considerada como padrão conforme descrita e caracterizada por Allen *et al.* (1998) (Tabela 1). Os coeficientes da cultura (k_c) são apresentados para o estágio inicial, médio e final. Já os coeficientes de produtividade (k_y), de profundidade máxima das raízes (Z_r , em metros) e o fator de esgotamento p são fixos para todo ciclo da cultura. Esses valores foram fornecidos ao sistema da mesma forma, ou seja, tabelados.

Tabela 1 Valores de referência para cultura da soja milho e trigo

| Culturas | Kc inicial | Kc médio | Kc final | Zr max | Ky | p |
|-----------------|------------|----------|----------|--------|------|------|
| Soja | 0,40 | 1,15 | 0,50 | 0,60 | 0,80 | 0,50 |
| Milho | 0,40 | 1,20 | 0,60 | 1,00 | 0,80 | 0,55 |
| Trigo (Inverno) | 0,70 | 1,15 | 0,25 | 1,50 | 1,05 | 0,55 |

Fonte: Adaptado de Allen *et al.* (1998).

Os valores ponderados de Kc foram calculados conforme a Equação 22.

$$K_{ci} = K_{c,a} + \left[\frac{i - \sum(L_a)}{L_e} \right] (K_{cp} - K_{ca}) \quad (22)$$

Em que:

- i = número do dia do crescimento da cultura;
- K_{ci} = coeficiente da cultura no dia i ;
- L_a = tamanho do estágio atual/considerado (dias);

$\sum(L_a)$ = soma dos tamanhos de todos os estádios (dias);

L_a = tamanho do estádio anterior;

K_{cp} = coeficiente da cultura posterior à data;

K_{ca} = coeficiente da cultura anterior à data.

Os valores ponderados de Z_r foram calculados conforme a Equação 23.

$$Z_{r i} = Z_{r \min} + (Z_{r \max} - Z_{r \min}) \frac{J - J_{\text{inicio}}}{J_{\max} - J_{\text{inicio}}} \text{ for } J_{\text{inicio}} \leq J \leq J_{\max} \quad (23)$$

$$Z_{r i} = Z_{r \max} \text{ for } J \geq J_{\max}$$

Em que:

$Z_{r i}$ = profundidade efetiva de raiz no dia i (metros);

$Z_{r \min}$ = comprimento inicial da raiz (plantio);

$Z_{r \max}$ = máximo de profundidade efetiva de raiz (metade a estação);

J = dia do ano (1 a 366);

J_{inicio} = dia do ano correspondente ao plantio;

J_{\max} = dia do ano em que a raiz atinge a profundidade máxima.

Os valores ponderados de k_c e Z_r (Tabela 2) utilizados foram atribuídos de acordo com o estádio fenológico de desenvolvimento da cultura, conforme metodologia apresentada por Johann (2012). Dessa forma, considera-se que a cultura possui características diversas em suas diferentes fases, ou seja, a cultura possui maiores necessidades em seu florescimento do que em seu estabelecimento.

Tabela 2 Valores de referência ponderados por estádio fenológico da soja

| Cultura | Estádio de desenvolvimento da soja | | | | |
|---------|------------------------------------|------------|---------------|---------------------|----------|
| | Estabelecimento | Vegetativo | Florescimento | Enchimento de Grãos | Colheita |
| Kc | 0,40 | 0,80 | 1,15 | 0,80 | 0,50 |
| Zr | 0,10 | 0,25 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |

O K_c e o Z_r foram calculados temporalmente e espacialmente em toda a máscara de soja, utilizando as imagens de semeadura e colheita determinadas.

Os dados agrometeorológicos utilizados, obtidos do ECMWF, foram temperatura média (T , em C), precipitação (P , em mm) e evapotranspiração de referência (Et_0 em mm). As imagens de ECMWF disponíveis para *download* cobrem toda a América Central e a América do Sul. Elas foram recortadas para a área de estudo e interpoladas para uma grade de 250 m (para corresponder à matriz da imagem de mapeamento).

Em relação à distribuição diária, valores de soma são divididos pela quantidade de dias presentes no decêndio (ET_0 e P) e os valores de média (T) são replicados para cada dia.

Os dados foram submetidos ao *software* de forma a estimar o balanço hídrico (mm), a evapotranspiração da cultura (E_{tc} , mm), a evapotranspiração real (E_{ta} , mm), o coeficiente de estresse hídrico (K_s , adimensional), a produtividade potencial bruta (PPB_b , $kg\ ha^{-1}$) e a produtividade atingível (Y_a , $kg\ ha^{-1}$).

Para analisar os resultados do estudo de caso de forma mais explícita, um talhão de soja, abrangendo 29 pixels (181,25 hectares), foi selecionado e os resultados dos processos são mostrados, quando possível, para toda a área selecionada (o Estado do Paraná) ou quando não possível (devido ao número muito grande de imagens) é mostrado somente o perfil médio para os 29 pixels do talhão selecionado. A **Figura 13** contém a localização desse talhão. O primeiro talhão (Figura 13) será denominado neste trabalho como talhão A.

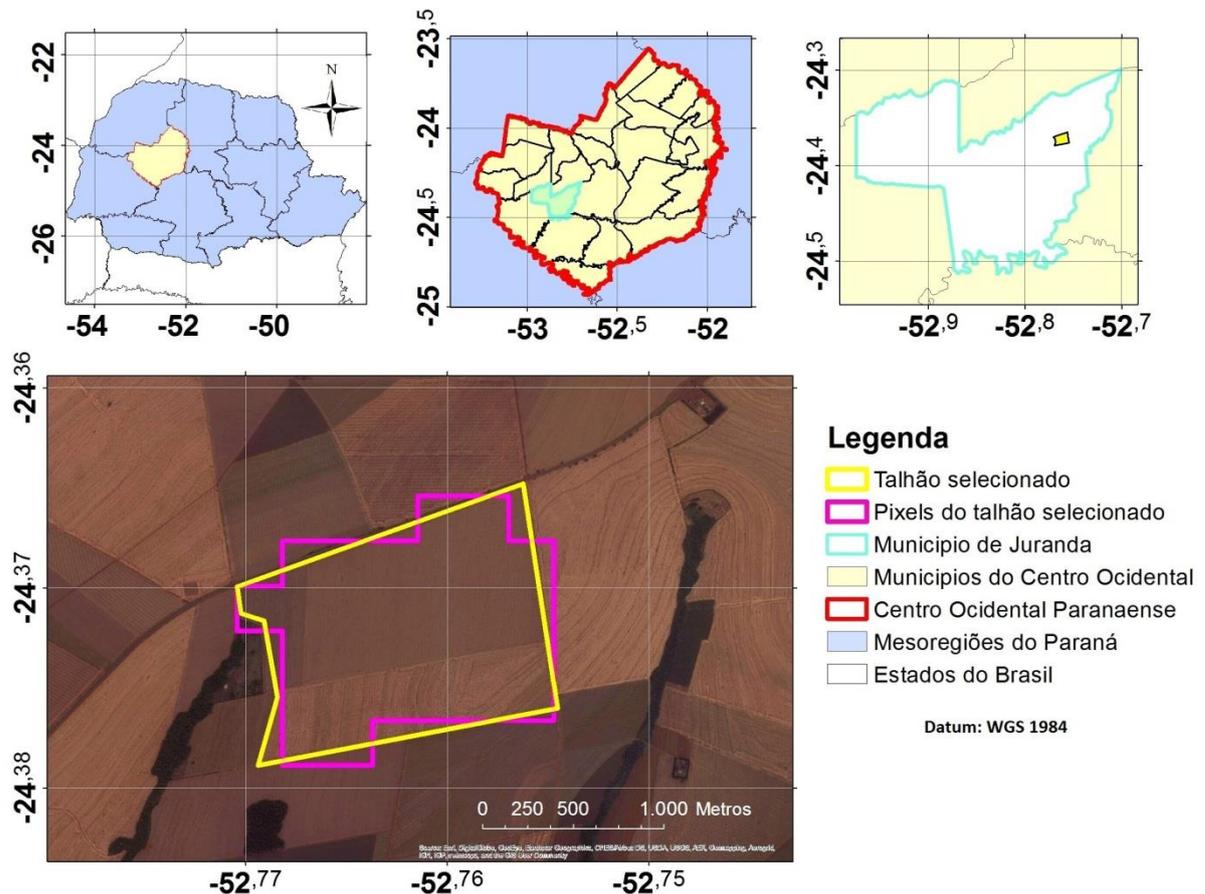


Figura 13 Localização do talhão A analisado.

A média de produtividade atingível foi comparada à produtividade atingível estimada por Richetti (2015) que realizou a estimativa com dados oficiais (CONAB, 2013).

Por fim a produtividade atingível foi interpolada e recortada para uma propriedade conhecida no município de Santa Tereza do Oeste – PR, denominado aqui de talhão B, a

fim de comparar a estimativa de produtividade com produtividade real. Esta área (Figura 14) é uma propriedade estudada pelos pesquisadores do Grupo de Geoestatística Aplicada (GGEA), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, há cerca de 10 anos. Foram coletados 21 pontos ao longo da área, interpolados para 25 metros e comparados com a grade de produtividade atingível estimada, também interpolada para 25 metros.

Na Figura 14 é possível identificar a localização do talhão B, dos pontos de coleta e também a localização dos pixels próximos, referentes à imagem de produtividade atingível em sua resolução de 250 metros (antes da interpolação).

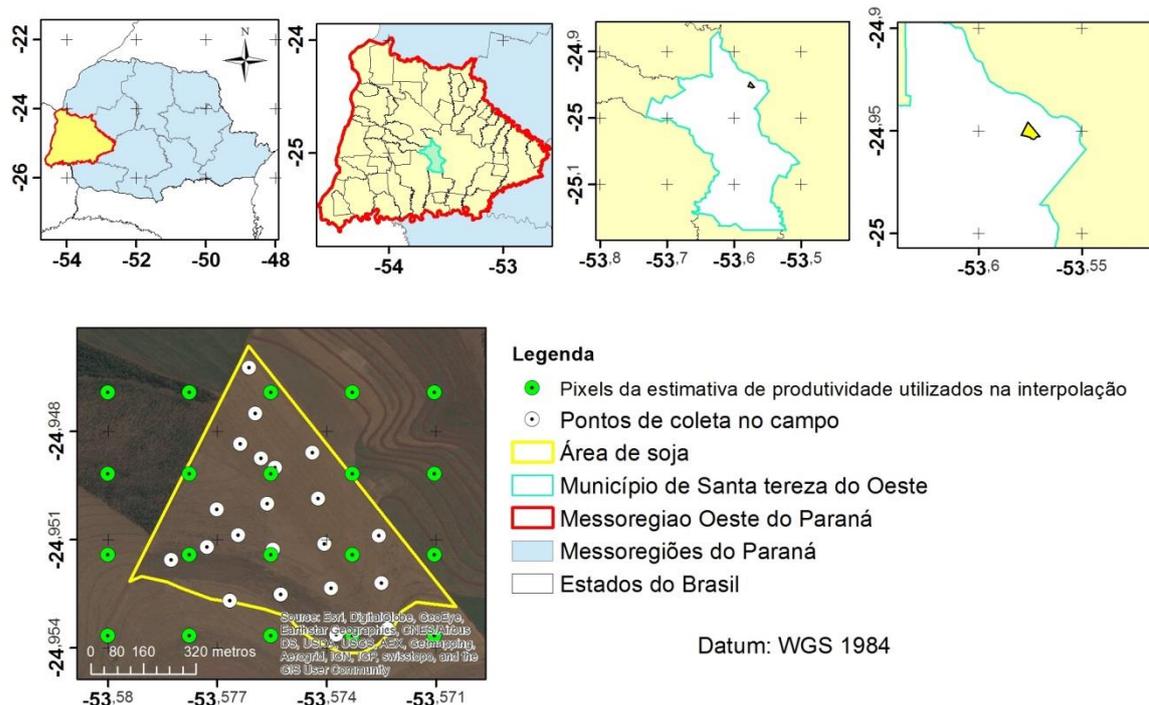


Figura 14 Localização do talhão B analisado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise UML

Para início do desenvolvimento do *software* foi utilizada a análise UML. Primeiramente, utilizando-se do diagrama de casos de uso, para identificar os atores e as funcionalidades principais do sistema (Figura 15).

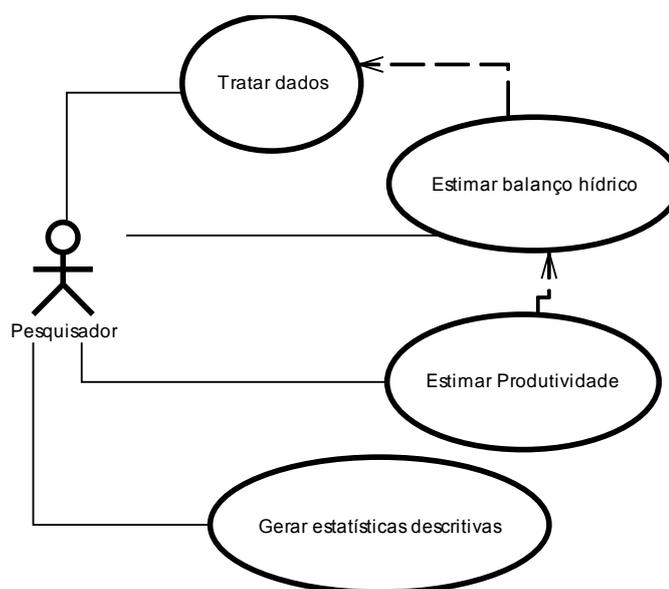


Figura 15 Diagrama de casos de uso.

O caso de uso “Tratar dados” é utilizado quando o pesquisador acessa o sistema para realizar processos de tratamentos como filtros espectrais e interpolações; o caso de uso “Estimar balanço hídrico” ocorre quando o pesquisador acessa o sistema com os dados necessários já tratados para realizar a estimativa de balanço hídrico; o caso de uso “Estimar produtividade” é utilizado quando o pesquisador acessa o sistema com os dados necessários para realizar as estimativas de produtividade; o caso “Gerar estatísticas descritivas” é utilizado quando o pesquisador acessa o sistema com dados e obtém estatísticas descritivas dos dados inseridos. É possível observar também uma dependência (seta pontilhada) entre os casos de uso: Tratar dados, Estimar balanço hídrico e Estimar produtividade.

Para analisar mais claramente os procedimentos realizados pelo pesquisador no *software* CyMP, foi construído o Diagrama de Atividades, o qual descreve os procedimentos desde o caso de uso Tratar dados até o seu último dependente: Estimar produtividade (Figura 16).



Figura 16 Diagrama de atividades de tratar dados, estimar balanço hídrico e estimar produtividade.

É possível identificar uma alta dependência e um certo grau de complexidade entre os casos de uso no diagrama (Figura 16). Também é possível observar que a maioria das funções trabalha com dados seriais, tanto nos dados de entrada quanto nos dados de saída, o que possibilita abstrações e generalizações tanto nas estruturas dos dados utilizados pelo sistema quanto na estrutura das próprias funções.

Foram inseridos no diagrama de atividades duas funções em particular: “Distribuir índices diários” e “Decendial/Diário”, esses procedimentos foram inseridos para facilitar cálculos em processos posteriores, trazendo as resoluções para base diária, e para minimizar ao máximo perdas provenientes de arredondamentos nas escalas temporais.

O diagrama de atividade referente ao caso de uso “Gerar Estatísticas Descritivas” é relativamente simples e não é depende dos outros casos de uso, podendo ser aplicado a quaisquer dados seriais (Figura 17). As estatísticas implementadas foram as descritivas de média, desvio padrão, coeficiente de variação e mediana e também outras métricas, amplitude (máximo menos mínimo), soma, mínimo e máximo.

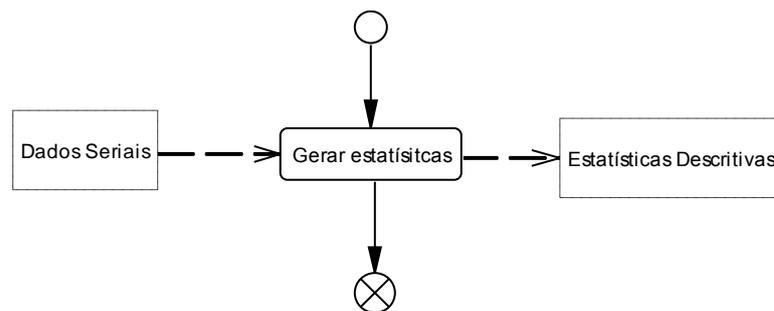


Figura 17 Diagrama de atividades do caso de uso gerar estatísticas descritivas.

Toda a arquitetura do sistema foi implementada segundo o modelo arquitetural MVC, dividido em camadas (Figura 18). Detalhes de cada camada podem ser vistos no diagrama de pacotes em seguida.



Figura 18 Diagrama de arquitetura.

A partir da arquitetura proposta foi criado um diagrama de pacotes (Figura 19), de forma a organizar e alocar todas as funcionalidades necessárias ao sistema.

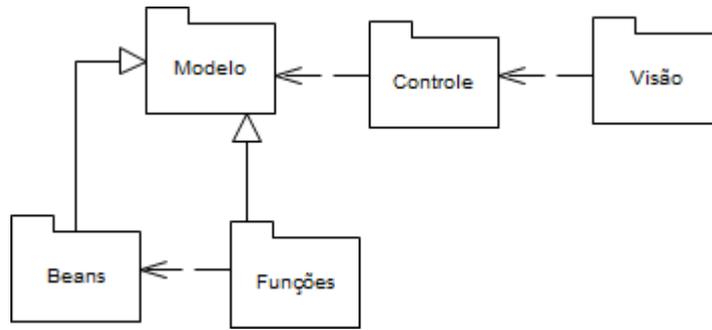


Figura 19 Diagrama de pacotes.

Analisando-se as entradas e saídas de dados do sistema (**Figura 16**), é possível realizar uma abstração dos tipos de dados os quais o sistema tratará, bem como definir os limites de atuação (escopo). Isso foi feito por meio de um diagrama de classes (Figura 20). A abstração dos dados é definida na camada Modelo, e foi implementada no pacote *Beans*.

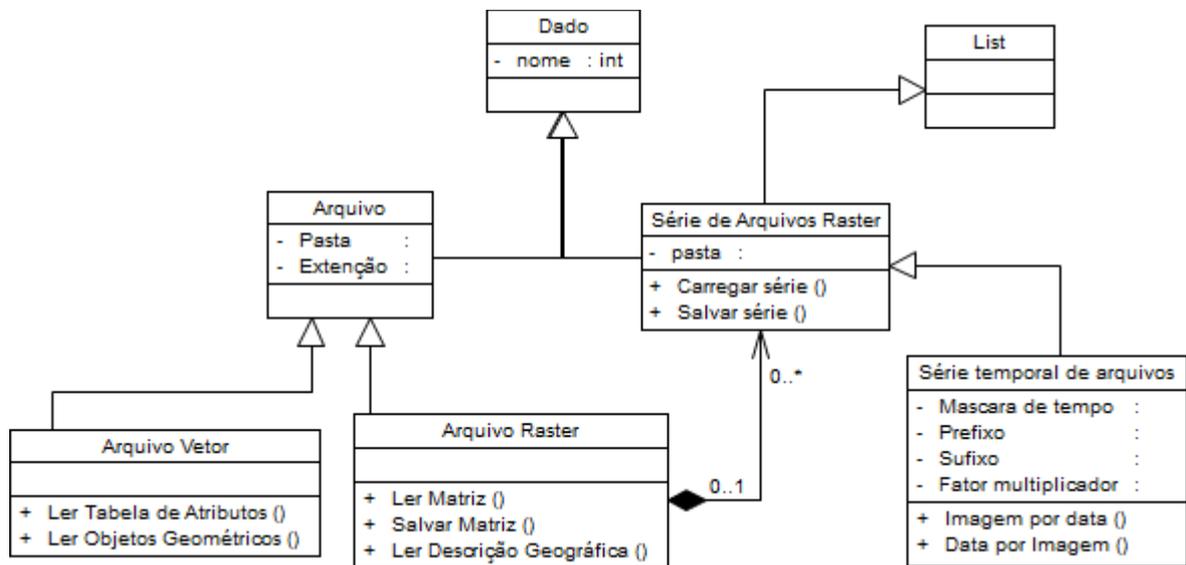


Figura 20 Diagrama de classe do pacote *Beans*.

No diagrama de classes do pacote *Beans* é possível identificar os métodos de manipulação de dados (ler, salvar etc.), dentro das classes abstraídas (Arquivo vetor, Arquivo raster e Série de arquivos raster), que são fornecidos às funções e, dessa forma, compreender como as funções terão acesso aos dados. Também é visto no diagrama de classe do pacote *Beans* que a classe Série temporal de arquivos raster é um aglomerado de Arquivos raster, além de toda a estrutura de herança montada, o que deixa a estrutura mais organizada, de fácil manutenção e economiza tempo de implementação.

Já no pacote função, é definida uma classe abstrata chamada Função abstrata, que, por meio do padrão de projeto *Template Method*, exigirá que as classes filhas (Função) implementem seus métodos. O *Template Method* foi implementado de tal forma que quando a classe de implementação Função é iniciada são carregados metadados sobre os

parâmetros de entrada e saída da função e quando a função é executada os parâmetros (dados) são carregados de acordo com seus tipos (vetor, *raster*, série de *raster*, etc.), depois de os parâmetros serem carregados é chamada a função Executar função, implementada na classe filha (Figura 21).

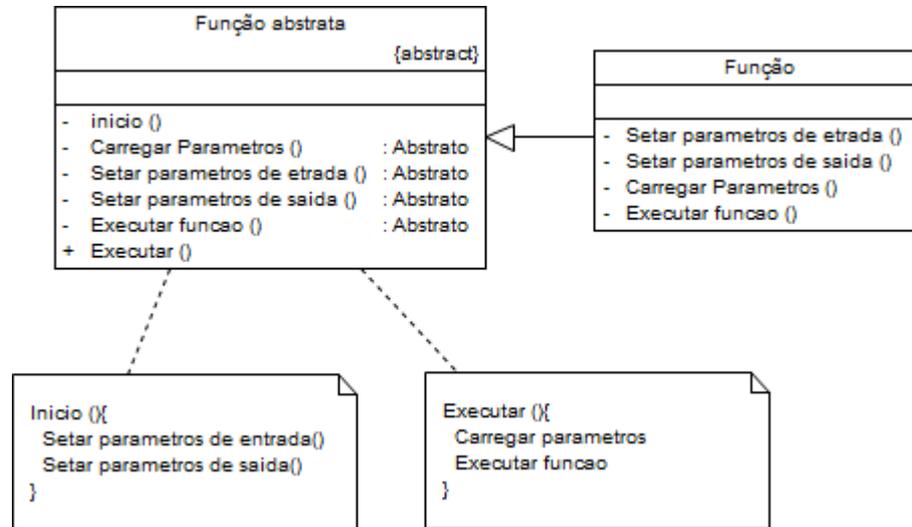


Figura 21 Diagrama de classes do pacote Função.

O método Início é privado e é executado quando o objeto é inicializado, já o método executar é público e é por meio deste que a função será executada. Dessa forma, a classe filha (Função) não tem métodos públicos e todas as funções implementadas no sistema (filtros, interpoladores, cálculos de balanço hídrico, cálculos de produtividade, etc.) seguem essa arquitetura (Figura 21). Estas funções são implementadas no pacote Função que pertence a camada de Modelo (Figura 19).

Na camada de Controle temos os objetos que as ações das interfaces, cada janela (User interface - UI) na camada de Modelo possui um controlador respectivo. O controlador, assim como as funções, foi modelado segundo o padrão de projeto *Template Method*.

Na classe Controlador abstrato, os métodos públicos (+) são ações dos botões da UI, os métodos privados são chamados pela Ação OK (quando se pressiona o botão OK na interface). Os métodos Abstratos (Validar formulário e Executar função) são implementados em cada controlador para cada UI. Essa estrutura é observada na Figura 22.

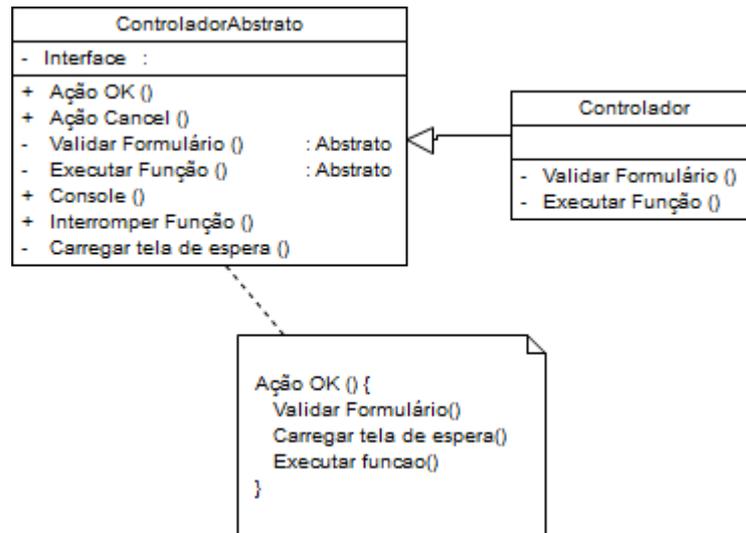


Figura 22 Diagrama de classes do pacote Controle.

5.2 Crop-yield Modeling Platform 1.0.1

O software CyMP V1.0.1 (APÊNDICE A) foi implementado de acordo com as análises UML, utilizando a IDE de desenvolvimento Eclipse (Figura 23), a IDE de desenho QT Designer e a linguagem de programação Python.

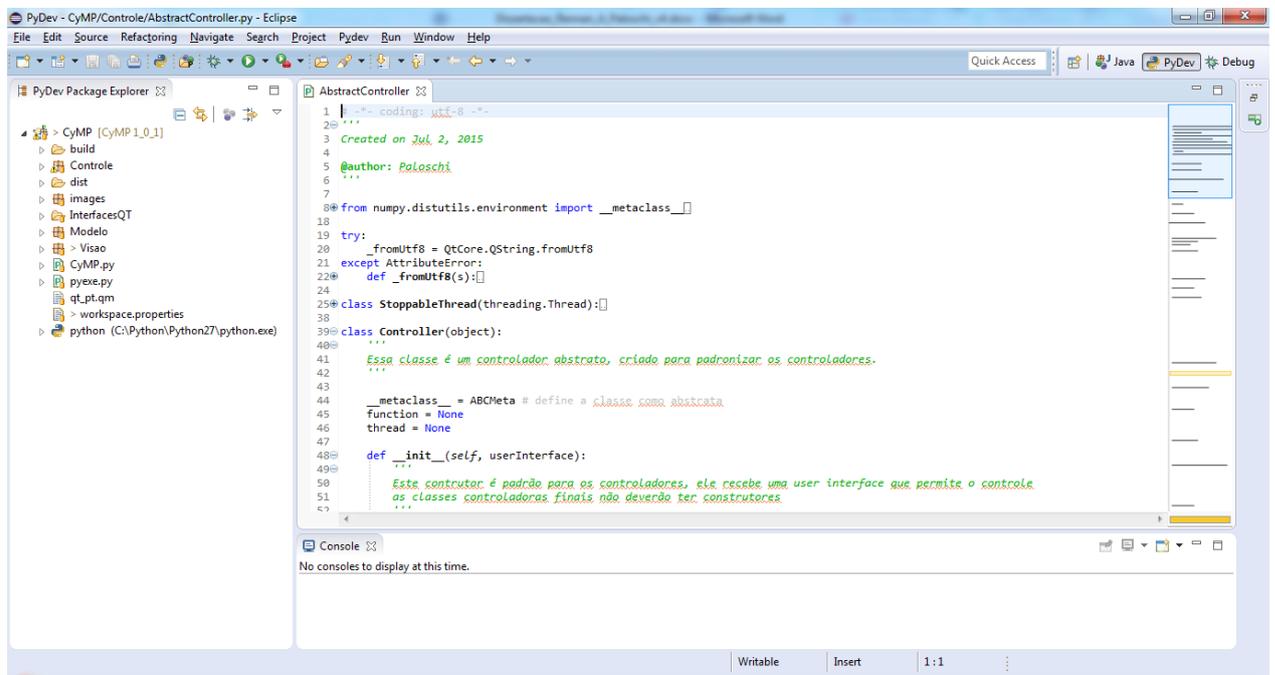


Figura 23 IDE Eclipse.

As funções do sistema foram construídas de acordo com o diagrama de atividades (Figura 16). O *software* será apresentado aqui, de acordo com os casos de uso (Figura 15) e o diagrama de atividades.

No CyMP 1.0.1, a interface inicial de usuário (*User Interface – UI*) consiste em uma janela com uma barra de menu superior que fornece acesso aos 4 casos de uso, por meio de 4 menus localizados na barra (Figura 24): Balanço hídrico (FAO); Estimativa de produtividade (FAO); Tratamento de dados e; Estatísticas.

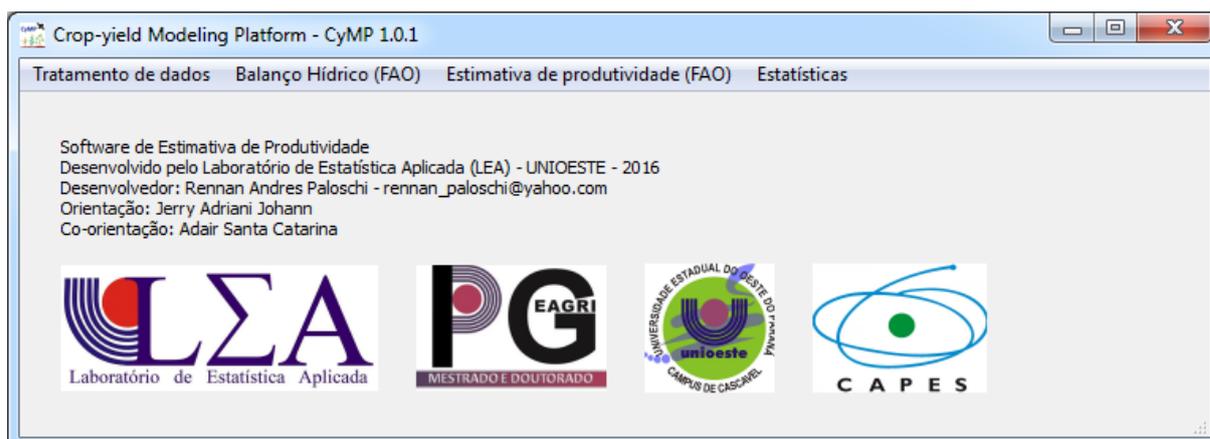


Figura 24 UI principal.

Todos os recursos implementados no sistema exibem, quando executados, uma interface de usuário (UI), para informar o progresso (Figura 25).

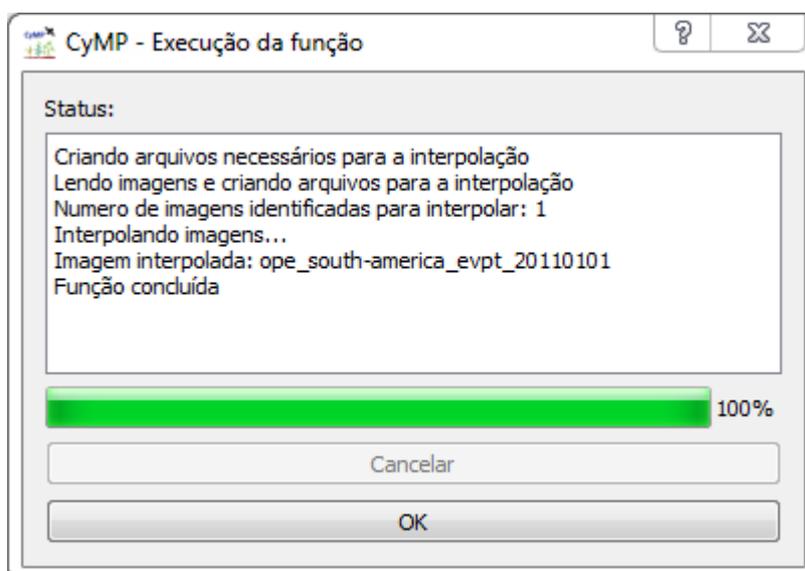


Figura 25 UI de progresso.

A UI de progresso possui uma caixa de texto na parte superior, na qual são exibidas as informações sobre o procedimento; logo abaixo, uma barra de progresso mostra a porcentagem concluída (Figura 25). A maioria dos processos pode ser interrompida

pressionando o botão Cancelar, porém há processos que não podem ser interrompidos. Quando o botão Cancelar é pressionado, a função é encerrada, após a imagem que está sendo processada no momento ser terminada; a UI de progresso informará que a função está sendo cancelada e quando ela estiver cancelada. O botão Cancelar ficará desabilitado caso a função não permita o cancelamento ou não exista função sendo executada, já o botão OK só será habilitado caso a função termine sua execução ou esteja cancelada.

Caso a função não dê suporte ao cancelamento, será exibida uma mensagem informando o usuário antes de iniciar a execução.

5.2.1 Tratamento de dados

O menu Tratamento de dados (Figura 26) fornece acesso a diversas ferramentas relativas ao tratamento e distribuição de séries e índices que serão mostradas em seguida.

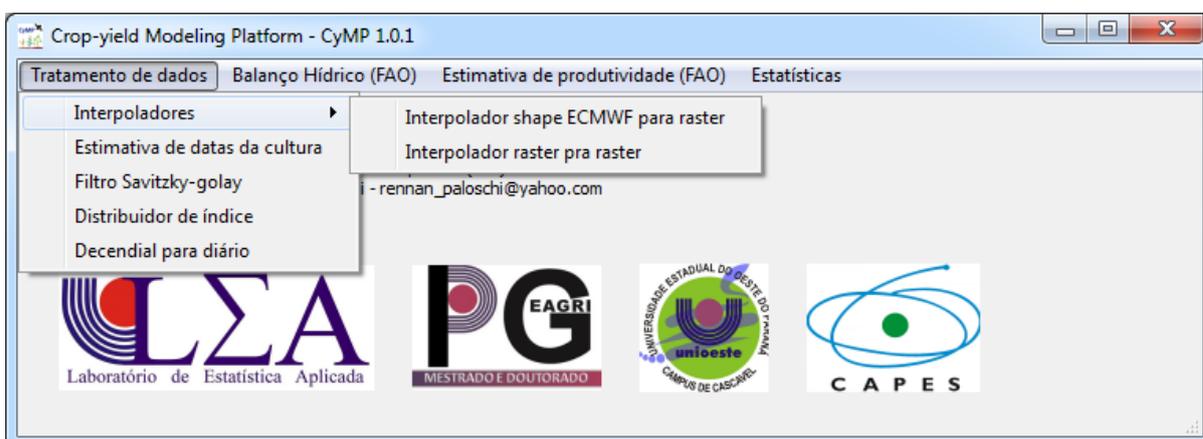


Figura 26 Menu Tratamento de dados.

5.2.1.1 Interpoladores

O *software* fornece duas funções de interpolação: “Interpolador shape ECMWF para raster” e “Interpolador raster pra raster”. As duas funções utilizam o algoritmo “Invdistnn”, que é o inverso da distância, para uma determinada potência, com procura de vizinho mais próximo.

A função “Interpolador shape ECMWF para raster” (Figura 27) foi implementada para que o *software* pudesse dar suporte aos dados ECMWF, quando eles ainda não eram disponibilizados em formato raster. No campo “Shape ECMWF” é inserido o caminho do arquivo .SHP, logo em seguida o campo “Atributo a ser interpolado” é liberado e apresenta como opções a lista de atributos presentes na tabela do arquivo. Isso foi criado para que o

pesquisador pudesse escolher qual atributo da tabela interpolar, já que os arquivos .SHP ECMWF contêm todas as variáveis no mesmo arquivo.

O campo “Imagem de referência” (Figura 27) deve conter o endereço de uma imagem, e a interpolação do atributo selecionado será feita seguindo as resoluções espaciais e as coordenadas geográficas da imagem de referência informada. Isso foi feito para que as imagens interpoladas pudessem ter grades idênticas às imagens de Semeadura e Colheita, facilitando operações matemáticas em funções posteriores.

O campo agrupamento de dados (Figura 27) é uma lista dos atributos presentes na tabela do arquivo .SHP (menos o atributo selecionado para interpolação), nessa lista o pesquisador selecionará como deseja agrupar os dados, por exemplo se existir um atributo referente ao ano e o pesquisador selecionar este atributo, será gerada uma imagem interpolada para cada diferente ano encontrado nesse atributo. Isso foi criado para que o pesquisador pudesse separar os dados em anos, meses e decênios, pois os arquivos .SHP ECMWF contêm todos os dados referentes ao ano inteiro em um único arquivo.

Essa função na versão atual de desenvolvimento 1.0.0, não permite customização dos parâmetros de interpolação, sendo assim, permanecem em seus valores padrões: potência: 2; raio: 0; máximo de pontos: 12; mínimo de pontos: 0. As imagens são processadas e salvas em formato .TIFF no mesmo local do arquivo .SHP. A UI da função “Interpolador *shape* ECMWF para *raster*” pode ser vista na Figura 27.

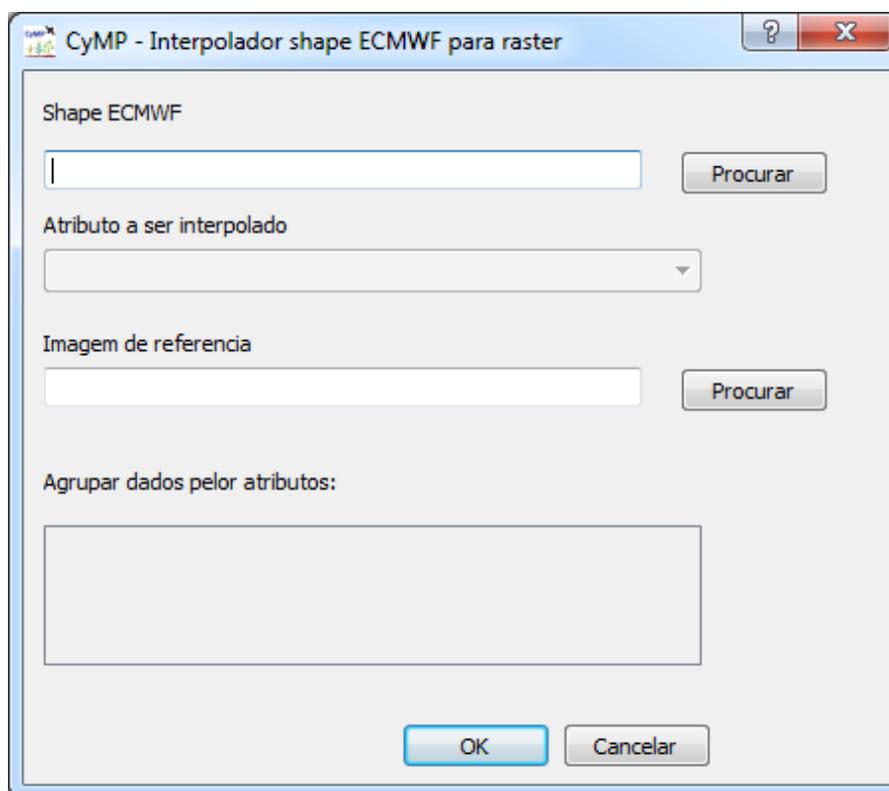


Figura 27 UI Interpolador *shape* ECMWF para *raster*.

A função “Interpolador raster pra raster” fornece uma descrição básica sobre o algoritmo utilizado e disponibiliza a opção de customização dos parâmetros de configuração informados ao algoritmo interpolador. Essa função segue o mesmo padrão de funcionamento da função anterior, interpola os rasters que estão no caminho informado no campo “Pasta de entrada das imagens”, utilizando uma imagem de referência, a configuração manual das imagens interpoladas não está disponível nesta versão. A UI da função “Interpolador raster pra raster” pode ser vista na Figura 28.

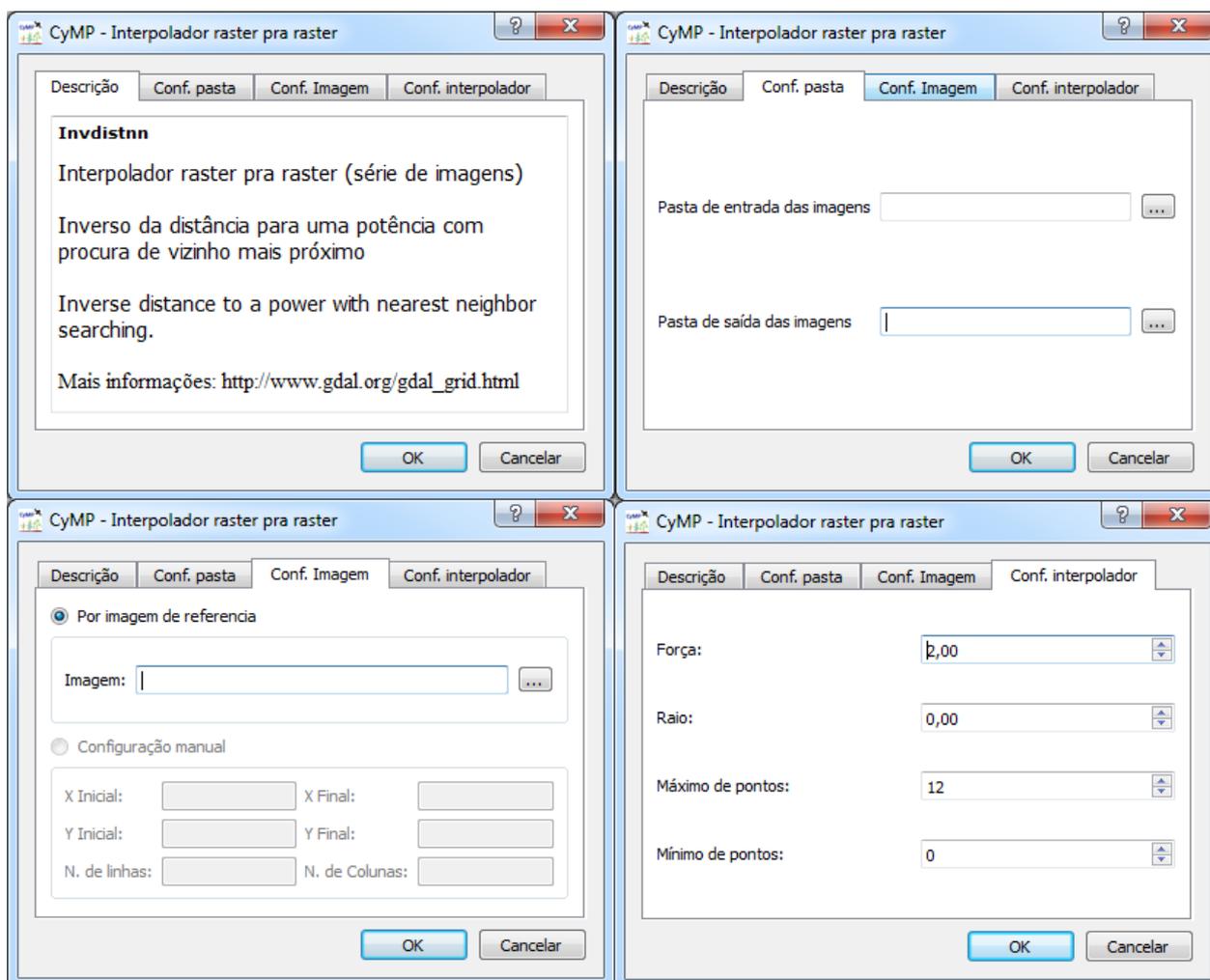


Figura 28 UI Interpolador raster pra raster.

5.2.1.2 Filtro

O filtro implementado foi o Savitzky-golay, que filtra perfis em séries de imagens raster (.TIFF ou .IMG). Seus parâmetros são: “Tamanho da janela”, que precisa ser um número ímpar ≥ 3 e “Ordem”, a ordem do polinômio usado para filtragem, que precisa ser menor que o “Tamanho da janela” $- 1$ (Figura 29). As imagens são salvas em formato .TIFF.

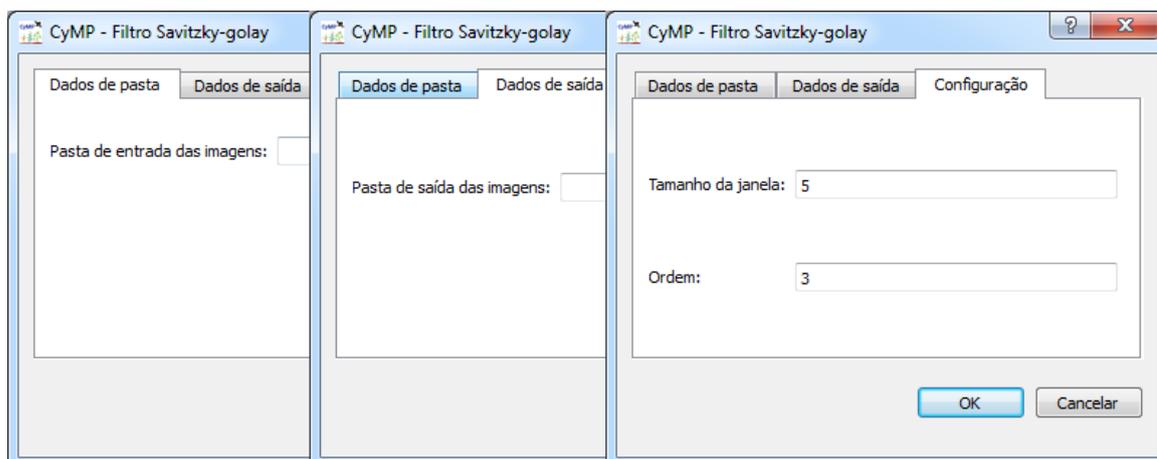


Figura 29 UI Filtro Savitzky-golay.

5.2.1.3 Estimativa de datas da cultura

Este recurso foi implementado para calcular as datas de semeadura, pico vegetativo e colheita, a partir de uma série temporal de um Índice de vegetação (IV). É preciso que as imagens de IV tenham em seu nome de arquivo a data correspondente (mês, dia e ano) para que seja possível calcular as datas da cultura, como por exemplo, “%Y%m%d”, que é a configuração para uma data composta de ano, mês e dia, sem espaços (ex.: 20120923) e “%Y-%m-%d” que corresponde a ano, mês e dia com hifens entre os números (ex.: 2012-09-23).

Na primeira aba: “Dados de pasta” (Figura 30), é necessário informar a pasta na qual se encontram as imagens de IV, o prefixo (sequência de caracteres que antecede a data) quando houver; o sufixo (sequência de caracteres que sucede a data) quando houver e a máscara de tempo.

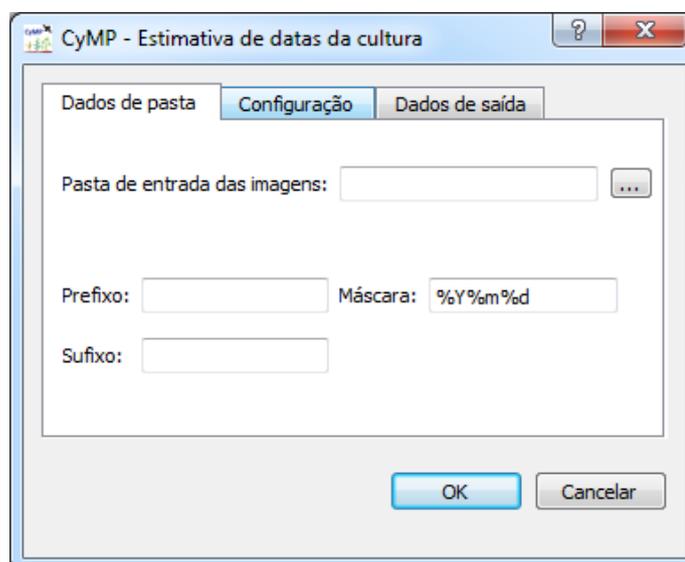


Figura 30 UI Estimativa de datas da cultura - aba 1.

A máscara de tempo é necessária para que o programa entenda quais caracteres correspondem ao ano, ao mês e ao dia, seus elementos e sua configuração pode ser acessada na URL: <https://docs.python.org/2/library/datetime.html>.

Na segunda aba: “Configuração” (Figura 31), é necessário informar o intervalo de imagens no qual as datas de semeadura, pico e colheita serão procuradas. Para definir tais intervalos o pesquisador precisa ter conhecimento da cultura e do tamanho do perfil utilizado. As posições representam o número da sequência de imagens em ordem crescente de data, recomenda-se que as imagens estejam ordenadas tanto por data quanto de forma alfabética. Um intervalo de semeadura de “0-9” significa que o sistema procurará o ponto de inflexão de referência para a data de semeadura desde a primeira imagem até a décima imagem. Também é necessário definir os coeficientes de ajuste para as datas, detalhado no item 4.1.1., e o valor nulo (a ser ignorado), quando houver. Para o caso de as imagens serem multiplicadas por uma máscara (imagem) de valores 0 e 1, em que 1 representa os valores de interesse e 0 os valores a serem desconsiderados, então as imagens resultantes terão os pixels de valores 0 como nulos, pixels não processados.

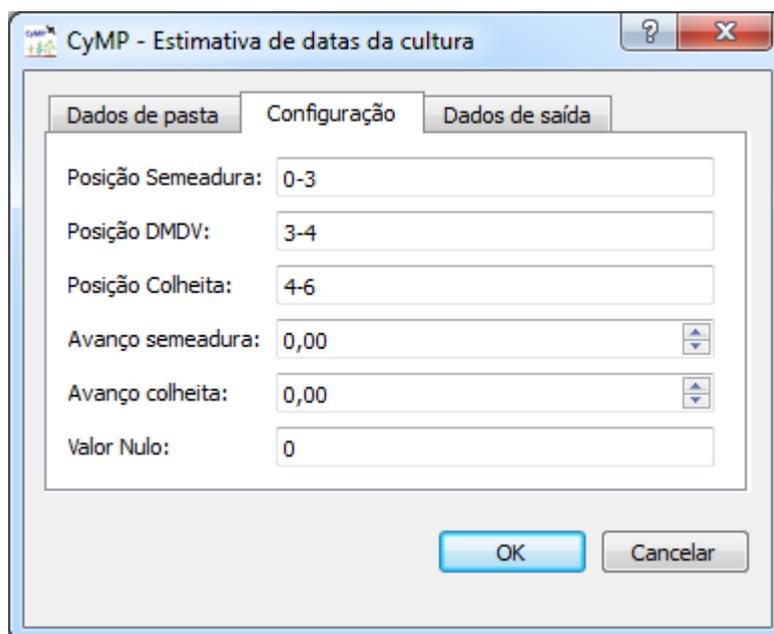


Figura 31 UI Estimativa de datas da cultura - aba 2.

Na terceira aba: “Dados de saída” (Figura 32), é necessário apenas escolher os nomes das imagens (imagens de pico, semeadura e colheita) e a pasta na qual serão salvas. As imagens salvas (em formato TIFF) contêm, em cada pixel, o valor correspondente à data estimada; esse valor é um valor inteiro em que os 4 primeiros dígitos correspondem ao ano e os dígitos seguintes ao dia do ano (1-366). Ex.: pixel de valor

2013127 na imagem de semeadura, significa que a data de semeadura estimada para esse pixel corresponde ao ano de 2013, dia juliano 127.

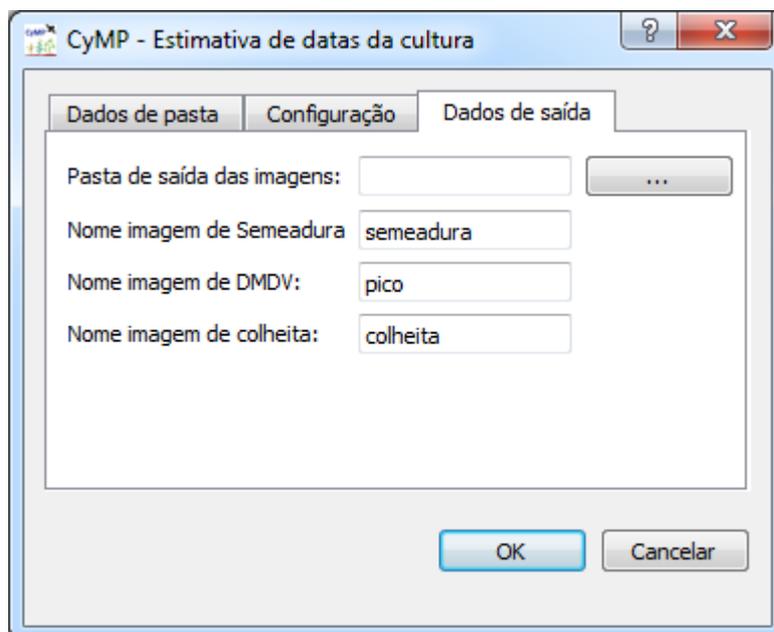


Figura 32 UI Estimativa de datas da cultura - aba 3.

5.2.1.4 Distribuidor de índice

O recurso "Distribuidor de índice" foi construído para simplificar processos posteriores nos cálculos de balanço hídrico e produtividade. Esse recurso permite distribuir os índices da cultura (K_c e Z_r) de forma espacial, de acordo com os estádios fenológicos. Para realizar tal procedimento, ele leva em consideração às datas de semeadura e colheita, calcula a duração/ciclo da cultura em campo (data de colheita menos data de semeadura) e distribui os valores dos índices proporcionalmente (arredondando para dias inteiros) à duração de cada estágio fenológico. Esse processo é feito para cada um dos pixels e é gerada uma imagem para cada dia, em que cada pixel contém o valor correspondente do índice do estágio ao qual ele pertence. A Tabela 3 exemplifica o processo de distribuição do índice Z_r para um pixel hipotético, comparando os intervalos pré-estabelecidos para os estádios vegetativos da cultura da soja, um total de 140 dias com os estádios ajustados pra data de semeadura identificada em 11/09/2011 e colheita em 05/02/2012.

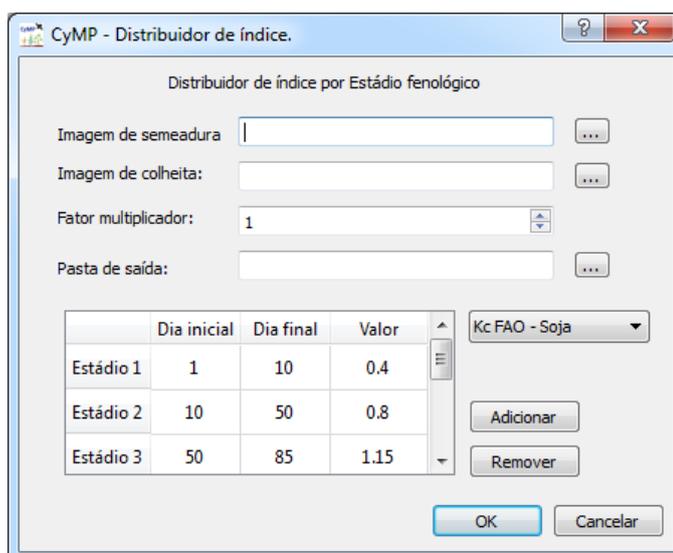
Como o valor de duração de cada estágio fenológico precisa ser arredondado para um dia inteiro não é possível manter as proporções exatas. Na Tabela 3 é possível verificar as diferenças entre as porcentagens de cada período, em relação à duração total da cultura em campo (% do período).

Tabela 3 Simulação de distribuição do índice Zr para a cultura da soja

| EF. | Dia inicial | Dia final | Valor | Número de dias | % do período | % acumulado |
|-----------------|-------------|------------|-------|----------------|--------------|-------------|
| Estabelecimento | 1 | 10 | 0,1 | 10 | 7,14 | 7,14 |
| Vegetativo | 11 | 50 | 0,25 | 40 | 29,29 | 36,43 |
| F., EG. e C. | 51 | 140 | 0,6 | 90 | 65,00 | 100,00 |
| Estabelecimento | 11/09/2011 | 21/09/2011 | 0,1 | 11 | 7,82 | 7,82 |
| Vegetativo | 22/09/2011 | 03/11/2011 | 0,25 | 43 | 29,97 | 37,79 |
| F., EG. e C. | 04/11/2011 | 05/02/2012 | 0,6 | 93 | 64,25 | 100,00 |

Legenda: EF= Estádio fenológico; F = Florescimento; EG = Enchimento de grãos; C = Colheita.

Na interface desse recurso é necessário informar os caminhos das imagens de semeadura, colheita e a pasta de saída para as imagens processadas. Os valores dos pixels destas imagens precisam seguir o padrão de data realizado pela função “Estimativas de datas da cultura”. Também é preciso informar o fator multiplicador, que consiste em um número que multiplicará o valor de cada pixel ao final do processo, isso permite que, em vez de serem criadas imagens com valores quebrados de 32 bits, sejam criadas imagens com valores inteiros de apenas 8 bits que, computacionalmente, ocupam 75% menos espaço de armazenamento. A escolha da quantia de bits da imagem é feita automaticamente com base no alcance dos valores encontrados na própria imagem. A UI deste recurso fornece em um *combobox* (Figura 33) os valores ponderados de Kc e Zr para a soja, calculados para o estudo de caso deste trabalho, porém, é possível editar esses valores, adicionando novos estádios ou construindo todo um intervalo de índice novo para uma outra cultura, por exemplo, isso se dá por meio dos botões Adicionar e Remover (Figura 33).

**Figura 33** UI Distribuidor de índice por estágio fenológico.

5.2.1.5 Decendial para diário

Como já foi descrito, o recurso Decendial para diário foi criado tanto para facilitar cálculos em procedimentos posteriores quanto para evitar arredondamentos, trazendo todas as informações para a base diária.

A forma de inserir dados seriais-temporais no sistema foi padronizada desta forma e todas as funções que serão mostradas a seguir seguem essa padronização. O procedimento consiste em clicar no botão “Configurar”, respectivo ao parâmetro desejado e, então, preencher os atributos referentes à série de imagens temporais.

Nesta UI é mostrado um *combobox* (Figura 34) com duas opções, “Manter valores” e “Dividir valores”. A opção “Manter valores” replica os valores, copiando as imagens para cada dia presente no decêndio correspondente, já a opção “Dividir valores” divide o valor de cada pixel pelo número de dias presentes no decêndio, gerando uma imagem para cada dia.

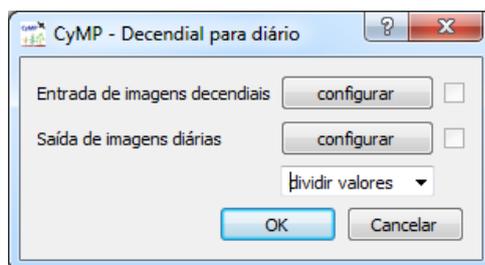


Figura 34 UI Decendial para diário.

Logo depois que o pesquisador clica no botão configurar, a UI de inserir série temporal (Figura 35) se abre para que seja configurada a série temporal com os parâmetros que são: “Endereço das imagens”; “Prefixo”; “sufixo”; “Máscara de tempo” e; “Fator multiplicador”. Estes parâmetros seguem a mesma explicação dada anteriormente.

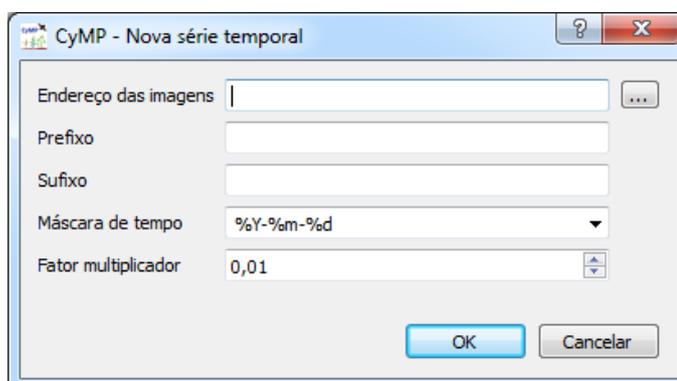


Figura 35 UI Nova série temporal.

5.2.2 Balanço hídrico (FAO)

O menu Balanço Hídrico (FAO) fornece acesso aos procedimentos para estimar as variáveis relativas ao balanço hídrico e ao próprio balanço hídrico (Figura 36). Estes recursos serão mostrados em seguida.

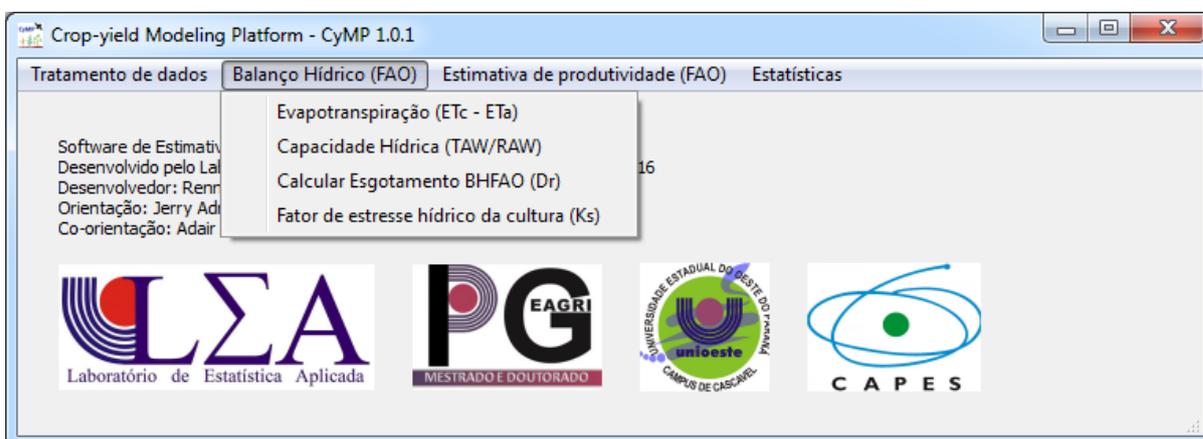


Figura 36 Menu Balanço Hídrico (FAO).

5.2.2.1 Evapotranspiração (ETc - ETa)

A primeira ferramenta do menu de balanço hídrico é a Evapotranspiração (ETc - ETa). Os cálculos de evapotranspiração da cultura (ETc) e evapotranspiração real (ETa) possuem equações muito parecidas, que consistem em uma multiplicação direta. Por essa razão, os cálculos para os dois parâmetros foram postos na mesma interface (Figura 37). Para calcular a ETc devem ser configuradas as séries de imagens de ET₀, K_c e a configuração de saída da própria ETc.

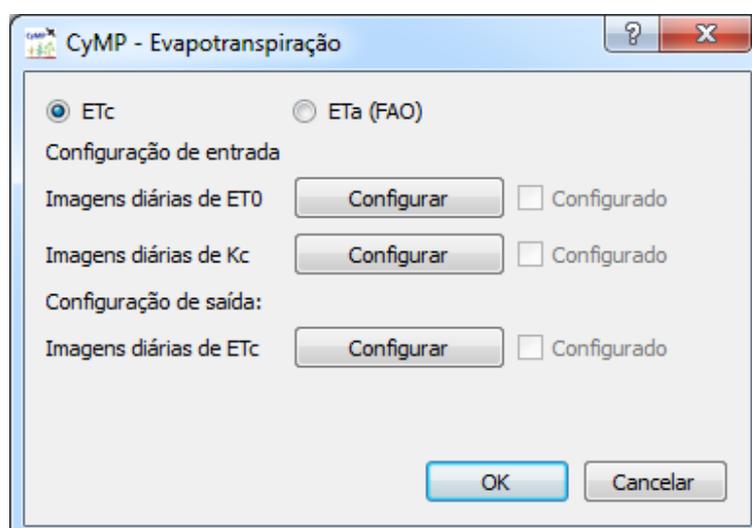


Figura 37 UI Evapotranspiração da cultura, ETc.

Quando é trocada a opção para “ETa (FAO)” no *radiobutton* (parte superior) apenas é mudado o nome dos parâmetros, indicando onde devem configurados (Figura 38). Para utilizar essa função devem ser configuradas as imagens de Ks, ETc e a saída ETa.



Figura 38 UI Evapotranspiração real, ETa.

5.2.2.2 Capacidade hídrica (TAW/RAW)

A função “Capacidade hídrica (TAW/RAW)” (Figura 39) calcula a capacidade de campo (TAW) e a capacidade prontamente disponível para a cultura (RAW), com base em uma imagem de CAD, e as imagens de profundidade de raiz (Zr). Sendo a RAW uma fração da TAW, é necessário apenas alterar o fator multiplicador da TAW e obter a RAW desejada. Para a cultura da soja, por exemplo, é utilizado o fator 0,5 (ALLEN *et al.*, 1998), caso contrário deve ser mantido o fator multiplicador padrão 1.

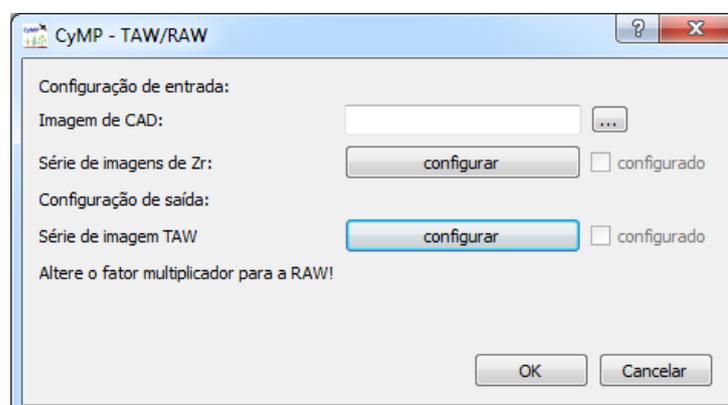


Figura 39 UI Capacidade hídrica (TAW/RAW).

5.2.2.3 Valor de esgotamento (Dr)

A função “Valor de esgotamento Dr” foi implementada para estimar o balanço hídrico (Figura 40). Os parâmetros de entrada desta função são: imagens de ETC, imagens de precipitação (ECMWF), série de imagens TAW e a imagem CAD. A imagem CAD é utilizada quando não há cultura em campo, ainda, ou seja, quando não existe TAW para limitar o Dr ($TAW \geq Dr \geq 0$, ALLEN *et al.*, 1998).

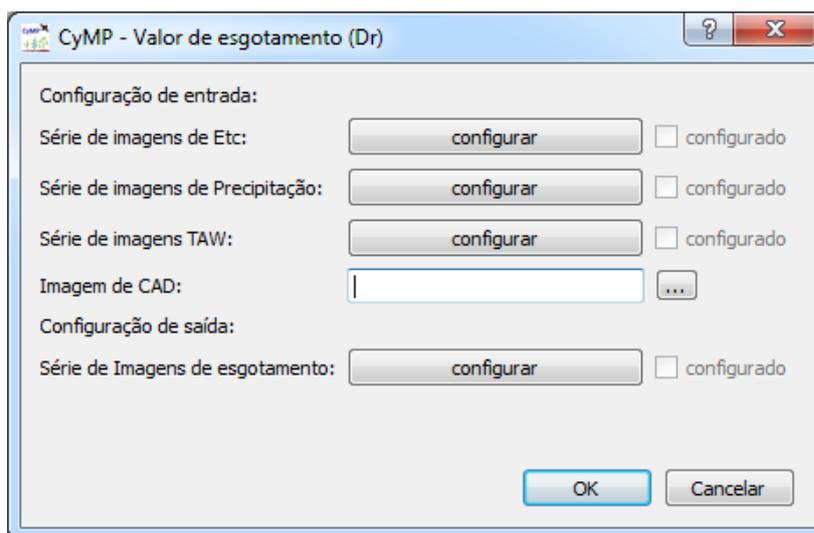


Figura 40 UI Valor de esgotamento (Dr).

5.2.2.4 Fator de estresse hídrico da cultura (Ks)

A função para cálculo do fator de estresse hídrico da cultura (Ks) foi implementada e encontra-se na última posição do menu Balanço hídrico (FAO) (Figura 41). Para executá-la é necessário configurar as imagens de Dr, as imagens de RAW e as imagens de TAW, bem como configurar as imagens de saída Ks.

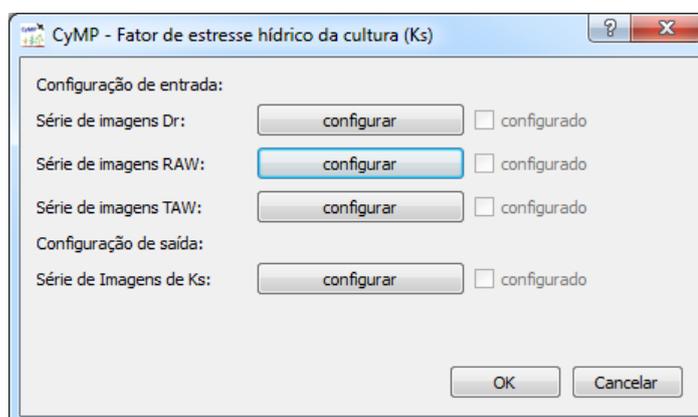


Figura 41 UI Fator de estresse hídrico da cultura (Ks).

5.2.3 Estimativa de produtividade (FAO)

O menu “Estimativa de produtividade (FAO)” fornece acesso às duas funções de estimativa de produtividade: a estimativa de “Produtividade Potencial Bruta (PPB)” e a estimativa de “Produtividade atingível (Ya)” (Figura 42).

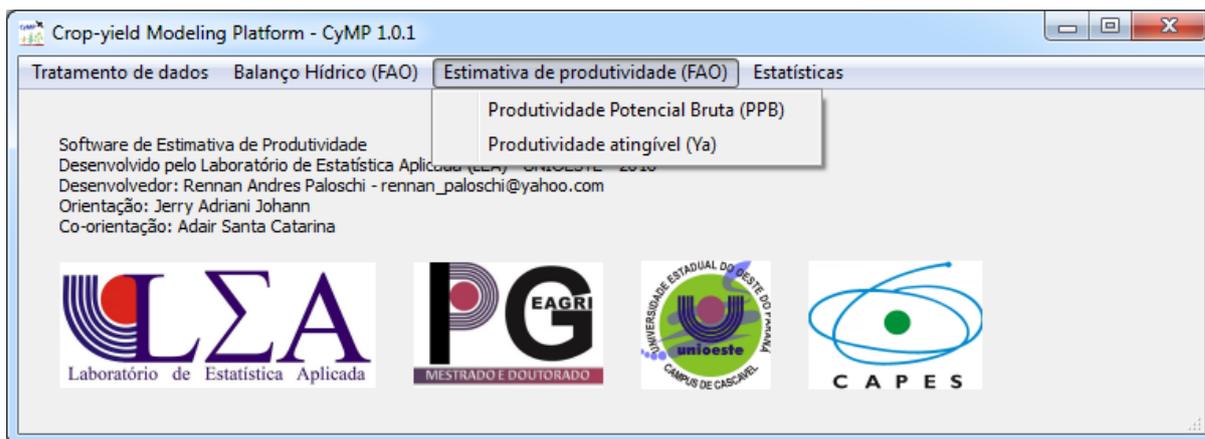


Figura 42 Menu Estimativa de produtividade (FAO).

5.2.3.1 Produtividade potencial bruta (PPB)

A primeira opção do menu “Estimativa de produtividade (FAO)” a “Produtividade potencial bruta (PPB)” foi implementada de forma a utilizar as coordenadas dos pixels das imagens de temperatura média, juntamente com os valores de temperatura destes pixels e o Índice de colheita (Cc), para calcular todas as informações necessárias e estimar a PPB, ou seja, essa função calcula a radiação solar no topo da atmosfera (MJ m^{-2}), a distância relativa Sol-Terra (UA), o ângulo horário, a declinação solar, o ctn, o ctc, a PPBn, a PPBc e, por fim, a PPB para cada pixel. As imagens de PPB são geradas na mesma resolução das imagens de temperatura configuradas, uma imagem para cada data.

Na UI dessa função é necessário que se configurem as imagens de temperatura, a saída das imagens de PPB e que seja informado o índice de colheita (Cc) da cultura correspondente (Figura 43).

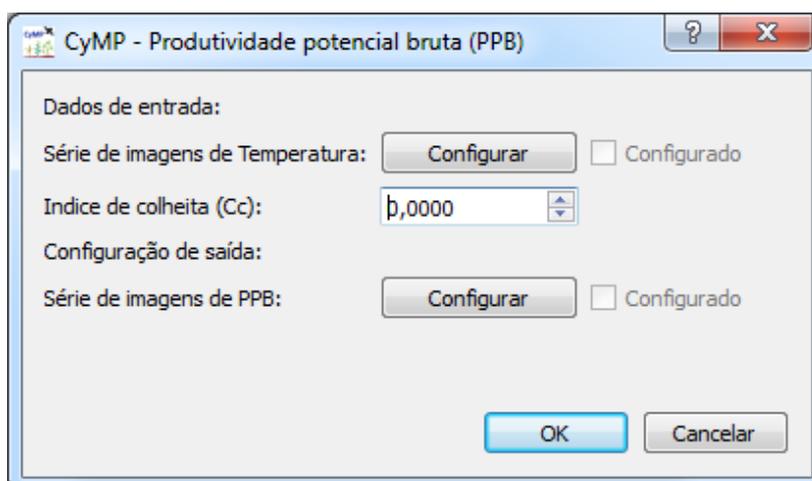


Figura 43 UI Produtividade potencial bruta (PPB).

5.2.3.2 Produtividade atingível (Y_a)

A segunda função do menu de produtividade e última função identificada no diagrama de atividades (Figura 16) a “Produtividade atingível (Y_a)” (Figura 44), foi implementada para gerar resultados diários de produtividade, como sugerido por Allen *et al.* (1998). Para isso é necessário configurar imagens diárias de ET_a , ET_c , PPB (Y_x) e K_c , informar o fator de produtividade (K_y) e configurar a saída Y_a . As imagens de K_c não são utilizadas diretamente no cálculo de Y_a , porém, são necessárias para que se tenha a informação das culturas que estão no campo, já que a Y_a só será calculada nas imagens e nos pixels que tiverem cultura, ou seja, $K_c > 0$, porém, para obtê-la, também, podem ser utilizadas imagens diárias de Z_r .

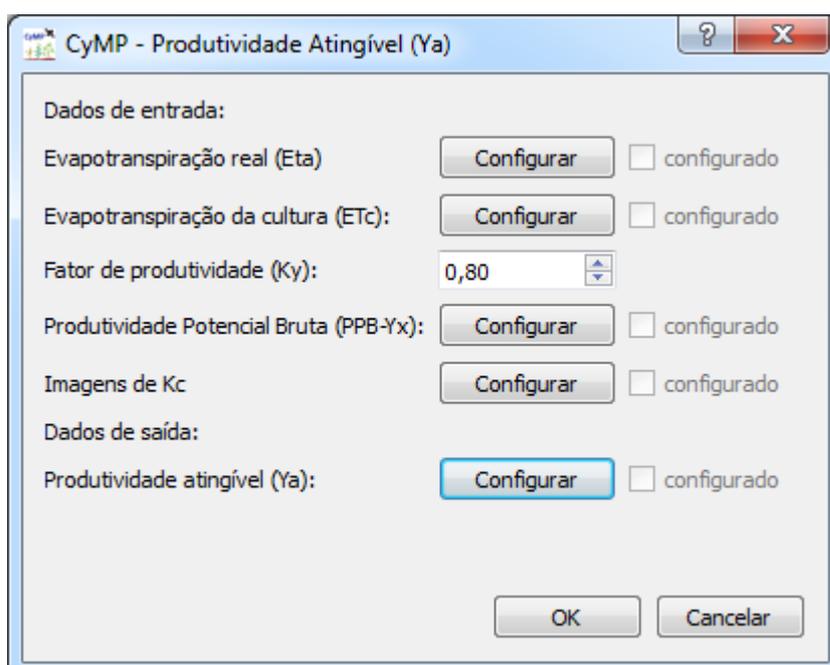


Figura 44 UI Produtividade atingível (Ya).

5.2.4 Estatísticas

No menu estatísticas foi inserida uma função para obter estatísticas descritivas dos perfis em séries temporais (Figura 45).

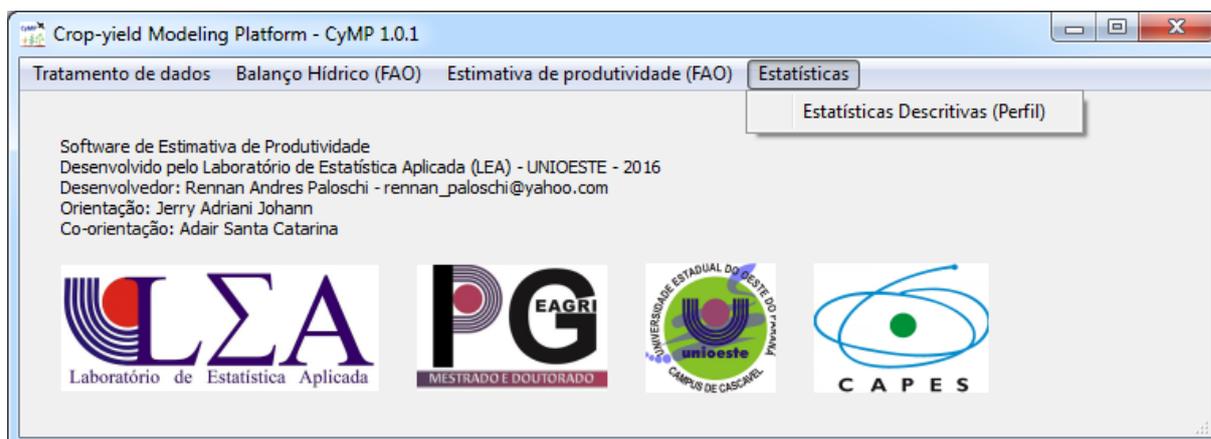


Figura 45 Menu Estatísticas.

Para utilizar a função “Estatísticas descritivas (Perfil)” deve ser informada a pasta contendo as imagens a serem lidas e a pasta na qual serão salvas as imagens das estatísticas nas abas 1 e 2, respectivamente (Figura 46).

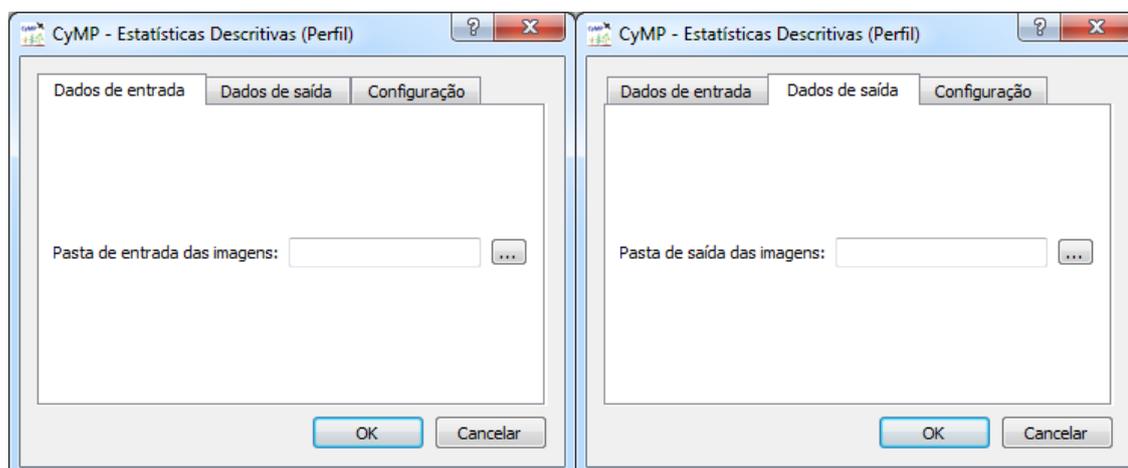


Figura 46 UI Estatísticas descritivas (Perfil) - abas 1 e 2.

Na terceira aba (Configuração), são disponibilizadas 8 opções: estatísticas descritivas de média, desvio padrão, coeficiente de variação e mediana e também outras métricas, amplitude (máximo menos mínimo), soma, mínimo e máximo (Figura 47).

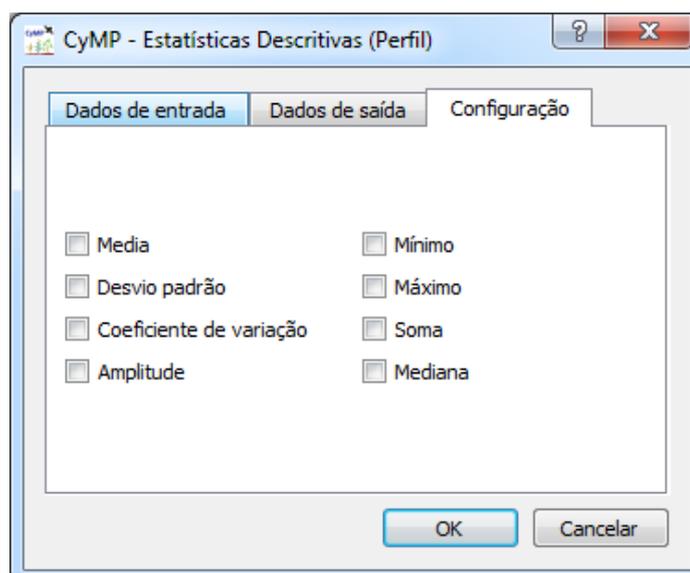


Figura 47 UI Estatísticas descritivas - aba 3.

É salva uma imagem para cada uma das opções selecionadas na pasta de saída selecionada.

5.3 Estudo de caso: uso do *software* em dados reais

Primeiramente, as imagens de EVI Modis dos anos 2011 e 2012 (92) foram filtradas pelo filtro FLAT e Savitzky-Golay. O filtro FLAT tem por objetivo remover ruídos na série temporal de dados; ele nivela pontos de inflexão agudos utilizando os valores dos pixels de imagens próximas em sua comparação. O filtro Savitzky-Golay tem como objetivo recuperar o perfil, aproximando-o ao máximo dos dados originais. Utilizando subconjuntos (janela móvel), ele realiza sucessivas montagens de pontos adjacentes aos dados, com um polinômio de baixo grau (o grau escolhido foi de ordem 3), pelo método dos mínimos quadrados lineares. Na **Figura 48** é mostrado o perfil médio original para o talhão A observado, enquanto na **Figura 49** é mostrado o perfil filtrado.

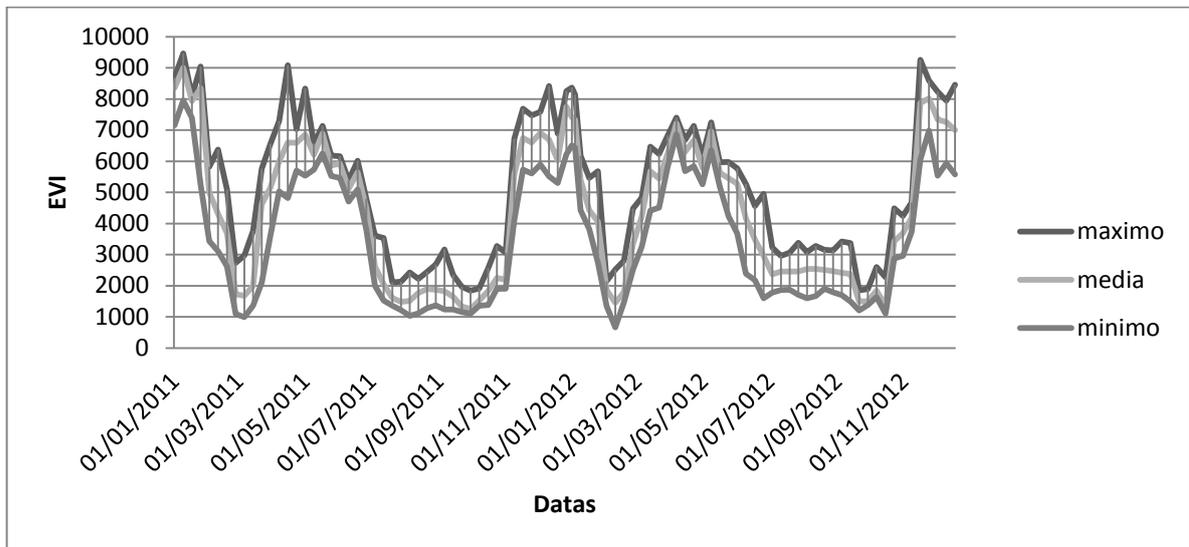


Figura 48 Perfil de EVI sem filtro no talhão A.

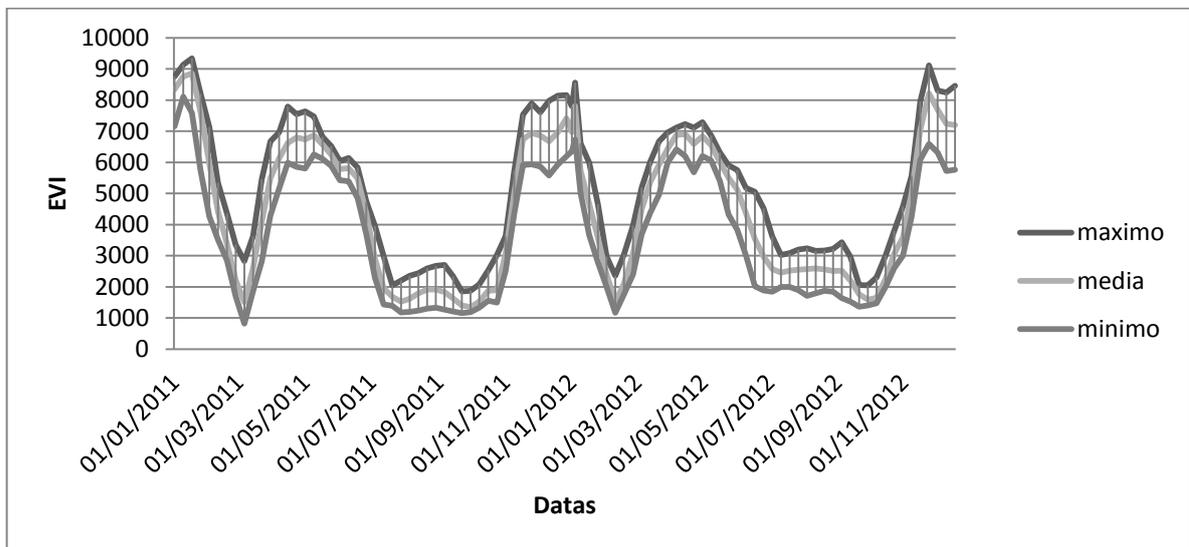


Figura 49 Perfil de EVI filtrado no talhão A.

O perfil sem filtro apresentou um coeficiente de variação (CV) médio de 12%, tendo o maior valor no dia 06/09/2011 e apresentando um CV de 30%; já o perfil filtrado apresentou um CV médio de 10%, com um CV máximo de 23% no mesmo dia (06/09/2011). Isso mostra que o filtro não só reduziu ruídos recuperando os perfis, mas também definiu o comportamento padrão do talhão observado.

As imagens de EVI filtradas foram multiplicadas pela máscara de soja e, a partir destas imagens, foram gerados perfis médios de EVI para cada pixel dos talhões de soja identificado por Becker *et al.* (2015), a fim de identificar os intervalos das datas de semeadura, máximo vegetativo e colheita. As imagens de EVI filtradas encontram-se no Apêndice A.

Na Figura 50, é mostrado o recorte de tempo utilizado para identificar os intervalos submetidos como parâmetro na função de estimativa de datas, os números de imagem mostrados no eixo X da Figura 48 correspondem ao recorte temporal e não ao total de imagens de 2011/2012, que é de 92 imagens.

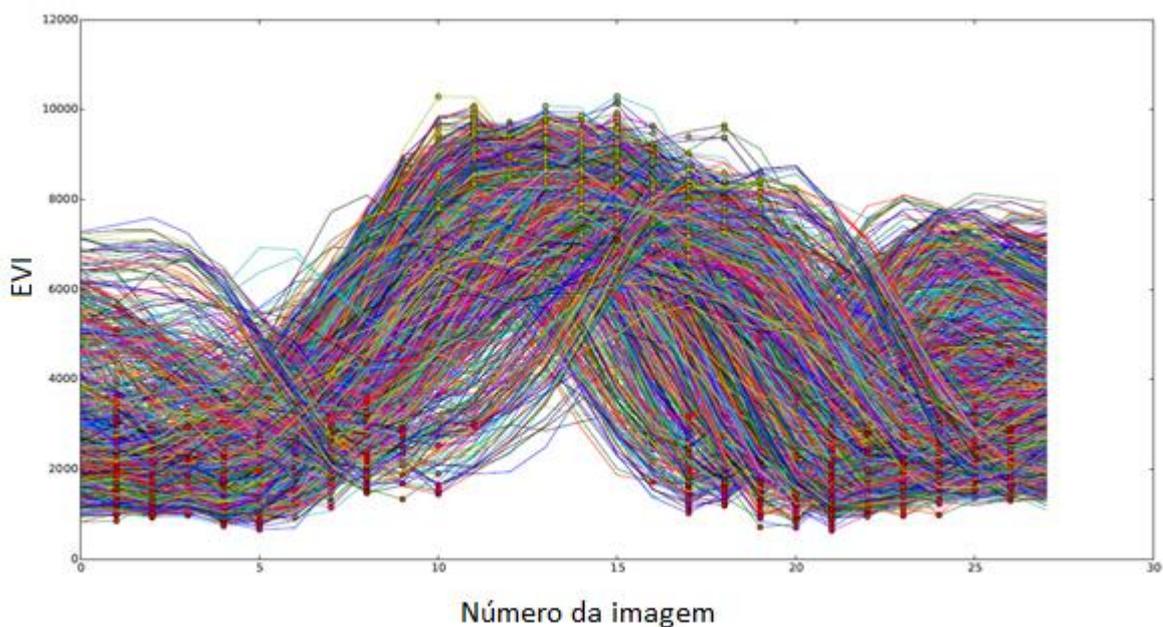


Figura 50 Perfis médios para talhões de soja 2011/2012.

Os intervalos identificados, testados e verificados com base no perfil temporal, para sequência de 92 imagens foram:

- Intervalo de imagens de semeadura: 32-47 (06/09/2011-27/12/2011);
- Intervalo de imagens de máximo desenvolvimento vegetativo: 38-54 (24/10/2011-10/02/2012);
- Intervalo de imagens de colheita: 48-60 (01/01/2012-06/04/2012).

Os valores não são os limites de variação identificados nas datas de semeadura e colheita (Figura 50), são intervalos nos quais essas datas podem estar, com um acréscimo, uma margem de segurança, de cerca de 2 ou 3 imagens para cada lado. Visto que essa margem foi regulada de forma incremental, a fim se obter o mínimo de erros, foi possível observar e constatar que locais que se mantiveram com datas muito fora do padrão não tinham perfis característicos de uma cultura de verão e seguiam muito fora do comportamento padrão, provavelmente devido a falhas na máscara de soja ou mistura espectral de alvos próximos.

Identificados os intervalos as imagens foram submetidas à função “Estimativa de datas da cultura”, gerando assim as imagens de semeadura (Figura 51), máximo desenvolvimento vegetativo (Figura 52) e colheita (Figura 53). Como já mencionado em Material e Métodos, os ajustes utilizados para estimar as datas da cultura foram

determinados por Johann *et al.* (2016), que utilizaram dados reais de colheita e semeadura informados pelos produtores.

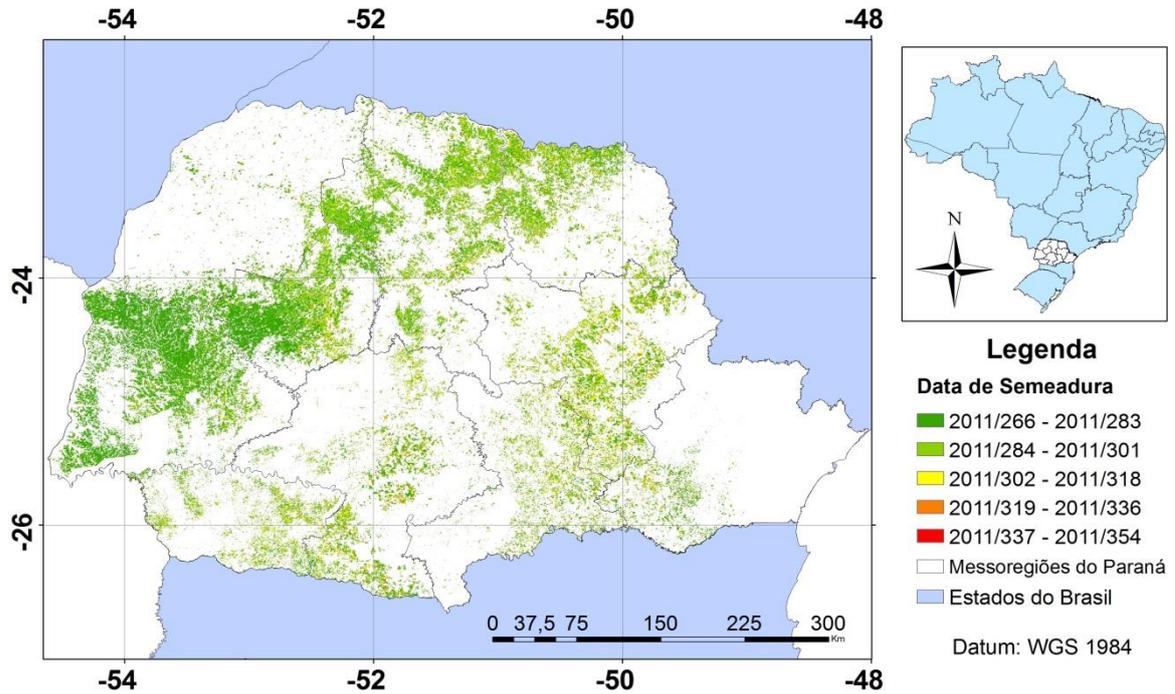


Figura 51 Estimativa de datas de semeadura (dias julianos) - safra 2011/2012.

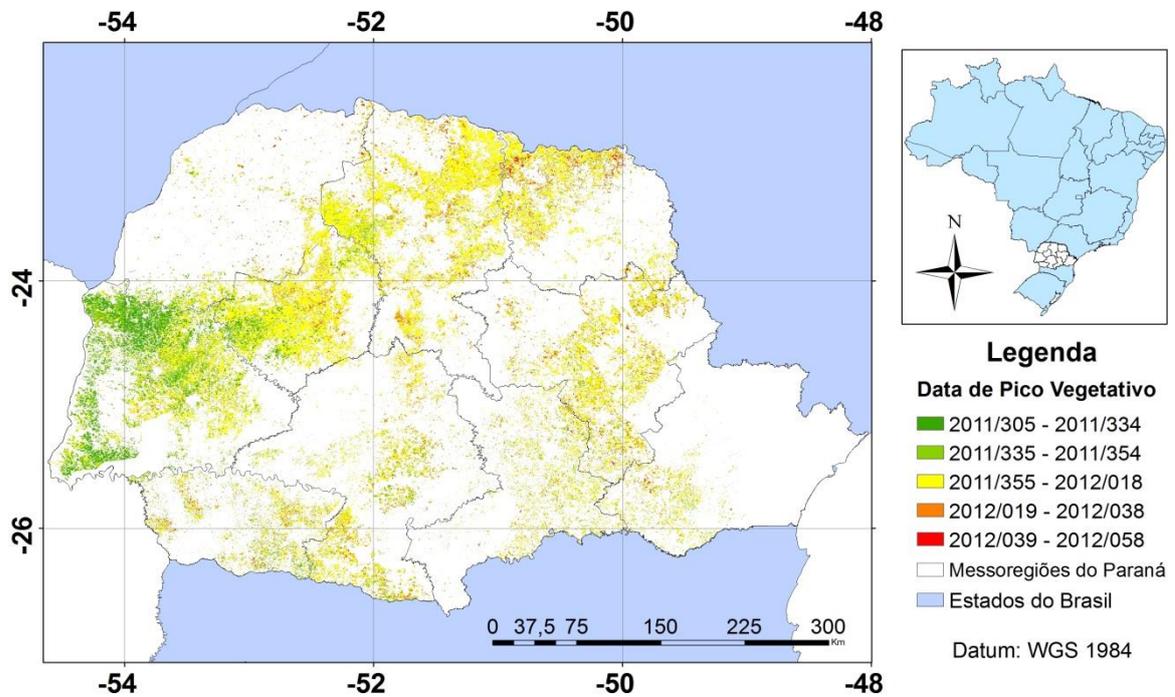


Figura 52 Estimativa de datas de máximo desenvolvimento vegetativo (dias julianos) - safra 2011/2012.

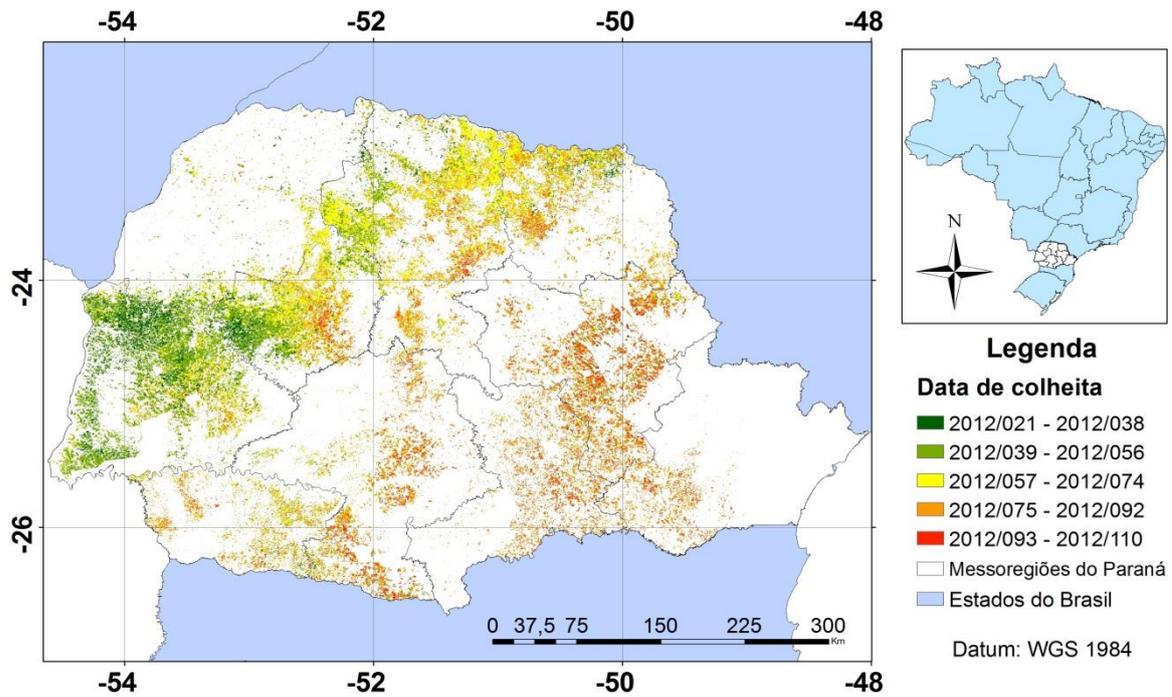


Figura 53 Estimativa de datas de colheita (dias julianos) - safra 2011/2012.

Nas Figuras 54, 55 e 56 são mostradas as estimativas de datas de semeadura (DS), datas de máximo desenvolvimento vegetativo (DMDV) e datas de colheita (DC), respectivamente, para o talhão A analisado.

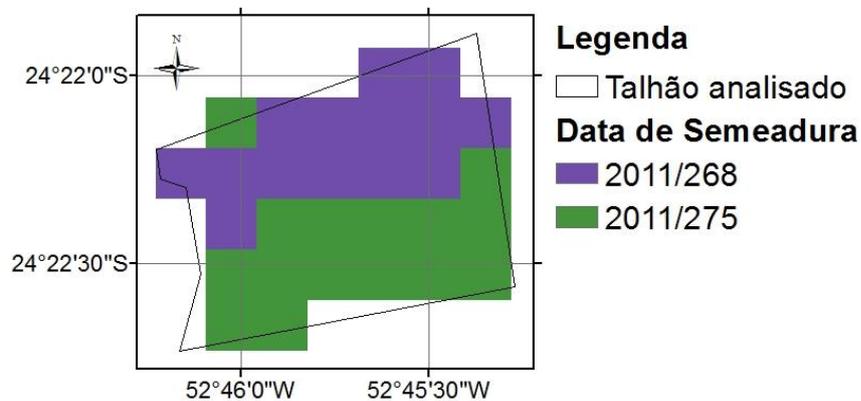


Figura 54 Estimativa de DS no talhão A analisado - safra 2011/2012.

Na Figura 53 é mostrada uma diferença de sete dias que, praticamente, divide o talhão A horizontalmente, o que pode ser considerado como parte da margem de erro da metodologia utilizada.

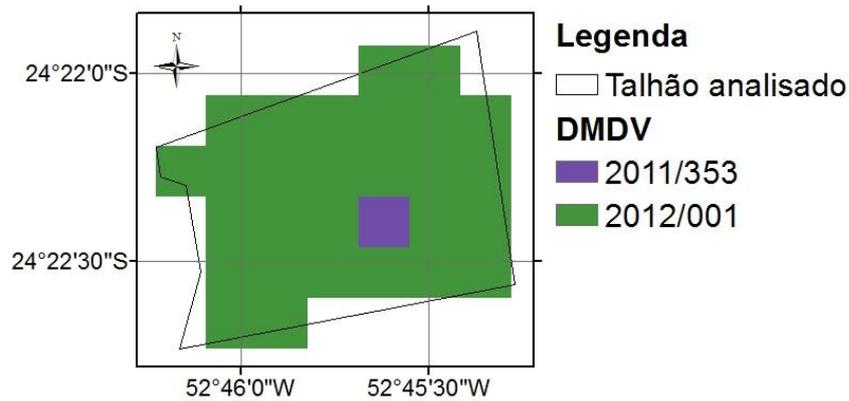


Figura 55 Estimativa de DMDV no talhão A analisado - safra 2011/2012.

A estimativa de DMDV para o talhão A analisado apresentou maior homogeneidade em relação à estimativa de DS, divergindo apenas com um pixel (Figura 55). Na estimativa de DC (Figura 56), a homogeneidade foi ainda maior, apresentando divergência de um dia, também com o mesmo pixel divergido na estimativa de DMDV.

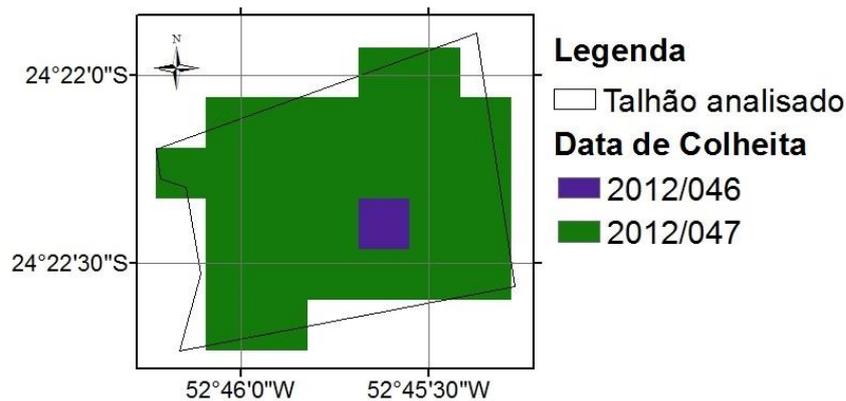


Figura 56 Estimativa de DC no talhão A analisado - safra 2011/2012.

O talhão A analisado apresentou as datas médias de semeadura em 29/09/2011 (2011/271) e colheita em 16/02/2012 (2012/46), um total de 140 dias de cultura em campo, que é usualmente o tempo considerado para a estadia da cultura da soja (ALLEN *et al.*, 1998; RICHETTI *et al.*, 2015), esta estimativa corrobora para comprovar a qualidade do método.

A partir das imagens de semeadura e colheita os índices da cultura Kc e Zr foram distribuídos por meio da função “Distribuidor de índice”, obtendo-se imagens desde a primeira data de semeadura (2011/09/23) até a última data de colheita (2012/04/19), um total de 210 imagens para cada índice.

O perfil de Kc (Figura 57) para o talhão A analisado (29 pixels,) apresentou um CV médio de 5%. Nesse perfil, é possível observar os períodos em que houve maior ou menor necessidade hídrica (maior ou menor Kc).

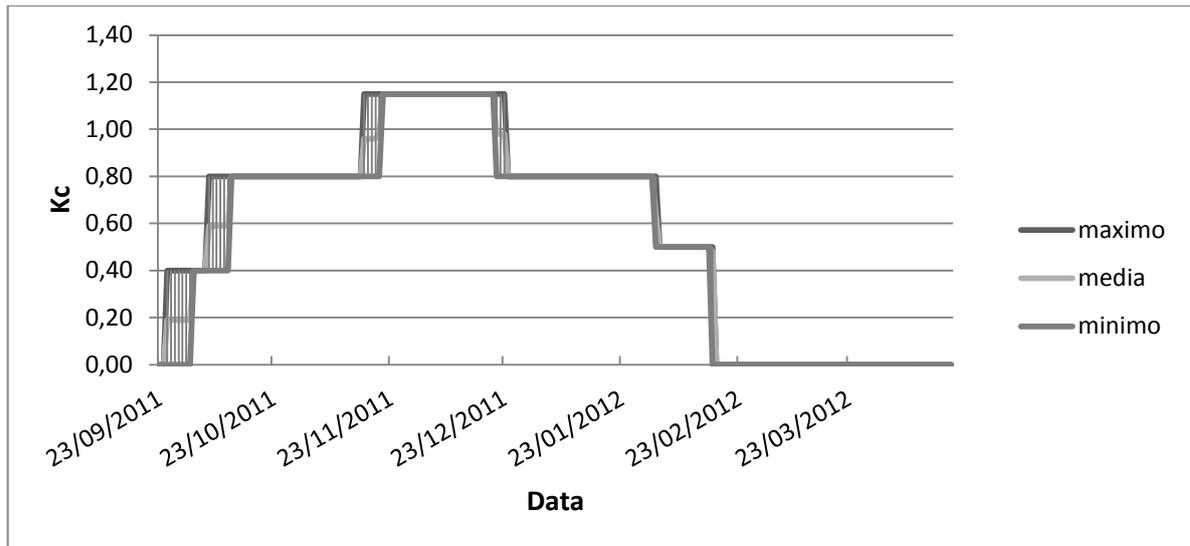


Figura 57 Perfil de Kc para o talhão A.

Na Figura 58 é possível observar o crescimento, a profundidade das raízes (Zr), em metros, da cultura da soja para o talhão A analisado. O CV médio para o talhão foi de 5,6%.

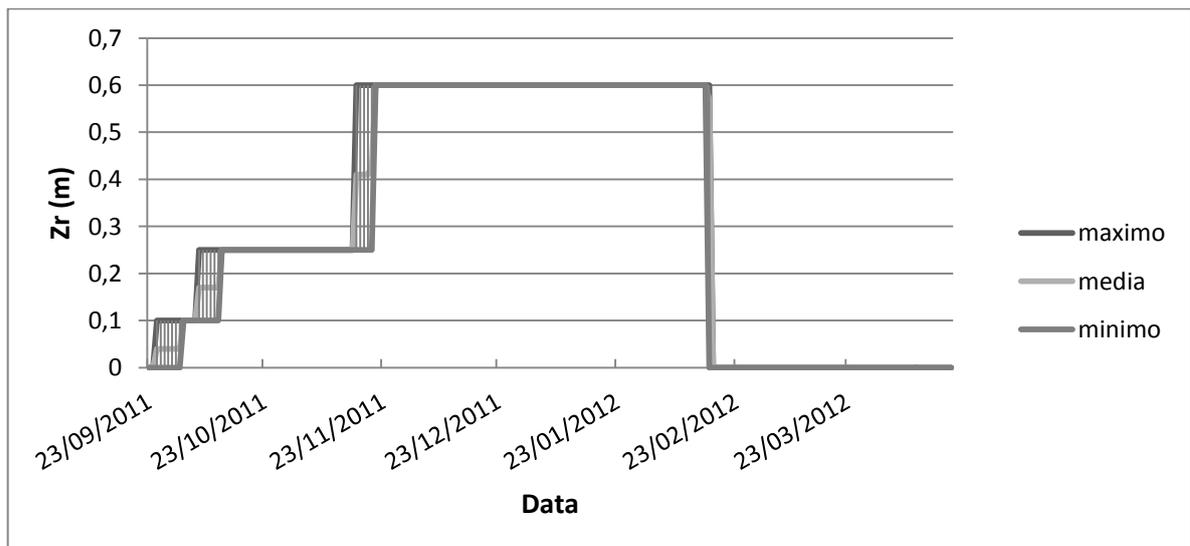


Figura 58 Perfil de Zr para o talhão A.

As imagens de Kc e as imagens de Zr diárias para toda a área de estudo estão no Apêndice A.

Os dados ECMWF de evapotranspiração de referência (ET₀, mm), temperatura média (T, °C) e precipitação (P, mm), dos anos de 2011 e 2012 (72 imagens pra cada variável), foram recortados para o estado do Paraná e interpolados para 250 m, utilizando-se a função “Interpolador raster pra raster”, com a imagem de semeadura como referência para interpolação, de forma a ficar com o mesmo número de linhas, colunas, mesmo tamanho de pixel (250 m) e com as mesmas coordenadas geográficas. Na Figura 59,

visualiza-se a imagem recortada de ET0 do primeiro decênio de 2011, enquanto que, na Figura 60, visualizam-se os dados interpolados.

Após a interpolação, as imagens foram submetidas à função “Decendial para diário”, gerando imagens diárias das variáveis. Baseado nas primeiras datas de semeadura e nas últimas datas de colheita foi selecionado o intervalo de imagens de 13/08/2011 (+- 40 dias antes das primeiras semeaduras) até 19/04/2012 (última data de colheita), totalizando 251 imagens pra cada variável (ET0, T e P). As imagens interpoladas diárias estão no Apêndice A.

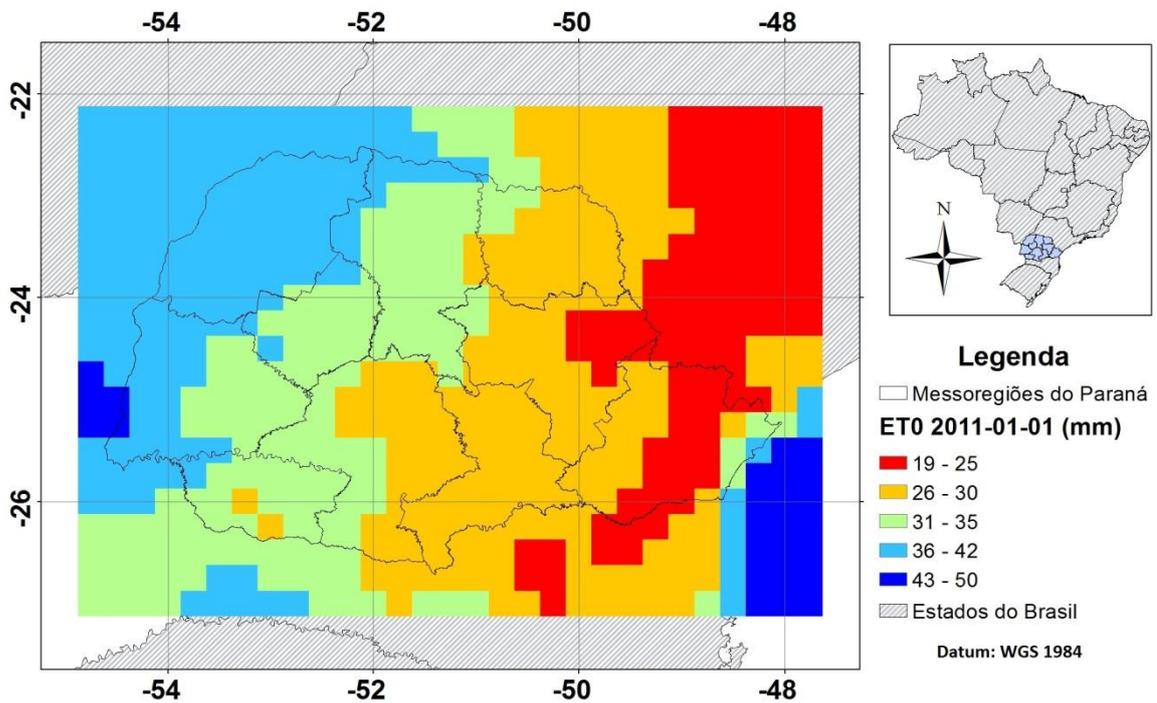


Figura 59 Imagem de ET0 25 km - 2011/01/01.

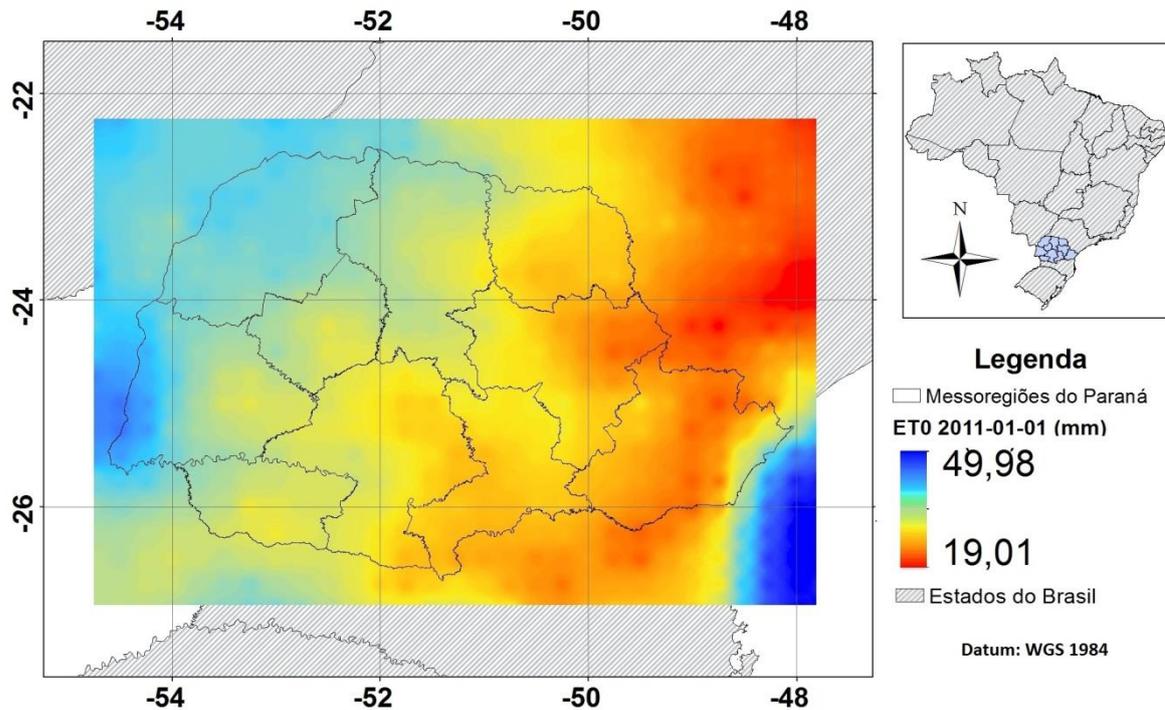


Figura 60 Imagem de ET0 interpolada 250 m - 2011/01/01.

Não houve variação perceptível entre os 29 pixels, em relação às variáveis agrometeorológicas dentro de cada dia ($CV < 1\%$), devido à proximidade dos mesmos e à resolução do ECMWF. Na Figura 61 estão os perfis de ET0 médio e P média, para o talhão A analisado.

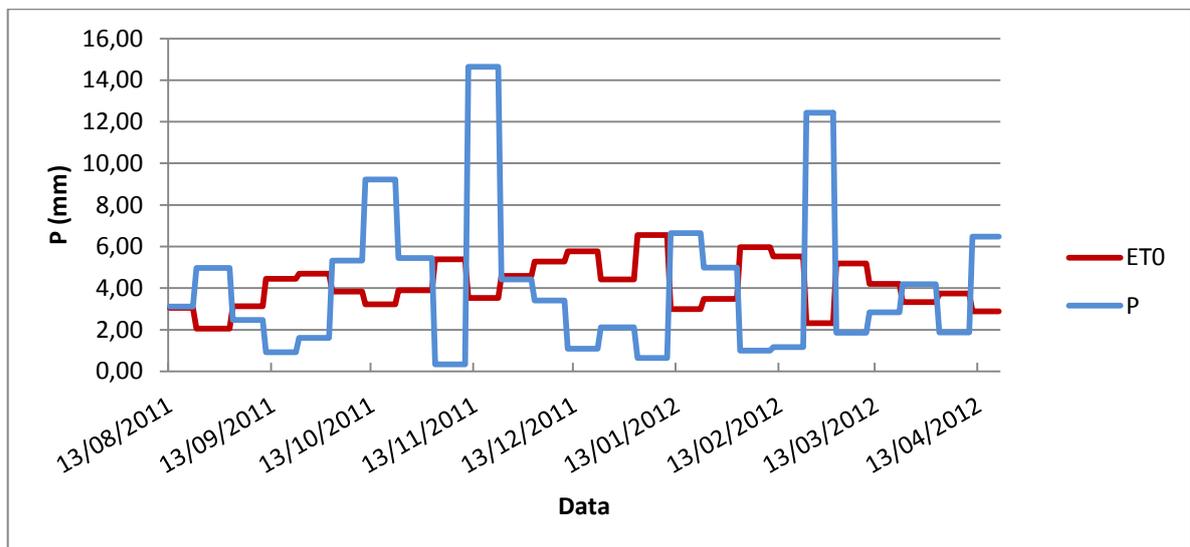


Figura 61 ET0 e P média (mm) para o talhão A.

Apenas com os gráficos de precipitação (P, mm) e evapotranspiração de referência ET0, é possível observar uma deficiência hídrica dado que a ET0 chega a ser duas vezes maior que P em várias datas. Também é possível observar dois momentos de chuvas

concentradas: 14,64 mm, média diária de 11/11/2011 a 20/11/2011 e 12,43 mm, média diária de 21/02/2012 a 29/02/2012.

A temperatura média (T , °C) para o talhão A observado manteve-se entre 19 e 25 °C (Figura 62). As imagens de ET_0 e K_c foram submetidas à função “Evapotranspiração ($ET_c - ET_a$)”, gerando as imagens de Evapotranspiração da cultura (ET_c , mm). As imagens de ET_c para todo o Estado do Paraná encontram-se no Apêndice A.

O perfil de ET_c para o talhão A analisado pode ser observado na Figura 63, o CV médio para o perfil foi de 2,6 %, porém, com um CV de 42% entre os dias 25/09/2011 e 01/10/2011, devido à diferença nas datas de semeadura que afetam o K_c e, conseqüentemente, o ET_c .

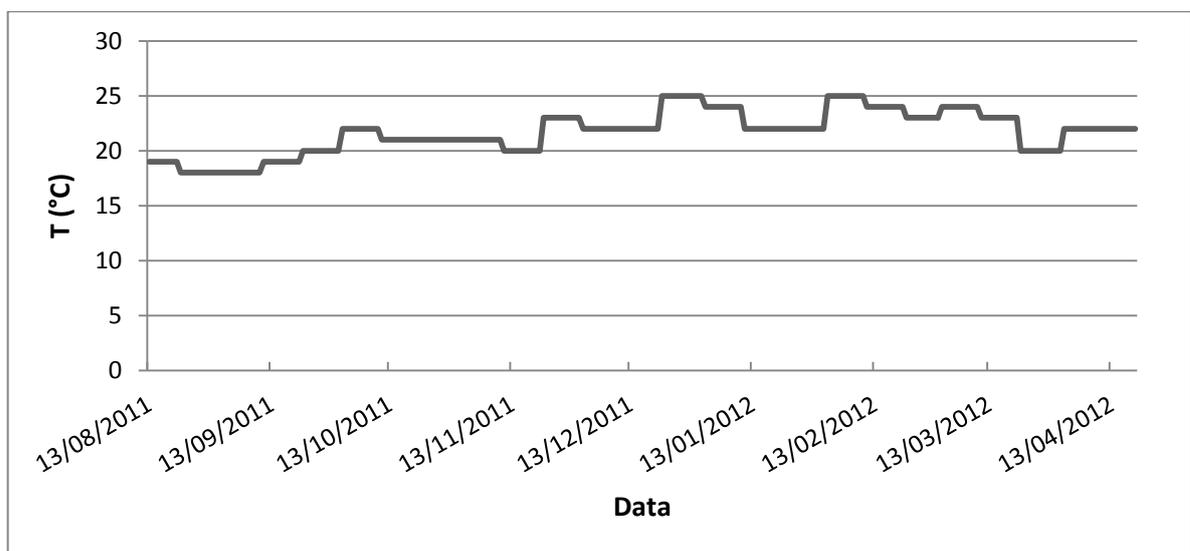


Figura 62 T média (°C) para o talhão A.

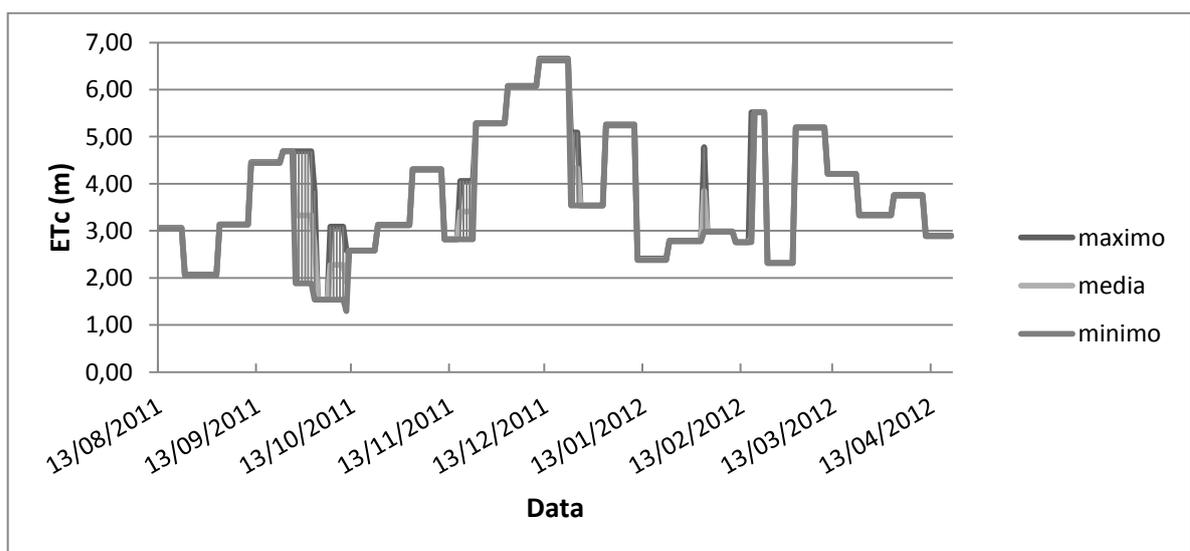


Figura 63 Perfil de ET_c para o talhão A.

As imagens de Zr foram submetidas à função “Capacidade hídrica (TAW-RAW)”, juntamente com o mapa CAD, gerando as imagens de TAW e RAW, que se encontram no Apêndice A.

Como a TAW e RAW dependem da CAD e do Zr e todos os pixels do talhão A analisado possuem o mesmo tipo de solo (CAD de 70mm), os CV médios da TAW e RAW mantiveram-se os mesmos do Zr (5,7%). A Figura 64 mostra o perfil de TAW e a Figura 65 mostra o perfil de RAW para o talhão A.

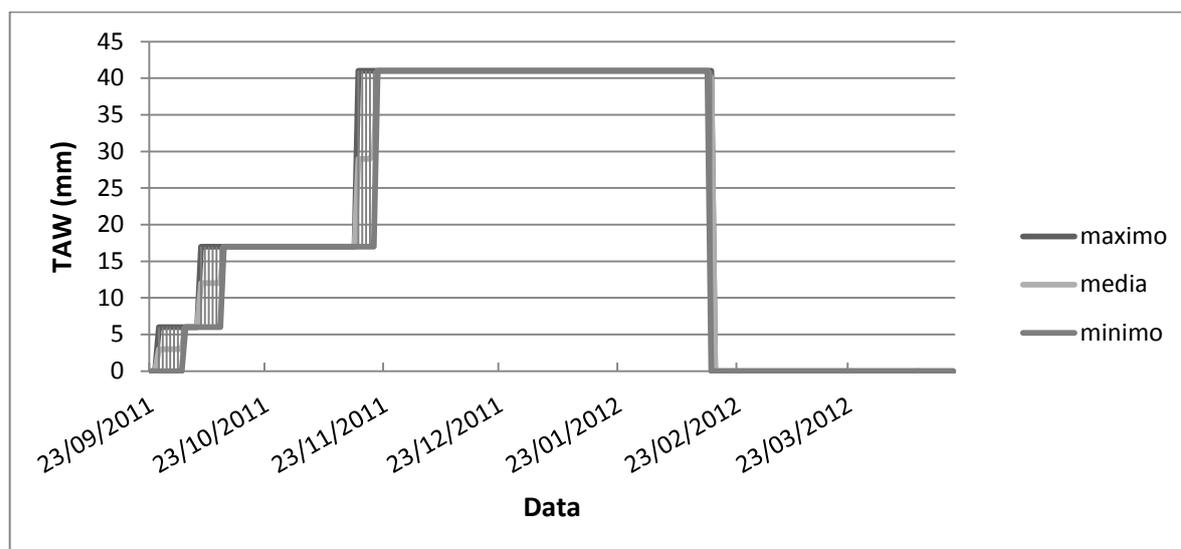


Figura 64 Perfil TAW para o talhão A - analisado.

Como a RAW é multiplicação do coeficiente de esgotamento p da cultura pela TAW e este coeficiente para a soja, segundo a FAO, é 0,5, a RAW é exatamente a metade da TAW (Figura 65).

A partir das séries de imagens de ETC, P, TAW e CAD, foi estimado o valor de esgotamento (D_r , mm), submetendo as séries de imagens à função “Calcular esgotamento BHFAO (D_r)” e, assim, determinando o balanço hídrico. As imagens de D_r , da safra 2011/2012, de todo o Estado do Paraná, estão apresentadas no Apêndice A.

A Figura 66 contém o perfil de esgotamento (D_r , mm) para o talhão A analisado. Por sua definição (sessão 4.1.2.), o D_r é o acúmulo da diferença entre a evapotranspiração da cultura e a precipitação, tendo como limitador o zero e TAW (sem contar a percolação profunda e o escoamento superficial), apesar de o CV médio do perfil ser de 9% negativo, houve uma variação de 23 a 100%, entre os dias 26/11/2011 e 20/12/2011. Isso aconteceu porque o Zr foi definido por estágio fenológico e a mudança ocorreu justamente em dias nos quais a precipitação foi alta (14 mm dia). Como houve sete dias de diferença na estimativa de data de semeadura, metade da área do talhão teve sua TAW aumentada de 17 mm para 41 mm em um dia, e pode ter acumulado a precipitação advinda da densa chuva, enquanto o resto do talhão ficou limitado à TAW do estágio fenológico anterior (17 mm). Isso indica

que, para o modelo diário de balanço hídrico, os valores de Zr devem ser calculados para cada dia e não por estágio fenológico.

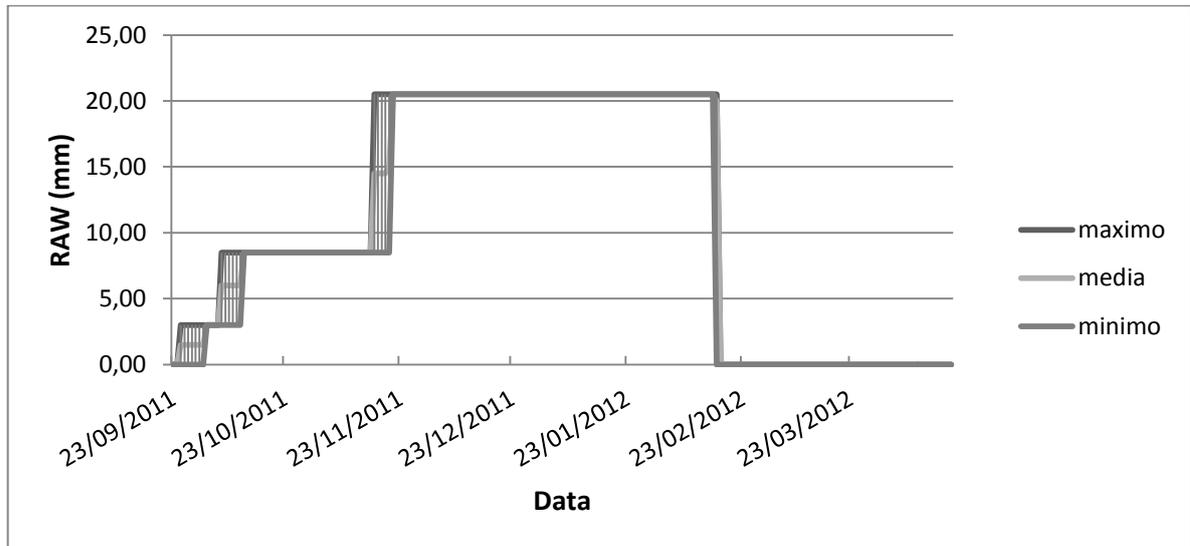


Figura 65 Perfil RAW para o talhão A.

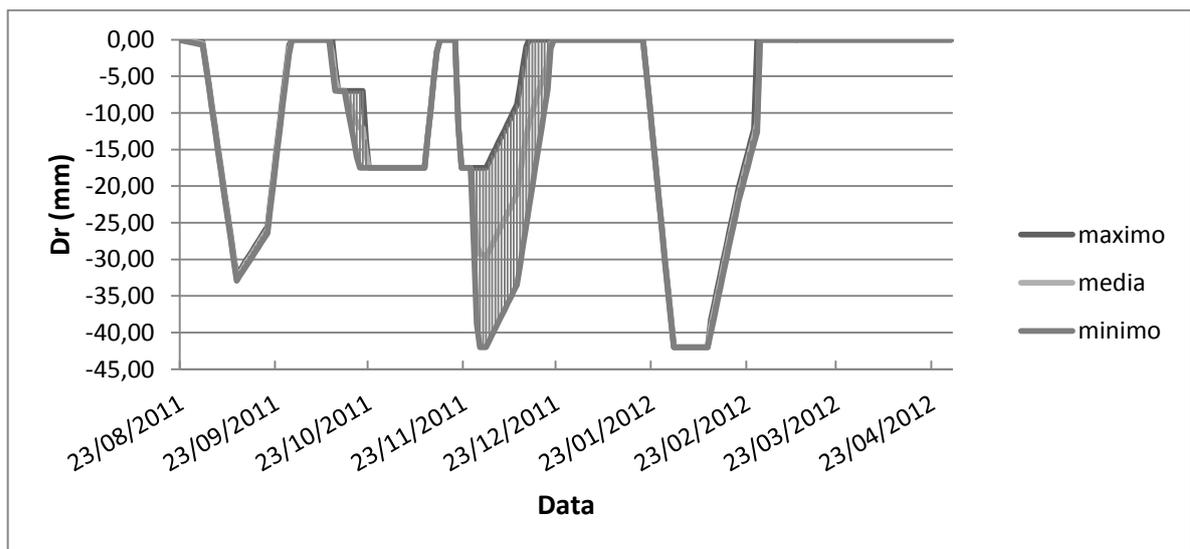


Figura 66 Perfil Dr para o talhão A.

O gráfico de perfil (Figura 67) mostra a interação entre a precipitação (P , mm) e a evapotranspiração da cultura (ET_c , mm) com valor de esgotamento (Dr , mm), tendo a TAW como limitante negativa para Dr . Os valores apresentados nesse gráfico são as médias das variáveis do talhão A analisado, apresentados apenas nas datas em que a cultura ficou em campo.

As séries de imagens de Dr , RAW e TAW foram submetidas à função “Fator de estresse hídrico da cultura (K_s)”, gerando a série de imagem de K_s . As imagens de K_s diárias para todo o Estado do Paraná estão apresentadas no Apêndice A.

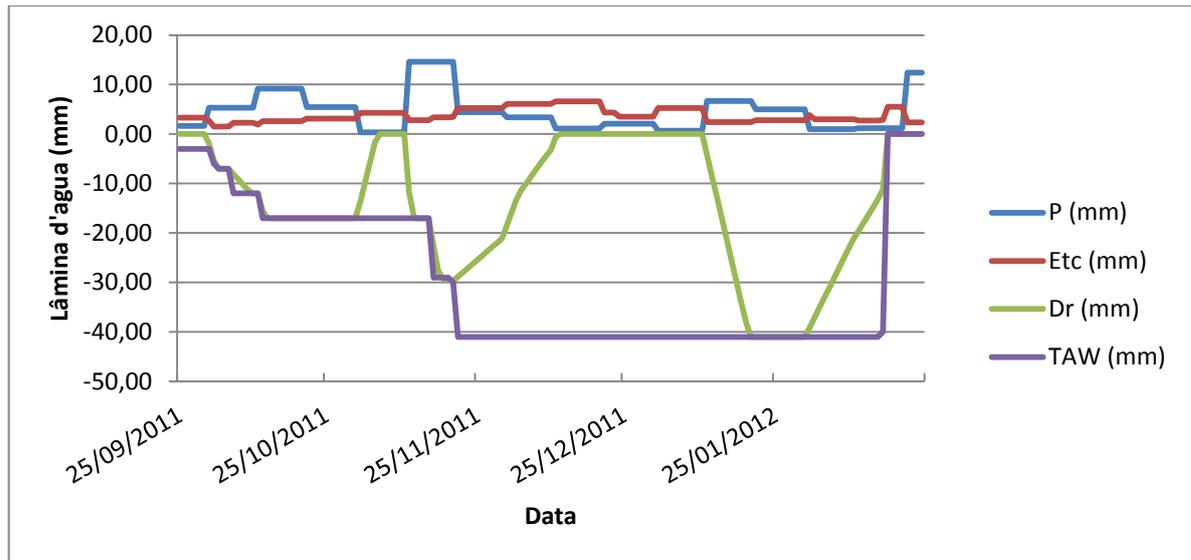


Figura 67 Iteração do balanço hídrico para o talhão A.

O perfil de K_s para o talhão A selecionado pode ser observado na Figura 68. Os valores de K_s variam de 0 a 1, sendo 0 quando a cultura não está sob estresse e 1 quando totalmente sob estresse. É possível, portanto, observar vários períodos de estresse para o talhão analisado.

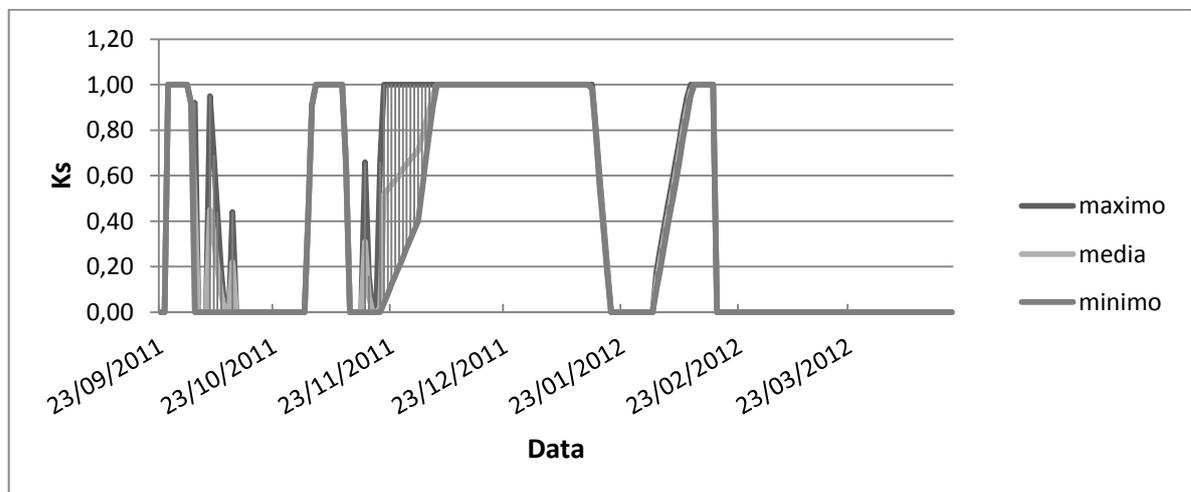


Figura 68 Perfil de K_s para o talhão A.

Para o resto do Estado do Paraná o cenário não foi muito diferente, as chuvas constantes, de 01/10/2011 a 31/10/2011 (em média 5 mm/dia), foram bem distribuídas abrangendo todo o Paraná, enquanto o período de seca de 11/12/2011 a 10/01/2012 levou o as plantações de todo o Estado à um estresse hídrico, como mostrado nas Figuras 69 e 70.

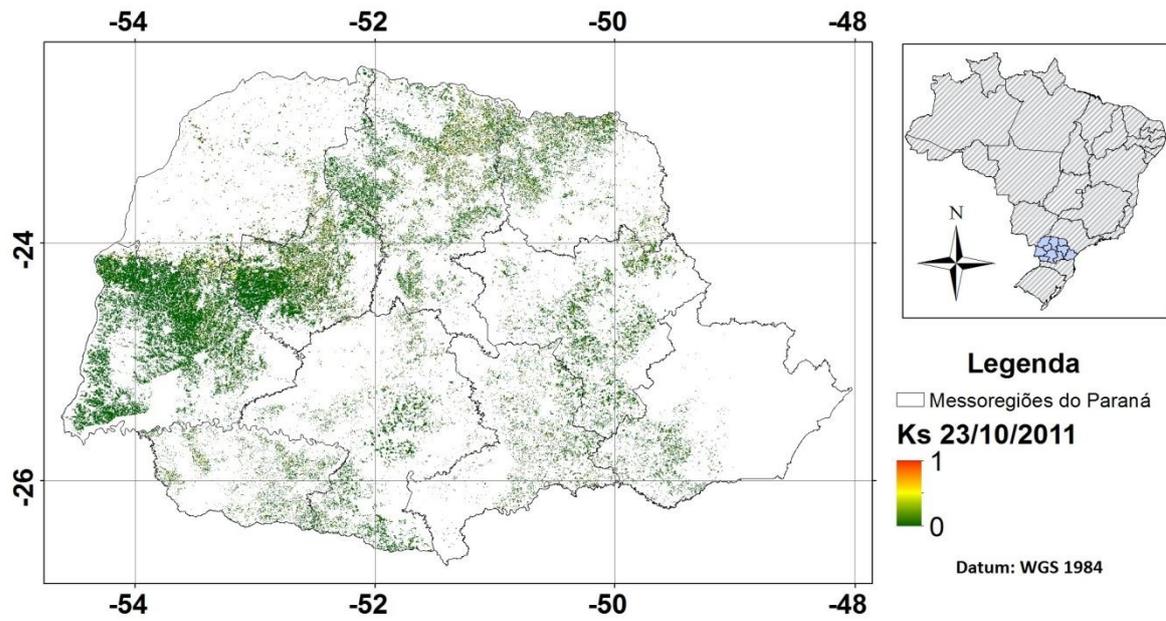


Figura 69 Ks para a safra 2011/2012 - dia 23/10/2011.

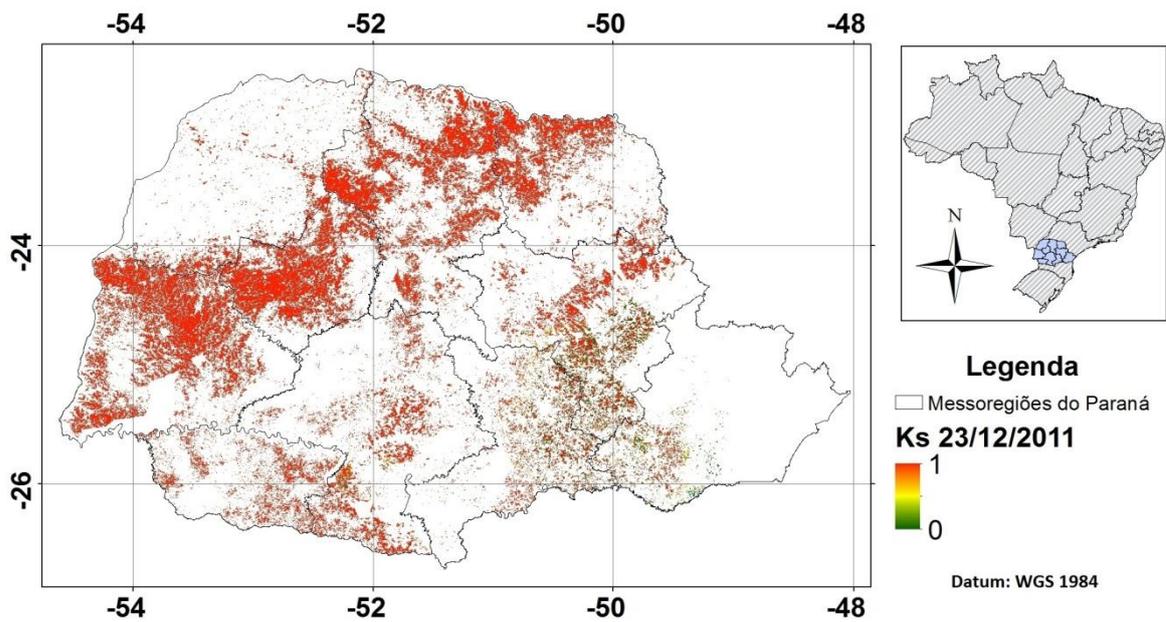


Figura 70 Ks para a safra 2011/2012 - dia 23/12/2011.

As imagens diárias de Ks e ETc foram então submetidas à rotina “Evapotranspiração ETc-ETa”, utilizando a opção “ETa (FAO)”, gerando as imagens de evapotranspiração real (ETa, mm). O perfil de ETa para o talhão A analisado pode ser observado na Figura 71.

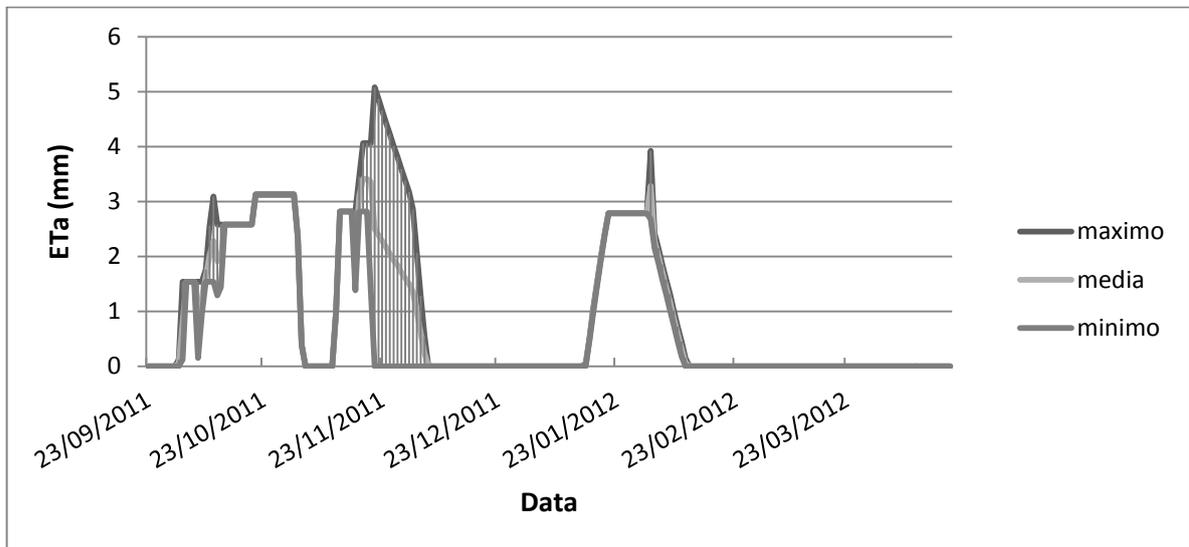


Figura 71 Perfil ETa para o talhão A.

Houve um CV de 10% ao longo do perfil, como já era esperado. As maiores variações entre os pixels de um mesmo dia aconteceram nos dias de mudança de estágio fenológico, chegando a um CV de mais de 100% entre os dias 22/11/2011 e 04/12/2011, indicando, mais uma vez, que os índices Kc e Zr devem ser calculados pra cada dia e não por estágio.

A partir da série de imagens de temperatura foram geradas as imagens de Produtividade potencial bruta (PPB, kg/ha), por meio da função “Produtividade potencial bruta (PPB)”. Como a PPB depende da latitude, da temperatura e do dia do ano e não houve variação para a temperatura em um mesmo dia no talhão A analisado, também não houve variação de PPB para um mesmo dia nos pixels do talhão analisado (Figura 72).

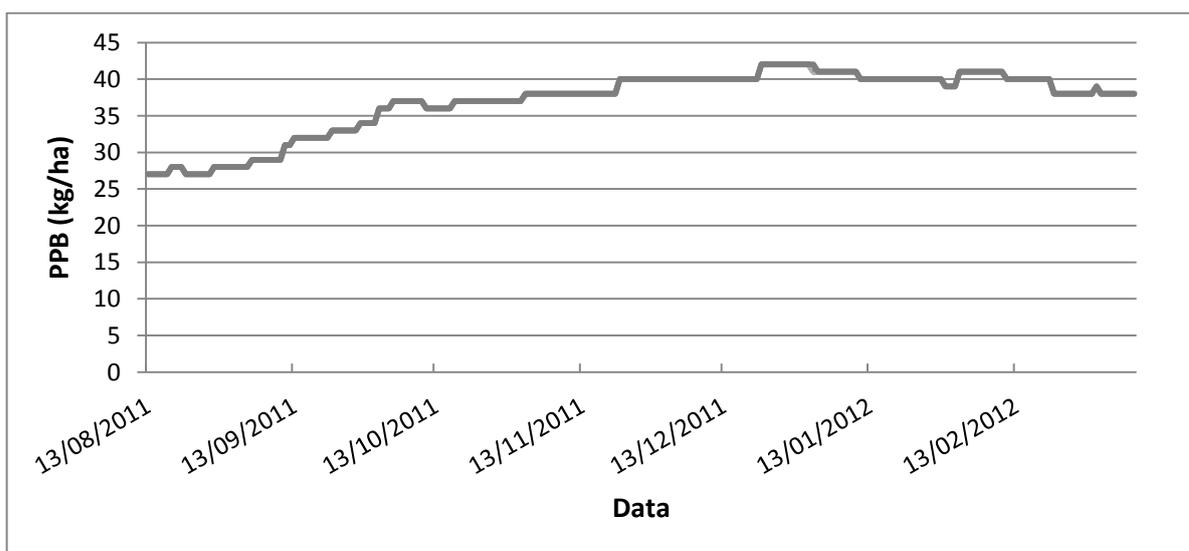


Figura 72 Perfil PPB para o talhão A analisado.

As séries de imagens de ETa, ETc, PPB e Kc foram submetidas à função “Produtividade Atingível (Ya)”, gerando as imagens de produtividade atingível (Ya, kg/há⁻¹) para todo o Estado do Paraná (Apêndice A).

O perfil de ETa para o talhão A analisado pode ser observado na Figura 73.

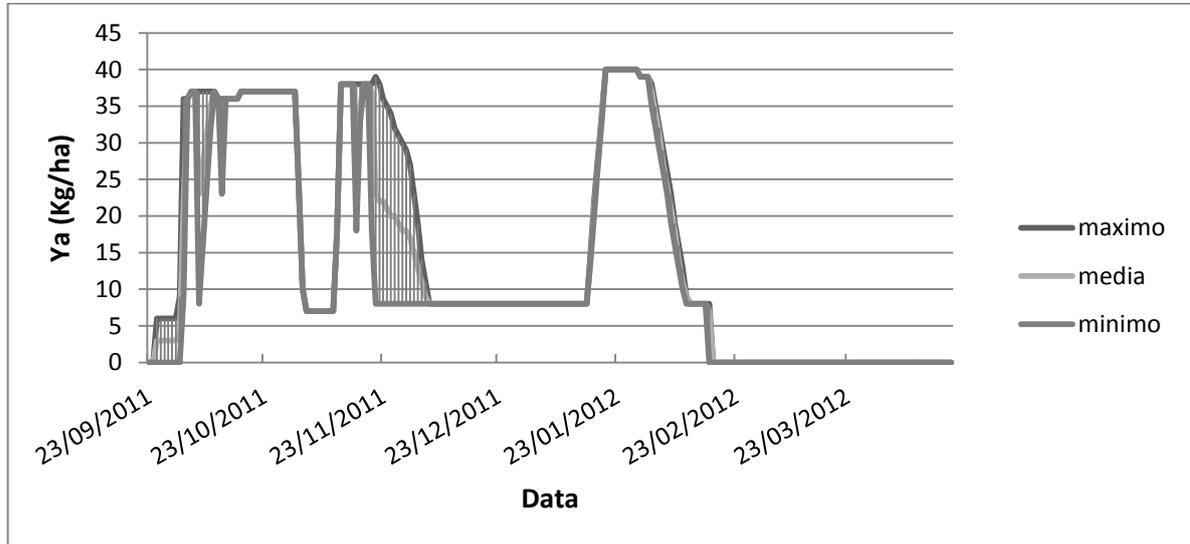


Figura 73 Perfil de Ya (kg/ha) para o talhão A analisado.

As séries de imagens de ETa foram submetidas à rotina “Estatísticas descritivas, (perfil)”, utilizando a estatística soma e gerando a imagem de produtividade total para cada pixel da máscara de soja no Estado do Paraná. A Figura 74 contém a imagem de soma da produtividade atingível para o talhão A analisado e a Figura 75 a soma de produtividade atingível total para todo o estado.

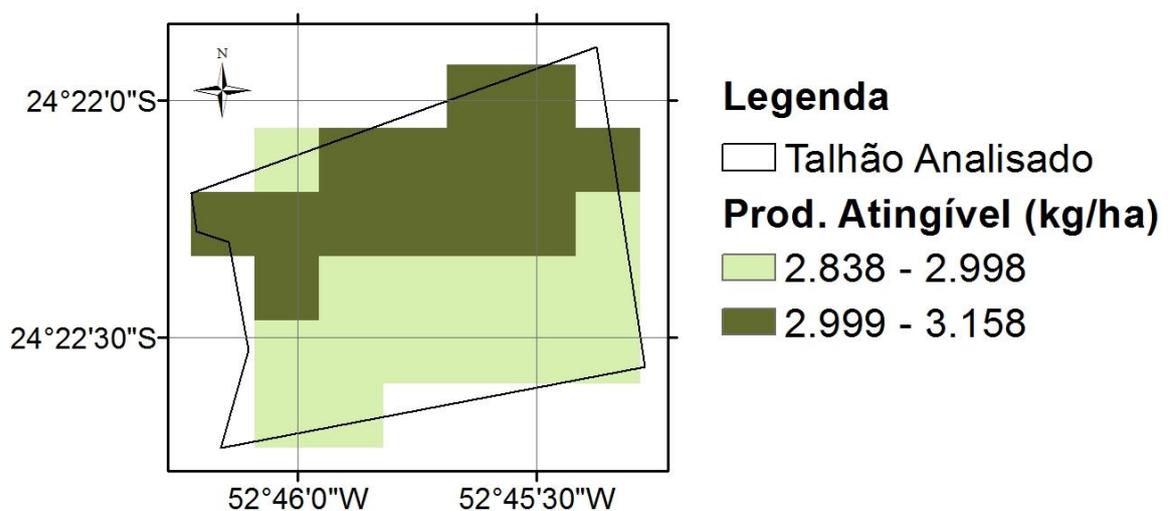


Figura 74 Produtividade atingível do talhão A analisado - safra 2011/2012.

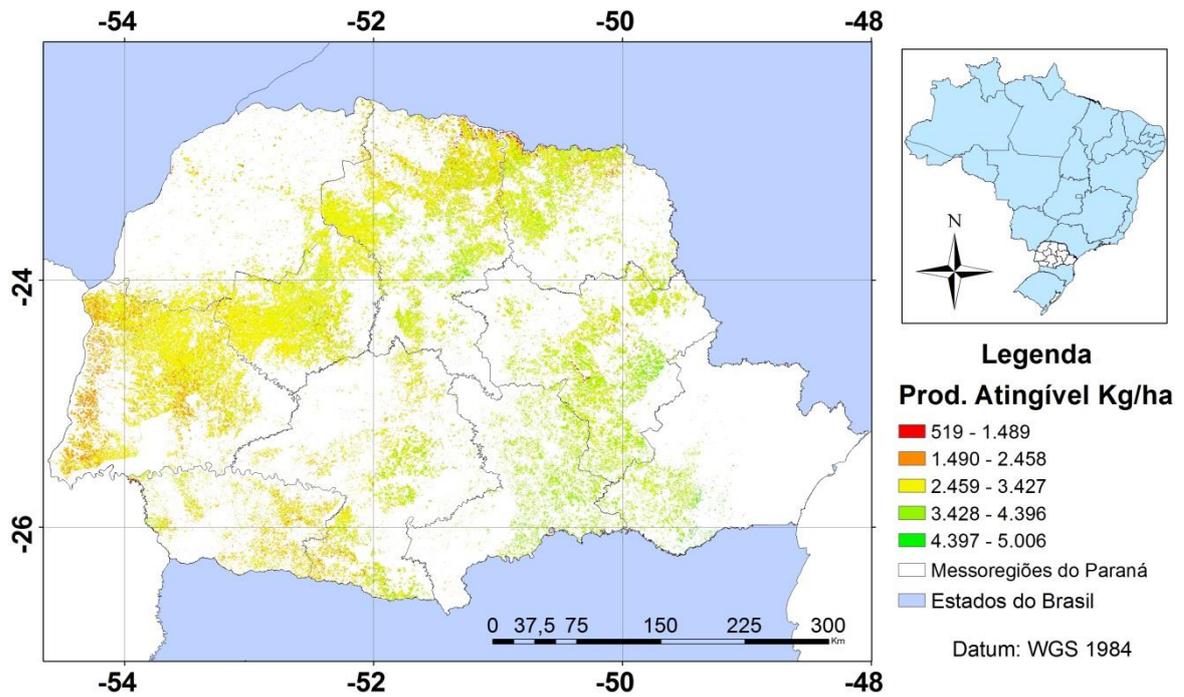


Figura 75 Produtividade atingível (kg/ha) - safra 2011/2012.

No histograma (Figura 76) é possível observar a distribuição de frequência da produtividade estimada para o estado (Figura 75). A maior parte das estimativas está concentrada entre 2 e 4 mil kg ha^{-1} .

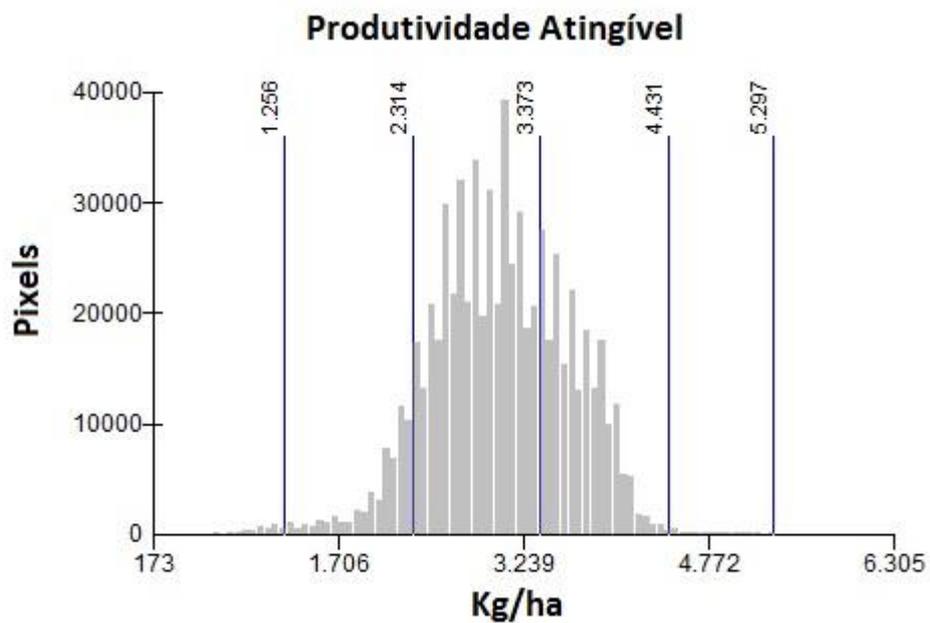


Figura 76 Histograma de frequência da produtividade atingível - safra 2011/2012.

A média de produtividade atingível para o Estado (Figura 76) ficou 25% maior que o informado pelos os dados oficiais (CONAB, 2013) e 15% menor que o estimado por Richetti (2015), que usou a mesma base de dados usada neste trabalho, entretanto, estimada para cada estação virtual do ECMWF e, posteriormente, interpolada para se obter o mapa de produtividade para todo o Estado. Em termos de variabilidade, o desvio padrão de 560,18 kg ha⁻¹ foi muito próximo ao encontrado neste trabalho que foi de 576 kg ha⁻¹ (Tabela 4).

Tabela 4 Média de produtividade atingível (Ya) estimada, produtividade estimada por Richetti e produtividade oficial para o estado para a safra 2011/2012

| | Ya médio (kg ha ⁻¹) | Desvio Padrão (kg ha ⁻¹) | Mínimo (kg ha ⁻¹) | Máximo (kg ha ⁻¹) |
|------------------|------------------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|
| FAO diário | 3.062 | 576 | 195 | 5.297 |
| Richetti (2015)* | 3.622 | 560 | 2.193 | 5.987 |
| Conab (2013)** | 2.453 | | | |

Notas: * Obtido de Richetti (2015);

** Obtido de Conab (2013).

Com o objetivo de comparar a produtividade estimada pelo *software* CyMP com dados reais de campo, foram utilizados os dados do talhão B. Entretanto, neste caso, a produtividade estimada foi interpolada para uma resolução de 25 m (Figura 77A) e comparada com a produtividade obtida em campo no talhão B (também interpolada para 25 m, Figura 77B), para o mesmo ano-safra, a fim de comparar a produtividade estimada com produtividade real (mapa de diferença da estimativa menos os dados de campo, Figura 77C). Para todo o talhão a produtividade média real de campo e a estimada pelo CyMP (Tabela 5) foi praticamente a mesma. As maiores divergências (Tabela 5) foram observadas na produtividade mínima (superestimação de 33%) e no desvio padrão (34%), que podem ser explicadas pela existência de pontos discrepantes nos próprios dados coletados a campo (Figura 77B).

Tabela 5 Estatísticas descritivas para a produtividade estimada, produtividade de campo e diferença entre a produtividade estimada e a produtividade de campo

| | Mínimo (kg ha ⁻¹) | Máximo (kg ha ⁻¹) | Média (kg ha ⁻¹) | Desvio Padrão (kg ha ⁻¹) |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---|
| Prod. Estimada | 2013 | 3075 | 2473 | 168 |
| Prod. real de campo | 1517 | 3583 | 2440 | 256 |
| Diferença* | -496 | 508 | 33 | 88 |
| Diferença (%) | -33 | 14 | -1 | 34 |

Nota: * Produtividade estimada pelo CyMP – produtividade real de campo.

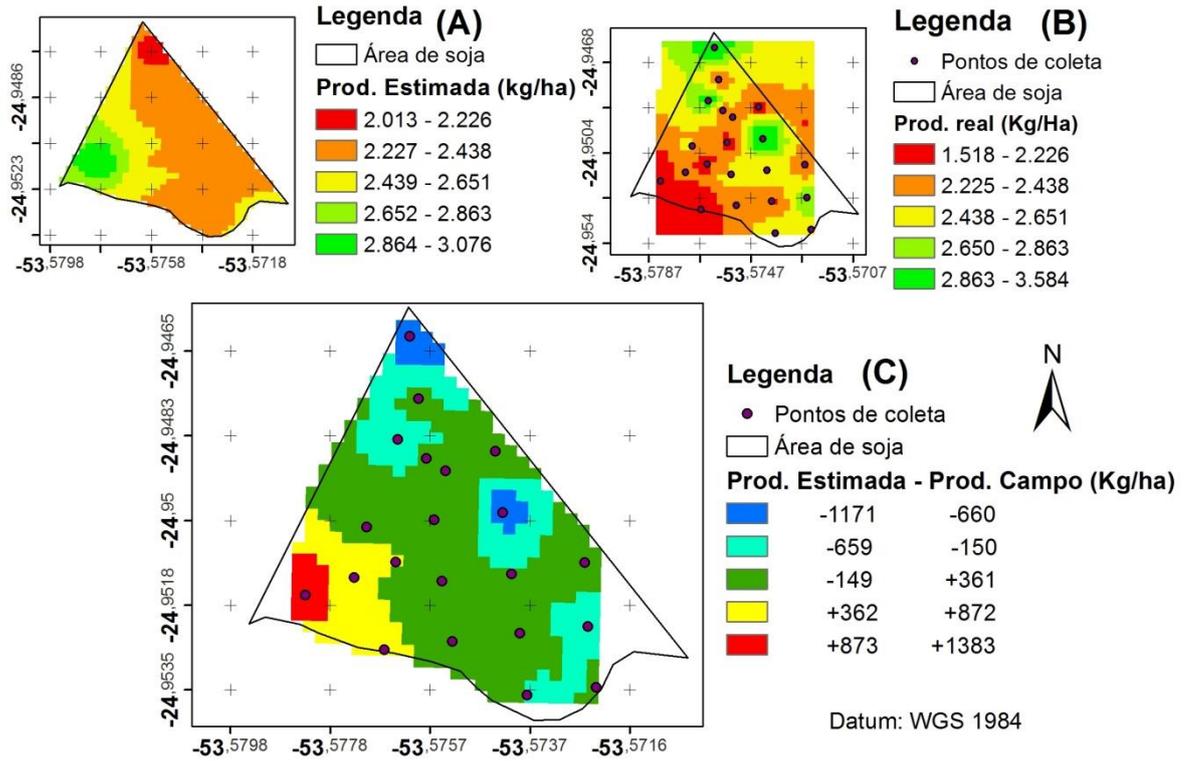


Figura 77 Produtividade estimada, produtividade real e diferença entre a produtividade real e a produtividade estimada.

6 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido resultou na produção do *software Crop-yield Modeling Platform* – CyMP versão 1.0.1, uma plataforma de modelagem/simulação de produtividade dotada de recursos de geoprocessamento e ferramentas que permitem trabalhar dados matriciais e vetoriais georreferenciados para filtrar, interpolar e ajustar resoluções temporais.

Utilizando as ferramentas desenvolvidas no *software* desenvolvido (CyMP V1.0.1) foi possível realizar, de forma objetiva e otimizada, os seguintes procedimentos:

- estimar as datas de semeadura, máximo desenvolvimento vegetativo e colheita para a cultura da soja.
- distribuir os índices Kc e Zr da soja por estádios fenológicos de forma espacial (250 m), temporal (diário) e proporcional à estadia da cultura.
- implementar o modelo de balanço hídrico FAO (BHFAO), que permitiu estimar o fator de estresse hídrico da cultura da soja, estimar a evapotranspiração real da cultura e determinar o balanço hídrico da cultura de interesse com uma resolução temporal diária e espacial de 250 m e de execução automatizada.
- implementar o modelo de produtividade FAO (ALLEN *et al.*, 1998), que permitiu estimar a Produtividade Potencial Bruta (PPB) e a produtividade Atingível (Ya), com uma resolução temporal diária e de execução automatizada, estimando a produtividade atingível apenas por meio de imagens e índices relativos à cultura com uma resolução espacial de 250 m.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema CyMP V1.0.1 representa uma alternativa vantajosa, pois reúne diversas ferramentas em um único *software*, que é especializado para tal fim. Isso diminui o conhecimento necessário para que o pesquisador realize os procedimentos necessários, porquanto não precise aprender a utilizar diversos *softwares*, o que antes era necessário. Porém, o estudo de caso mostrou que o *software* em sua versão 1.0.1 não apresenta total independência, ou seja, a implementação de novos recursos ao sistema, como o filtro *Flat Smother Filter*, ainda é necessária para que o mesmo torne-se totalmente independente de outros sistemas.

REFERÊNCIAS

- ABREU F. B.; GOULÃO, M.; ESTEVES, R. Toward the design quality evaluation of object-oriented software systems. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE QUALITY* m 5., 1995, Austin, Texas. **Proceedings...** Austin, Texas. out. 1995. P. 23-26.
- ACOCK, B.; ACOCK, M. C. Potential for using long-term field research data to develop and validate crop simulators. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83 n. 1, p. 56-61, 1991.
- AGOSTINI, M. N.; DECKER, I. C.; SILVA, A. S. Desenvolvimento e implementação de uma base computacional orientada a objetos para aplicações em sistemas de energia elétrica. **Sba Controle & Automação**, Campinas, v.13, n. 2 p. 181-189, 2002.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Irrigation and drainage. Paper FAO-56. Rome, ISBN 92-5-104219-5, 1998.
- ARAÚJO, M. A.; SOUZA, J. L. M. DE; TSUKAHARA, R. Y. Modelos agro-meteorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 23–31, 2011.
- BALTHAZAR, G. R.; GUIMARAES, F. M. R.; PAULA, M. M. V.; LOVISI FILHO, E. Uma abordagem prática sobre a aplicação do padrão MVC com o framework Struts. **Revista Eletrônica da Faculdade Metodista Granbery**, Juiz de Fora, v. 1, p. 1, 2007.
- BECKER, W. R.; PRUDENTE, V. H. R.; JOHANN, A. J.; RICHETTI, J.; MERCANTE, E. Obtenção de dados espaciais e temporais das culturas agrícolas no estado do Paraná. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 17., 25 a 29 de abril 2015. João Pessoa-PB. **Anais...** João Pessoa-PB: INPE, Brasil, 2015. p. 3281 – 3288.
- BEN MECHLIA, N.; CARROLL, J. J. Agroclimatic modeling for the stimulation of phenology, yield and quality of crop production. I. Citrus response formulation. **International Journal of Biometeorology**, New York, v. 33, n. 1, p. 36-51, 1989.
- BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Soybean yield estimation by an Agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, v. 60, n.3, p.433-440, Jul./Sept. 2003.
- BOUMAN, B.A.M.; SCHAPENDONK, A.H.C.M.; STOL, W.; VAN KRAALINGEN, D.W.G. **Description of the growth model LINGRA as implemented in CGMS**. *In: Quantitative approaches in systems analysis*. Wageningen: European Commission, Production Ecology and AB-DLO; Wageningen University and Research Centre, 1996. p. 11-22.
- CAMARGO, A. P.; PEREIRA, A. R. Agrometeorology of the coffee crop. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, **Agricultural Meteorology**, Report 58, p. 63 1994.
- CAMPBELL, J. B.; WYNNE, R. H. **Introduction to remote sensing**. New York: Guilford Press, 2011.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, décimo primeiro levantamento, agosto, 2014**, Brasília: Conab, 2014

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira:** grãos, nono levantamento, junho 2013, Brasília: Conab, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira:** grãos, nono levantamento, junho, 2015, Brasília: Conab, 2015.

CORAL, A.; ASSAD, E.; PINTO, H.S.; IAFFE, A. Utilização de um modelo agrometeorológico na estimativa de produtividade da cultura da soja no estado do Paraná. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas/SP. **Anais...** Campinas: SBA, 2005. 1 CD-ROM.

COUTO JUNIOR *et al.* Tratamento de ruídos e caracterização de fisionomias do cerrado utilizando séries temporais do sensor MODIS. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, p. 699-705. 2011.

DELÉCOLLE, R.; MAAS, S. J.; GURRIT, M.; BARET, F. Remote sensing and crop production models: present trends. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 47, p. 145-161, 1992.

ECLIPSE. **Página principal.** Disponível em: <https://eclipse.org/>. Acesso em: 15 dez. 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Parâmetros técnicos relacionados ao manejo e conservação do solo, água e vegetação perguntas e respostas.** Rio de Janeiro, 2004. 16 p. (Comunicado Técnico n. 28). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/88978/1/comtec28-2004-parametros.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **O novo mapa de solos do Brasil:** legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

ESQUERDO, J.C.D.M.; ZULLO JUNIOR, J.; ANTUNES, J.F.G. Use of NDVI/AVHRR time series profiles for soybean crop monitoring in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 3711-3727, 2011.

EUROPE CENTRE MEDIUM RANGE WEATHER FORECASTS - ECMWF. **Página principal.** Disponível em: <http://www.ecmwf.int/>. Acesso em: 29 maio 2015.

FARIA, R. T. de; RIBAS, A.F.; CHIBANA, E.Y. ADAME, M.; DEPPE, F.; GOMES, C.D. Estimativa da produtividade de soja no Paraná usando o sistema PrevSafras. *In*: XXXV CONBEA, 2006, João Pessoa. **Anais...**, XXXIII Conbea. Jaboticabal-SP: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2006. v. CDRom, p. 1310-1313.

FERNANDES, J. L. ; ROCHA, J. V. ; LAMPARELLI, R. A. C. Sugarcane yield estimates using time series analysis of spot vegetation images. **Scientia Agricola**, v. 68, p. 139-146, 2011.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Crop evapotranspiration.** Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage. Paper 56. Rome, ISBN 92-5-104219-5, 1998.

GAMMA, E.; HELM, R.; JOHNSON, R.; VLISSIDE, J. **Design patterns:** elements of reusable object-oriented software. Westford, Massachusetts: Addison-Wesley Professional, 1994. 395 p.

GAMMA, E; HELM, R; JOHNSON, R; VLISSIDES, J. **Padrões de projeto**: soluções reutilizáveis de *software* orientado a objetos. Porto Alegre: Bookman, 2000.

GOMMES, R.: FAOINDEX, 1993, Version 2.1. Agrometeorology Group FAO. Rome.

GRZEGOZEWSKI, D. M.; BECKER, W. R.; JOHANN, J. A. *et al.* Uso de imagens de satélite para detecção de datas de semeadura, pico vegetativo e colheita das culturas do milho e soja na região Oeste do Paraná - Safra 2011/2012. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais....** 2013. Foz do Iguaçu. p. 8. p. 1610-1617.

HUETE, A. R. *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the Modis vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, n. 1, p. 195-213, 2002.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LEEUWEN, W. VAN. Modis vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis. **Environmental Sciences**, 1999. MODIS - NASA. Disponível em: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2015.

JOHANN, J. A. **Calibração de dados agrometeorológicos e estimativa de área e produtividade de culturas agrícolas de verão no Estado do Paraná**. 2012. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP 2012.

JOHANN, J. A.; BECKER W. R.; OPAZO, M. A. U.; 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. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal – SP, n. 36 p. 126-142, 2016.

JOINT RESEARCH CENTER - JRC. **Página principal**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc/>. Acesso em: 22 maio 2015.

JUNGES, A. H.; ALVES, G.; FONTANA, D. C. Estudo indicativo do comportamento do NDVI e EVI em lavouras de cereais de inverno da região norte do Estado do Rio Grande do Sul, através de imagens MODIS. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE. 2007. p. 241-248.

JUSTICE, C. O. *et al.* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1247, 1998.

KASSAM, A. H. **Net biomass production and yield of crops**. Present and potential land use by agro-ecological zones project. Rome: FAO, 1977.

LI, Q.; CHEN Y.; Unified modeling language: from requirements to realization. **Springer Berlin Heidelberg**, p. 209-224, quinta parte, 2009.

LUO, J.; YING, K.; HE, P.; BAI, J. Properties of Savitzky–Golay digital differentiators. **Digital Signal Processing**, n. 15, p. 122-136, 2005.

OBJECT MANAGEMENT GROUP - OMG. **OMG Unified Modeling Language™ (OMG UML)**. Superstructure 2.4.1. 2011. Disponível em: <http://www.omg.org/spec/UML/2.4.1/Superstructure/>. Acesso em: mar. 2015.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2015**. OECD, Paris, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-en. Acesso em: mar. 2015.

PALOSCHI, R. A. CECHIM JUNIOR, C. JOHANN, J. A. Geotecnologias e redes neurais artificiais para o mapeamento da cultura de cana-de-açúcar por meio de serie temporal de EVI no estado do Paraná. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, 2015, João Pessoa – PB. **Anais...** João Pessoa: **INPE**, 2015. p. 3875-3881.

PONTES, P. P. B. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio à previsão de safras de cana de açúcar. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 217-224.

REMBOLD F.; DELINCÉ J.; BOOGARD H.; BURGER A.; Spatial information systems in crop monitoring: developing new global models and sharing the data. GSDI-9 CONFERENCE. November 2006, Santiago, Chile. **Proceedings...** Santiago, Chile: JRC, 2006,

RICHETTI, J. A. **Uso de geotecnologias em modelos de estimativa de produtividade de soja no Estado do Paraná**. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Uniersidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2015.

RICHETTI, J.; JOHANN, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; BECKER, W. R.; PALUDO, A. Uso de dados de sensoriamento remoto do modelo ECMWF para geração de balanço hídrico do solo na região oeste do Paraná. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 2014. Campo Grande - MS. **Anais...** Campo Grande – MS: SBEA, 2014. p. 2011–2014. Disponível em: <<http://www.sbea.org.br/conbea/2014/anais/R0154-2.pdf>>. Acesso em: mar. 2015.

ROBERTSON, G. W. **Guidelines on crop-weather models**. Task force on crop-weather models. Geneva: World Meteorological Organisation, 1983.

ROCHA, L. A.; KHAN, A. S.; LIMA, P. V. P. S; SOUSA, E. P. A importância da política de inovação no desenvolvimento da agricultura brasileira. **Estudos Sociedade e Agricultura**, Rio de Janeiro, 2014. n. 2, v. 22, p. 224-246.

ROJAS, O. Operational maize yield model development and validation based on remote sensing and agro-meteorological data in Kenya. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 17, p. 3773–3793, 2007.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *In*: Earth Resources Technology Satellite, 1 Symposium, 3, Washington, 1973. **Proceedings...** Whashington: NASA, 1974. v. 1, p. 309 317.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on Agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v. 33, n. 3, p. 183-192, Sept. 1990.

RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; PREMERLANI, W. *et al.* **Modelagem e projetos baseados em objetos**. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, n. 36, p. 1627-1639, 1964.

SORIA-RUIZ, J.; FERNANDEZ-ORDONEZ, Y.; GRANADOS-RAMIREZ, R. Methodology for prediction of corn yield using remote sensing satellite data in Central Mexico. **Invest. Geog**, México, n. 55, p. 61-78, 2004.

SOUZA, C. H. W.; MERCANTE, E.; JOHANN, J. A.; LAMPARELLI, R. A.; URIBE-OPAZO, M. A. Mapping and discrimination of soya bean and corn crops using spectro-temporal profiles of vegetation indices. **Journal of Remote Sensing**, n. 36, p. 1809-1824, 2015.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; RAES, D. **Crop yield response to water.** irrigation and drainage. Paper 66. Rome: FAO, 2012.

SUPIT, I.; VAN DER GOOT, E. **Updated system description of the WOFOST crop growth simulation model as implemented in the Crop Growth Monitoring System – CGMS.** Applied by the European Commission. Netherlands: Treebook 7, ISBN 90-804443-8-3, Treemail Publishers, Heelsum. 2003. 120 p.

The Qt Company – Qt. **Página principal.** Disponível em: <http://www.qt.io/>. Acesso em: 15 dez. 2015.

TOWNSHEND, J. R. G.; JUSTICE, C. O. Towards operational monitoring of terrestrial systems by moderate-resolution remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, n. 83, p. 351-359, 2002.

VENNERS, B. **The making of Python.** A conversation with Guido van Rossum. Part I. Artima Developer, janeiro de 2003. Disponível em: <http://www.artima.com/intv/pythonP.html>. Acesso em: mar. 2015.

WARMERDAM, F. Open source approaches in spatial data handling. **Advances in Geographic Information Science**, v. 2, p. 87-104, 2008.

WOODS, A. **Medium-range weather prediction.** The european approach. New York: Springer-Verlag, 2006.

YU, F. *et al.* Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 1, p. 42-54, 2003.

APÊNDICE

APÊNDICE A – CyMP V1.0.1 E IMAGENS DO ESTUDO DE CASO

O Apêndice A está em formato digital, gravado em uma mídia física (DVD) que acompanha esta dissertação. Este apêndice contém o software Crop-yield Modeling Platform V1.0.1 e as imagens processadas em nas as etapas do estudo de caso.