

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
Programa de Pós-Graduação em
Computação Aplicada

Dissertação de Mestrado

**CROP ROTATION TOOL: UMA
FERRAMENTA MULTIPLATAFORMA
PARA SIMULAÇÃO DE SEQUÊNCIA
DE CULTIVOS NO DSSAT**

ALEX SEBEN DA CUNHA



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

**CROP ROTATION TOOL: UMA
FERRAMENTA MULTIPLATAFORMA PARA
SIMULAÇÃO DE SEQUÊNCIA DE CULTIVOS
NO DSSAT**

Alex Sebben Da Cunha

Dissertação apresentada como requisito parcial
à obtenção do grau de Mestre em Computação
Aplicada na Universidade de Passo Fundo.

Orientador: Prof. José Maurício Cunha Fernandes

Coorientador: Prof. Willingthon Pavan

Passo Fundo

2019

CIP – Catalogação na Publicação

C972c Cunha, Alex Sebben da
Crop Rotation Tool: uma ferramenta multiplataforma para
simulação de sequência de cultivos no DSSAT /Alex Sebben da
Cunha. – 2019.
63 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. José Maurício Cunha Fernandes.
Coorientador: Prof. Willingthon Pavan.
Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) –
Universidade de Passo Fundo, 2019.

1. Informática na agricultura. 2. Simulação (Computadores).
3. Engenharia de software. 4. Cultivos agrícolas. 5. JavaScript
(Linguagem de programação de computador). I. Fernandes,
José Maurício Cunha, orientador. II. Pavan, Willingthon,
coorientador. III. Título.

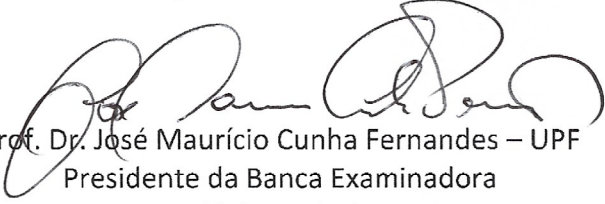
CDU: 004.4

Catálogo: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira – CRB 10/2427

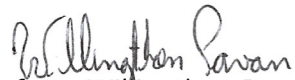
ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO ACADÊMICO

ALEX SEBBEN DA CUNHA

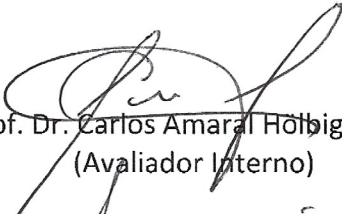
Aos dezoito dias do mês de novembro do ano de dois mil e dezenove, às 14 horas, realizou-se, no Instituto de Ciências Exatas e Geociências, prédio B5, da Universidade de Passo Fundo (UPF), a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso “Crop Rotation Tool: uma interface multiplataforma para simulação de sequência de cultivos no DSSAT”, de autoria de Alex Sebben da Cunha, acadêmico do Curso de Mestrado em Computação Aplicada do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – PPGCA. Segundo as informações prestadas pelo Conselho de Pós-Graduação e constantes nos arquivos da Secretaria do PPGCA, o aluno preencheu os requisitos necessários para submeter seu trabalho à avaliação. A banca examinadora foi composta pelos doutores José Maurício Cunha Fernandes, Willingthon Pavan, Carlos Amaral Hölbig e Genei Antônio Dalmago. Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a banca examinadora considerou o candidato APROVADO. Foi concedido o prazo de até quarenta e cinco (45) dias, conforme Regimento do PPGCA, para o acadêmico apresentar ao Conselho de Pós-Graduação o trabalho em sua redação definitiva, a fim de que sejam feitos os encaminhamentos necessários à emissão do Diploma de Mestre em Computação Aplicada. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da banca examinadora e pela Coordenação do PPGCA.



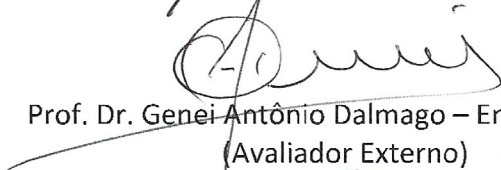
Prof. Dr. José Maurício Cunha Fernandes – UPF
Presidente da Banca Examinadora
(Orientador)




Prof. Dr. Willingthon Pavan – UPF
(Coorientador)



Prof. Dr. Carlos Amaral Hölbig – UPF
(Avaliador Interno)



Prof. Dr. Genei Antônio Dalmago – Embrapa Trigo
(Avaliador Externo)



Prof. Dr. Rafael Rieder
Coordenador do PPGCA

À minha esposa Maria Eliara pelo apoio e compreensão em todos os momentos. Aos meus pais Jairo e Rita pelo incentivo em toda minha caminhada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Jesus Cristo, em quem tenho fé, pela saúde, força, ânimo e coragem. Em segundo lugar agradeço à minha esposa Maria Eliara pelo apoio e compreensão em todos os momentos. Em terceiro lugar, agradeço aos meus pais Jairo e Rita pelo apoio, incentivo e investimento durante toda minha caminhada acadêmica. Também agradeço aos professores doutores José Maurício Cunha Fernandes e Willingthon Pavan pelas orientações e colaboração para o desenvolvimento do trabalho; ao professor doutor Carlos Amaral Holbig e ao doutor Genei Antônio Dalmago (Embrapa Trigo) pela avaliação, sugestões e colaboração para a melhoria do trabalho; a Jonas de Abreu Resenes pela colaboração com o trabalho; aos professores doutores Alexandre Tagliari Lazzaretti e Anubis Graciela de Moraes Rossetto pela carta de recomendação ao PPGCA; ao professor doutor Roberto Wiest pelas sugestões para melhoria do trabalho. Por fim, não poderia deixar de agradecer ao IFSul pela oportunidade que nos concede em realizar um projeto de capacitação com incentivo à qualificação; à UPF e ao PPGCA pela estrutura e organização do curso; à Embrapa Trigo pelo fornecimento dos dados para o estudo de caso; à Fundação DSSAT e ao doutor Gerrit Hoogenboom pela avaliação e sugestões para melhoria da ferramenta desenvolvida.

CROP ROTATION TOOL: UMA FERRAMENTA MULTIPLATAFORMA PARA SIMULAÇÃO DE SEQUÊNCIA DE CULTIVOS NO DSSAT

RESUMO

A previsão de riscos e benefícios decorrentes das práticas de manejo impostas ao sistema agrícola, em especial aquela que visa a sequência de cultivos e que também resulta na previsão do rendimento de grãos das culturas, tem sido demanda constante do setor do agronegócio. A aplicação de modelos de simulação em um sistema de sequência de cultivos é um esforço para auxiliar no entendimento dos fenômenos envolvidos nesse sistema de produção, com visão sistêmica. A utilidade prática dos modelos de simulação de culturas se dá com a integração desses em sistemas de suporte à tomada de decisão na agricultura, como é o caso do DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), o qual consegue contabilizar a disponibilidade de água e nitrogênio no solo entre uma cultura e outra, para a simulação de sequência de cultivos. Esse sistema possibilita a simulação, porém sua utilização é dificultosa mesmo para usuários experientes, haja visto que as ferramentas desenvolvidas não são amigáveis ao usuário e além disso estão disponíveis apenas para ambientes Windows. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta multiplataforma para a simulação de sequência de cultivos no DSSAT: a Crop Rotation Tool. Para o desenvolvimento da ferramenta proposta foram utilizadas tecnologias Web como HTML, CSS e JavaScript, e para a geração dos instaladores para Windows, Linux e MacOS foi utilizado o framework Electron. Para a integração da interface do usuário com o DSSAT, foi utilizado e expandido o módulo JavaScript jDSSAT para permitir a leitura, gravação e processamento de arquivos do DSSAT relacionados à sequência de cultivos. A ferramenta desenvolvida possibilita ao usuário, listar, criar, editar e configurar experimentos de sequência de cultivos de forma amigável, utilizando recursos arrasta e solta, bem como executar simulações de sequência de cultivos e visualizar os resultados por meio de gráficos interativos, possibilitando a comparação dos resultados simulados com os observados, tudo em uma mesma interface. Para a validação da ferramenta desenvolvida, realizou-se a simulação de um experimento real de sequência de cultivos, envolvendo três safras das culturas de trigo e soja, ocorrido de junho de 2015 a junho de 2018, em uma propriedade no sul do Brasil, onde foram coletados dados de solo, clima, crescimento e desenvolvimento dos cultivos. Através da coleta de dados e da utilização das ferramentas Crop Rotation Tool 1.2.5 e DSSAT 4.7.5, foi possível realizar a configuração e simulação do experimento de sequência de cultivos e a comparação dos resultados simulados com os observados.

Palavras-Chave: DSSAT-CSM, integração, JavaScript, jDSSAT.

CROP ROTATION TOOL: A MULTIPLATFORM TOOL FOR CROP SEQUENCE SIMULATION IN DSSAT

ABSTRACT

The prediction of risks and benefits arising from management practices imposed on the agricultural system, especially those aimed at the sequence of crops and which also results in the prediction of crop grain yield, has been a constant demand from the agribusiness sector. The application of simulation models in a crop sequence system is an effort to help in understanding the phenomena involved in this production system, with systemic view. The practical utility of crop simulation models is their integration into agricultural decision support systems such as the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT), which can account for water availability and nitrogen in the soil between one crop and another for the simulation of sequential crops. This system allows simulation, but its use is difficult even for experienced users, since the tools developed are not user friendly and are only available for Windows environments. The objective of this work was the development of a multiplatform tool for crop sequence simulation in DSSAT: the Crop Rotation Tool. For the development of the proposed tool were used Web technologies like HTML, CSS and JavaScript, and for the generation of installers for Windows, Linux and MacOS was used the Electron framework. To integrate the user interface with DSSAT, the jDSSAT JavaScript module was used and expanded to allow reading, writing and processing of DSSAT files related to crop sequence. The developed tool enables the user to list, create, edit and configure crop sequence experiments in a user-friendly manner using drag and drop capabilities, as well as perform crop sequence simulations and view results through interactive graphs, enabling comparison of the simulated results with the observed ones, all in the same interface. For the validation of the developed tool, a real experiment of sequence sequence was carried out, involving three harvests of wheat and soybean, from June 2015 to June 2018, in a property in southern Brazil, where data were collected on soil, climate, growth and crop development. Through the data collection and the use of Crop Rotation Tool 1.2.5 and DSSAT 4.7.5, it was possible to set up and simulate the crop sequence experiment and compare the simulated results with those observed.

Keywords: DSSAT-CSM, integration, JavaScript, jDSSAT.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	CROP ROTATION TOOL	17
2.1	RESUMO	17
2.2	MOTIVAÇÃO E SIGNIFICÂNCIA	17
2.3	TRABALHOS RELACIONADOS	18
2.4	DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA	19
2.4.1	Requerimentos Funcionais	19
2.4.2	Funcionalidades e Recursos	19
2.5	METODOLOGIA	21
2.6	IMPLEMENTAÇÃO TÉCNICA	22
2.6.1	HTML, CSS e JavaScript	22
2.6.2	Electron	23
2.6.3	jDSSAT	23
2.7	INSTALAÇÃO	23
2.7.1	Ambiente de Produção	24
2.7.2	Ambiente de Desenvolvimento	26
2.8	EXEMPLOS ILUSTRATIVOS	26
2.9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
3	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO TRIGO E SOJA EM CARAZINHO, RS, BRASIL	33
3.1	RESUMO	33
3.2	INTRODUÇÃO	33
3.3	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.3.1	Caracterização Experimental	35
3.3.2	Instalação e Manejo das Culturas	35
3.3.3	Coleta de Dados Fenológicos e Biométricos das Culturas Durante o Ciclo	38
3.3.4	Determinação do Rendimento e Componentes do Rendimento de Grãos	39
3.3.5	Monitoramento de Variáveis Ambientais	40
3.3.6	Caracterização Físico-hídrica e Química do Perfil de Solo	41
3.3.7	Medição de Variáveis Micrometeorológicas	43

3.3.8	Radiação PAR transmitida e refletida pelo dossel	43
3.3.9	Saldo de Radiação (Rn)	44
3.3.10	Temperatura da Superfície do Dossel	45
3.3.11	Perfil Vertical de temperatura, Umidade Relativa do Ar e Vento	45
3.3.12	Fluxo de Calor no Solo	46
3.3.13	Molhamento foliar	46
3.3.14	Fluxos de CO₂, Água e Calor	47
3.3.15	Monitoramento da Umidade do Solo	47
3.3.16	Períodos de Pousio entre os Experimentos	48
3.3.17	Análise de Dados	50
3.3.18	Simulação do Experimento na Crop Rotation Tool	51
3.4	RESULTADOS	52
3.4.1	Cenário 01: Grain wt kg/ha (Wheat 2015 x Wheat 2016 x Wheat 2017)	52
3.4.2	Cenário 02: Grain wt kg/ha (Soybean 2015/2016 x Soybean 2016/2017 x Soybean 2017/2018)	54
3.4.3	Cenário 03: Exploração de Dados Simulados	54
3.4.4	RMSE (Root Mean Square Error)	56
3.5	DISCUSSÃO	56
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
4	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

A previsão de riscos e benefícios decorrentes das práticas de manejo impostas ao sistema agrícola, em especial àquela que visa à sequência de cultivos e que também resulta na previsão do rendimento de grãos das culturas, tem sido demanda constante do setor do agronegócio. A geração de informações de base racional para orientar tomadas de decisão no processo produtivo é papel da pesquisa com enfoque sistêmico, onde o detalhado conhecimento sobre alternativas de manejo e de seus efeitos positivos e limitações, assumem papel fundamental.

Em muitos casos, a informação quantitativa sobre a produção da cultura é possível através de modelos de simulação de culturas [1]. A utilidade prática dos modelos de simulação de culturas se dá com a integração desses em sistemas de suporte à tomada de decisão na agricultura. A aplicação de modelos de simulação é um esforço para auxiliar no entendimento dos fenômenos envolvidos em um sistema de produção com visão sistêmica. Os modelos de simulação de culturas têm significado na transferência de novas tecnologias aos agricultores e tomadores de decisão.

Algumas ferramentas têm sido desenvolvidas ao longo dos anos, como a suíte de modelos do DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) [2], o qual consegue contabilizar a disponibilidade de água e nitrogênio no solo entre uma cultura e outra, para a simulação de sequência de cultivos. O sistema DSSAT engloba, além dos modelos de simulação de culturas, um sistema gerenciador de base de dados e um módulo de aplicativos, para a avaliação de estratégias tecnológicas, via simulações de longo prazo. O DSSAT é uma das ferramentas mais utilizadas mundialmente para a execução de modelos de simulação e pode ser realmente útil no auxílio à tomada de decisão para os pesquisadores, agentes de assistência técnica, seguro agrícola e até aos formadores de políticas públicas, principalmente, para responder perguntas dentro de um sistema de produção. Durante anos o DSSAT vem sendo personalizado e modificado por um conjunto melhor de modelos para representar um sistema ou simular uma ou mais culturas com uma abordagem de sistema baseada no solo e nas condições climáticas. O DSSAT tem sido amplamente utilizado para simular o rendimento de grãos das culturas de um sistema sob diferentes tipos de manejo, selecionando as melhores práticas e otimizando os recursos de produção de culturas sustentáveis com impacto mínimo no ambiente. Assim, é possível tomar a decisão certa com base no retorno econômico de um sistema e alterar as opções de manejo baseadas na variabilidade climática.

As ferramentas do DSSAT possibilitam a simulação, porém sua utilização é dificultosa mesmo para usuários experientes, haja visto que as ferramentas desenvolvidas não são amigáveis ao usuário e além disso estão disponíveis apenas para ambientes Windows. O desenvolvimento de uma ferramenta multiplataforma que possibilitasse aos usuários do DSSAT configurar e executar a simulação do crescimento e desenvolvimento de diferentes cultivos em sequência tornou-se necessário, pois do ponto de vista do usuário há uma grande demanda por aplicações multiplataforma no mercado. Já do ponto de vista econômico, a agricultura que se pratica hoje no Brasil, baseia-se no uso mais intensivo do solo onde dois ou até três cultivos ocorrem em sequência. Já sobre a interação do usuário

com a interface, aspectos de usabilidade como facilidade de aprendizagem, eficiência, facilidade de memorização e satisfação, são elementos importantes para a solução do problema. Além disso, uma ferramenta capaz de simular o crescimento e desenvolvimento de cultivos em sequência pode representar um avanço tecnológico para o produtor/setor produtivo.

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta multiplataforma para a simulação de sequência de cultivos no DSSAT. Os objetivos específicos:

- Desenvolver uma ferramenta compatível com os sistemas operacionais Windows, Linux e MacOS, utilizando tecnologias que possibilitem a otimização e o reaproveitamento do código-fonte para uma futura versão web da aplicação proposta;
- Integrar a ferramenta desenvolvida com os modelos de simulação do DSSAT para possibilitar a simulação de sequência de cultivos;
- Expandir o módulo JavaScript jDSSAT para ler, gravar e processar arquivos de dados do DSSAT relacionados à sequência de cultivos;
- Possibilitar em uma única interface a listagem, criação, edição e configuração de experimentos de sequência de cultivos, bem como a execução de simulações de sequência de cultivos, a visualização e comparação dos resultados simulados com os observados.

O Capítulo 2 deste trabalho apresenta uma visão geral do desenvolvimento e das funcionalidades da Crop Rotation Tool. O Capítulo 3 apresenta a simulação do sistema de produção trigo e soja em Carazinho, RS, Brasil, um estudo de caso real de um experimento de sequência de cultivos ocorrido de junho de 2015 a junho de 2018.

2. CROP ROTATION TOOL

2.1 RESUMO

O DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) é uma das ferramentas mais utilizadas mundialmente para a execução de modelos de simulação de culturas. Apesar de possibilitar a simulação, sua utilização é dificultosa, mesmo para usuários experientes, haja visto que as ferramentas desenvolvidas não são amigáveis ao usuário, e além disso, estão disponíveis apenas para ambientes Windows. O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de uma ferramenta multiplataforma para a simulação de sequência de cultivos no DSSAT: a Crop Rotation Tool. Para o desenvolvimento da ferramenta proposta foram utilizadas tecnologias Web como HTML, CSS e JavaScript, e para a geração dos instaladores para Windows, Linux e MacOS foi utilizado o framework Electron. Para a integração da interface do usuário com o DSSAT, foi utilizado e expandido o módulo JavaScript jDSSAT para permitir a leitura, gravação e processamento de arquivos do DSSAT relacionados à sequência de cultivos. A ferramenta desenvolvida possibilita ao usuário, listar, criar, editar e configurar experimentos de sequência de cultivos de forma amigável, utilizando recursos arrasta e solta, bem como executar simulações de sequência de cultivos e visualizar os resultados por meio de gráficos interativos, possibilitando a comparação dos resultados simulados com os observados, tudo em uma mesma interface.

2.2 MOTIVAÇÃO E SIGNIFICÂNCIA

A previsão de riscos e benefícios decorrentes das práticas de manejo adotadas em sistemas agrícolas, em especial aquela que visa a sequência de cultivos dentro de uma área e que impacta no rendimento de grãos das culturas, tem sido demanda constante do setor do agronegócio. A aplicação de modelos de simulação de culturas é um esforço para auxiliar no entendimento dos fenômenos envolvidos no sistema de produção com visão sistêmica e dimensionar a dinâmica dos riscos e benefícios associados à atividade agrícola. Os modelos de simulação de culturas usam descrições quantitativas dos processos ecofisiológicos para prever o crescimento e desenvolvimento das plantas, influenciados pelas condições ambientais e pelo manejo da cultura, que são especificados para o modelo como dados de entrada [3].

A modelagem de culturas tem sido usada principalmente como uma ferramenta de tomada de decisão para o manejo de culturas, mas a modelagem do crescimento e desenvolvimento das plantas, juntamente com a mudança nas características químicas, físicas e biológicas do solo em decorrência das espécies escolhidas para a sequência de culturas, também podem ser úteis para avaliar o sistema de produção [4].

Modelos de sistemas de cultivo bem testados que capturam as interações entre a água do solo e a dinâmica de nutrientes, o crescimento das culturas, o clima e o manejo do agricultor, podem

auxiliar na avaliação de novas práticas agrícolas e na tomada de decisão, à medida que possibilitam a estimativa de cenários distintos. Um destes modelos de sistemas de cultivo que podemos destacar é o *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* - DSSAT, o qual simula adequadamente culturas isoladas, e dispõe de recursos para simular sequências de culturas e/ou intervalos de pousio, considerando o efeito de culturas antecessoras sobre as culturas subsequentes. A solução ofertada busca facilitar esse aspecto e se constitui em um avanço significativo na compreensão de cenários complexos, concebidos sob visão sistêmica. A capacidade de simular sequências de cultivos pelo DSSAT aumenta a significância dos modelos de crescimento de culturas, como uma ferramenta para analisar as consequências de longo prazo das práticas de manejo em um local específico. Assim, os modelos podem ser usados de maneira mais segura, para prever mudanças e detectar tendências em indicadores biofísicos, como rendimento de grãos, absorção de nitrogênio, níveis de carbono do solo e lixiviação de nitrato.

No manuseio do DSSAT, a interface é dificultosa ao usuário, uma vez que sua operação requer um alto nível de conhecimento das informações de entrada. A interpretação dos dados gerados pelas simulações que serão usadas para apoiar a decisão é outro ponto que também requer atenção. Embora o DSSAT seja amplamente adotado, seu uso permanece principalmente no meio de pesquisadores e consultores com altos níveis de educação e treinamento. Algumas razões para a não adoção ou o uso a curto prazo são os altos níveis de expectativas por parte dos agricultores e a falta de facilidade de uso [5]. Além da interface do DSSAT ser dificultosa ao usuário, ela está disponível apenas para o sistema operacional Windows, o que deixa de lado potenciais usuários do Linux e MacOS. O presente trabalho propôs o desenvolvimento de uma ferramenta multiplataforma que possibilitasse aos usuários do DSSAT, configurar e executar a simulação do crescimento e desenvolvimento de diferentes cultivos em sequência, utilizando recursos arrasta e solta.

2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

Resenes [6] desenvolveu uma interface desktop multiplataforma para o DSSAT, nomeada de DSSAT Shell, utilizando o módulo jDSSAT, a biblioteca Electron e tecnologias Web como HTML, CSS e JavaScript.

DSSAT Lite é uma interface web para o DSSAT, desenvolvida por Resenes [7], através da reutilização do código-fonte da interface desktop desenvolvida (DSSAT Shell). Diferentemente da versão desktop, a versão web utiliza pastas temporárias para armazenar resultados de simulações, não impactando na sua utilização por diversos usuários.

Resenes [6] desenvolveu uma ferramenta para exibição de resultados de simulações realizadas pelo DSSAT Shell e pelo DSSAT Lite, através de gráficos, nomeada de Graph Builder. Ela é uma alternativa para a ferramenta GBuild do DSSAT.

2.4 DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA

2.4.1 Requerimentos Funcionais

- Responsiva: a interface da Crop Rotation Tool deve se adaptar a diferentes resoluções de tela;
- Multiplataforma: a interface da Crop Rotation Tool deve ser compatível com os sistemas operacionais Windows, Linux e MacOS.

2.4.2 Funcionalidades e Recursos

A Crop Rotation Tool deve possibilitar ao usuário:

- Listar experimentos de sequência ou rotação de culturas (arquivos .SQX) na interface;
- Carregar os dados de um experimento de sequência na interface;
- Criar e/ou editar um experimento de sequência na interface;
- Executar a simulação do crescimento e rendimento de diferentes cultivos em sequência;
- Visualizar os resultados de uma simulação de sequência em gráficos e tabelas e comparar com os resultados observados.

A tela inicial da interface, conforme visualizado na Figura 1, apresenta ao usuário alguns componentes e informações como:

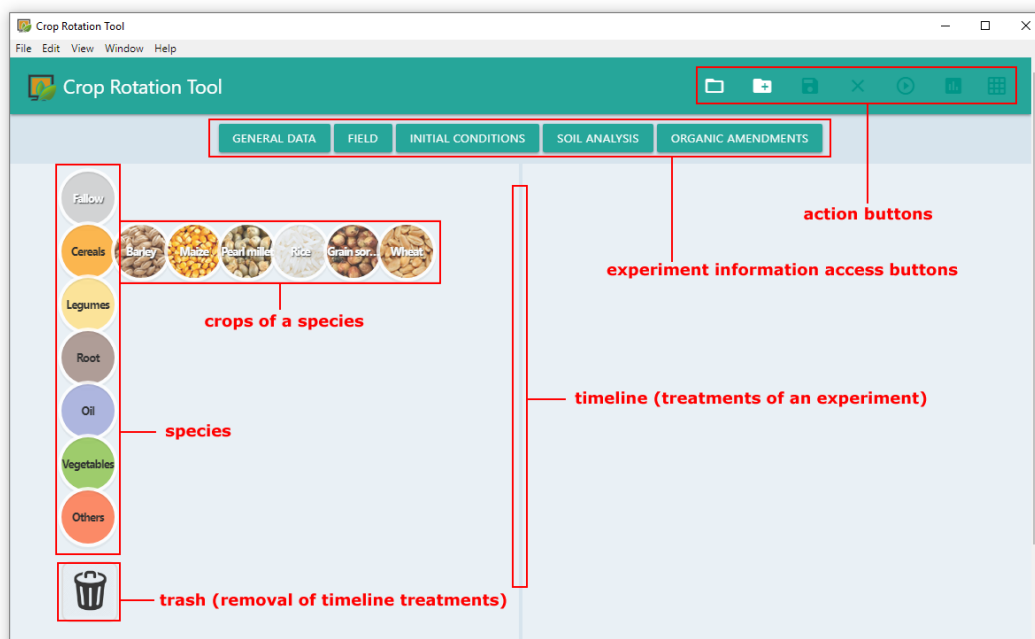


Figura 1. Tela inicial da interface e seus componentes.

- Botões de ação: abrir arquivo, novo arquivo, salvar arquivo, fechar arquivo, executar simulação, ver resultados;
- Botões de acesso às informações de um experimento: Dados gerais, campo, condições iniciais, análise do solo e material orgânico;
- Menu de espécies e culturas;
- Linha do tempo de tratamentos;
- Lixeira para remoção de tratamentos de um experimento.

A interface é responsiva e trabalha em 3 faixas de resolução para melhor se adaptar à resolução do dispositivo do usuário, conforme visualizado na Figura 2. São elas:

- *Small*: < 976px;
- *Medium*: >= 976px e <= 1150px;
- *Large*: > 1150px.

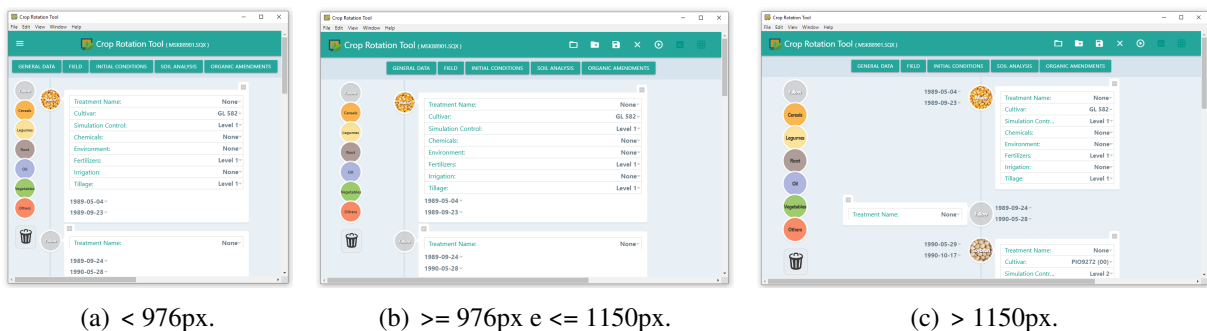
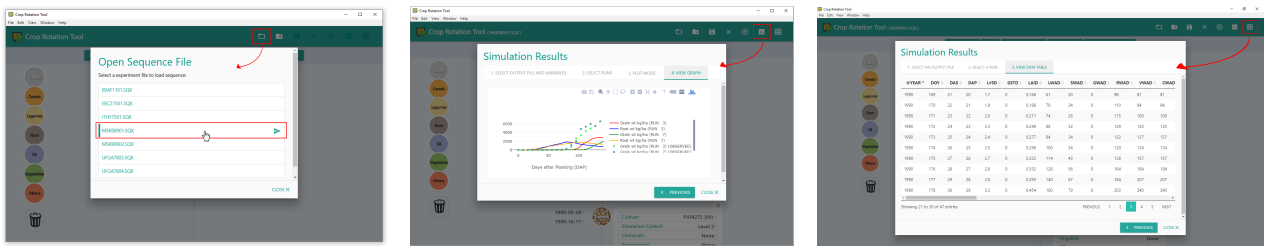


Figura 2. Apresentação da interface em diferentes faixas de resolução.

As janelas do tipo *modal* são utilizadas para visualizar e editar informações como: dados gerais do experimento, dados de campo, condições iniciais, análise do solo, material orgânico, dados de plantio e colheita, aplicações químicas, modificações no ambiente, fertilizantes, irrigação, preparação do solo, controles de simulação. As janelas do tipo *modal* ainda são utilizadas para listar os experimentos de sequência e para apresentar os resultados, conforme visualizado na Figura 3.

A interface utiliza ainda, recursos arrasta e solta (*drag and drop*) para ordenar e remover tratamentos de um experimento, o que proporciona ao usuário uma experiência mais amigável, conforme visualizado na Figura 4. A Figura 5 apresenta a estrutura HTML da linha do tempo de tratamentos, onde cada tratamento é identificado por um *id* único e uma *class*, assim como a linha do tempo. Ao ordenar um tratamento, por exemplo, a estrutura do HTML é alterada no DOM (Document Object Model). Ao salvar o experimento ou ao executar a simulação, a ferramenta irá fazer uma varredura nos elementos HTML da linha do tempo através dos atributos *class* e *id*, na ordem em que



(a) Janela: Lista de Experimentos.

(b) Janela: Gráfico de Resultados.

(c) Janela: Tabela de Resultados.

Figura 3. Janelas de edição e visualização estilo *modal*.

eles estão apresentados na interface. Através do atributo *id* de cada tratamento, é possível acessar os elementos filhos, como por exemplo, os campos *input* e *select*, e seus atributos (*value* por exemplo), podendo assim obter os códigos de acesso aos vetores e objetos que armazenam os dados de cada opção de configuração dos tratamentos, como *treatment name*, *cultivar*, *simulation control*, *chemicals*, *environment*, *fertilizers*, *irrigation*, *tillage*.

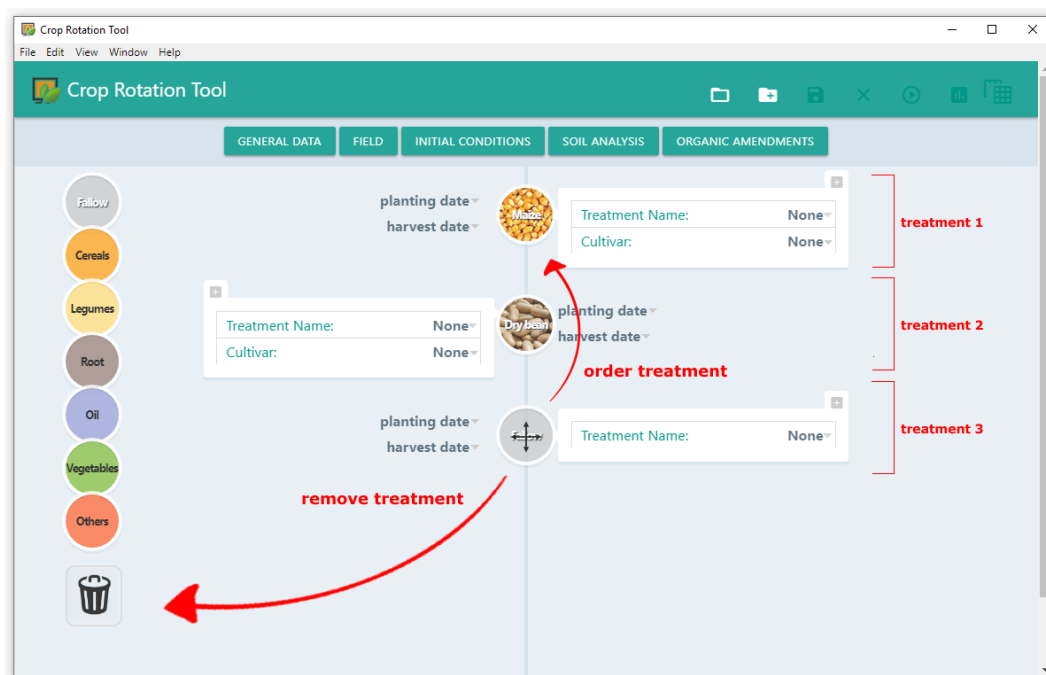


Figura 4. Utilização de recursos arrasta e solta (*drag and drop*).

A Tabela 1 apresenta um comparativo de características, funcionalidades e recursos entre a Crop Rotation Tool e as interfaces relacionadas, as quais inspiraram o desenvolvimento da mesma.

2.5 METODOLOGIA

A ferramenta foi projetada e desenvolvida utilizando uma adaptação do Scrum [8], uma metodologia ágil de gestão e planejamento de projetos de software, e o Kanban, o qual utiliza de cartões de sinalização para indicar o andamento dos fluxos e atividades, por exemplo: "a fazer",

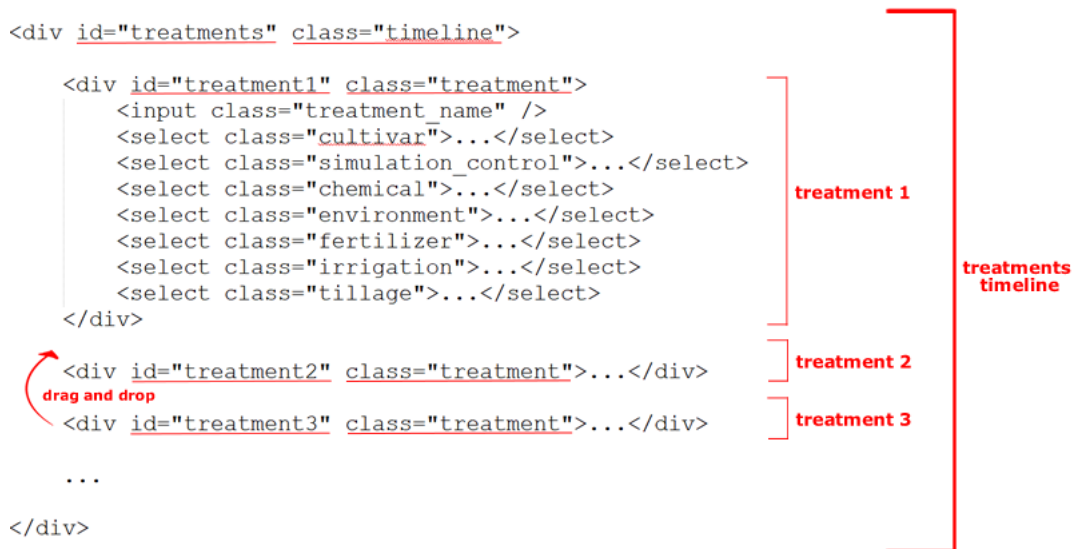


Figura 5. Estrutura HTML da linha do tempo e funcionamento ao ordenar tratamentos através do recurso arrasta e solta.

Tabela 1. Características, Funcionalidades e Recursos da Crop Rotation Tool e de Interfaces Relacionadas.

Característica, Funcionalidade, Recurso	Interfaces				
	XBuild	GBuild	Sequence Analysis	DSSAT Shell	Crop Rotation Tool
Responsiva				✓	✓
Multiplataforma				✓	✓
Recurso Arrasta e Solta					✓
Lista Experimentos de Sequência					✓
Edita Experimentos de Sequência	✓				✓
Executa Simulações de Sequência					✓
Visualiza Resultados de Simulações de Sequência em Gráficos		✓	✓		✓
Visualiza Resultados de Simulações de Sequência em Tabelas					✓

”fazendo”, ”feito”. Para aplicação do Kanban foi utilizada a ferramenta online Trello [9], a qual possibilita o compartilhamento do quadro de atividades com diversos integrantes do projeto.

2.6 IMPLEMENTAÇÃO TÉCNICA

A ferramenta foi desenvolvida utilizando tecnologias Web como HTML, CSS e JavaScript. Para gerar o instalador para os sistemas operacionais Windows, Linux e MacOS foi utilizado o framework Electron. Para a integração da ferramenta com o DSSAT foi utilizado o módulo JavaScript jDSSAT.

2.6.1 HTML, CSS e JavaScript

A estrutura visual da Crop Rotation Tool foi desenvolvida utilizando tecnologias Web como HTML e CSS. Para facilitar a estilização da ferramenta e torná-la responsiva, utilizou-se o framework Materialize, o qual possui uma série de componentes de interface de usuário baseados no *Material Design*. Para torná-la funcional foi utilizado o JavaScript, uma linguagem orientada à

eventos como *onClick* e *onChange*, onde cada chamada ao jDSSAT é executada, por exemplo, em um desses eventos. Os recursos "arrasta e solta", "ordenação" e "calendário", por exemplo, foram utilizados através das bibliotecas jQuery e jQuery UI. O gráfico de resultados interativo utilizado pela ferramenta é gerado através da biblioteca Plotly.js. Já a tabela de resultados é gerada através da biblioteca *jQuery DataTables*. As "máscaras" de entrada e "máscaras" de valores decimais são gerados através da biblioteca *jQuery MaskedInput* e *jQuery MaskMoney*, já os campos de seleção única ou múltipla são gerados através da biblioteca *jQuery Select2*.

2.6.2 Electron

Um dos requisitos da ferramenta era ser multiplataforma. Para gerar o instalador da mesma para os sistemas operacionais Windows, Linux e MacOS foi utilizado o pacote electron-builder, o qual é responsável por construir aplicativos desktop desenvolvidos com o framework Electron.

O Electron faz uso dos módulos do NodeJS e do Chromium Project para proporcionar ao usuário uma experiência de aplicação desktop. A interface é carregada em uma instância do Chromium, simulando um aplicativo desktop nativo.

2.6.3 jDSSAT

jDSSAT é um módulo JavaScript para leitura, gravação e processamento de arquivos do DSSAT e integração com o DSSAT-CSM [6]. O mesmo foi utilizado para a integração da Crop Rotation Tool com o DSSAT. O módulo foi expandido para permitir a edição de experimentos de sequência na interface. A expansão foi realizada através do desenvolvimento de quatro novos arquivos JavaScript (*genotype.js*, *soil.js*, *weather.js* e *xfile.js*) e da inclusão de novas funções em arquivos existentes. A expansão do jDSSAT pode ser visualizada na Figura 6, a qual apresenta os quatro novos arquivos como subsistemas do jDSSAT. A lista das novas funções criadas e sua descrição podem ser visualizadas na Tabela 2.

Na Figura 7 é apresentada a arquitetura de componentes do jDSSAT em um contexto de interface de usuário. O jDSSAT carrega os módulos do NodeJS para acessar o sistema de arquivos, processos filhos e sistema operacional. Por exemplo, se a interface do usuário (Crop Rotation Tool) precisar carregar um experimento de sequência, o jDSSAT fará a leitura da pasta *Sequence* e retornará uma lista de objetos, os quais serão formatados para apresentação na interface do usuário.

2.7 INSTALAÇÃO

A Crop Rotation Tool pode ser baixada e instalada para dois tipos de ambiente: produção (para o usuário final) e desenvolvimento (para desenvolvedores).

Tabela 2. Funções adicionadas ao jDSSAT, sua localização e descrição.

Function	File	Description
jdssat.treatmentsToRunSequence	treatments.js	returns an array of objects containing the fields trtNo, SQ, OP and experiment name
jdssat.simulationHasError	simulation.js	returns true if simulation error occurred or false otherwise
jdssat.soilData	soil.js	returns an array of objects containing Soil ID and NAME found in .SOL files
jdssat.weatherData	weather.js	returns an array of objects containing Weather ID and NAME found in .WTH files
jdssat.weatherStationNameByCode	weather.js	returns the weather station name by season ID
jdssat.cultivarsCrop	genotype.js	returns a vector of objects containing the ID and name of a crop's cultivars
jdssat.cultivarName	genotype.js	returns the name of a cultivar by ID
jdssat.outList	output.js	returns a list of objects containing the output file name (ID) and file description (NAME)
jdssat.variablesFromOut	output.js	Returns a list of objects containing the name (ID) and description (NAME) of a variable from an output file.
jdssat.runsFromOut	output.js	returns a list of objects containing the runs and treatments identifier of an output file
jdssat.makeCmb	string-utils.js	returns a string containing the HTML structure for a selection field
jdssat.fileExtension	string-utils.js	returns a string containing the file extension
jdssat.inArray	string-utils.js	returns true if a string is contained in a vector and false otherwise
jdssat.valToInput	string-utils.js	returns a formatted numeric value for an input field
jdssat.valToFile	string-utils.js	returns a string containing the value of a field for an experiment file
jdssat.stringWithNchars	string-utils.js	returns a string containing a specified number of characters
jdssat.filesFromFolder	string-utils.js	returns a vector containing the file list of a folder
jdssat.writeDataToFile	xfile.js	write data to .SQX file
jdssat.treatmentsData	xfile.js	returns a list of objects containing treatment data from an experiment file
jdssat.cultivarsData	xfile.js	returns a list of objects containing crop and cultivar data from an experiment file
jdssat.fertilizersData	xfile.js	returns a list of objects containing fertilizer data from an experiment file
jdssat.tillageData	xfile.js	returns a list of objects containing tillage data from an experiment file
jdssat.plantingData	xfile.js	returns a list of objects containing planting data from an experiment file
jdssat.harvestData	xfile.js	returns a list of objects containing harvest data from an experiment file
jdssat.initialConditions	xfile.js	returns a list of objects containing initial conditions data from an experiment file
jdssat.initialConditionsProfile	xfile.js	returns a list of objects containing initial conditions profile data from an experiment file
jdssat.irrigation	xfile.js	returns a list of objects containing irrigation data from an experiment file
jdssat.soilAnalysis	xfile.js	returns a list of objects containing soil analysis data from an experiment file
jdssat.envModifications	xfile.js	returns a list of objects containing environmental modifications data from an experiment file
jdssat.generalData	xfile.js	returns a list of objects containing general data from an experiment file
jdssat.organicMatter	xfile.js	returns a list of objects containing organic matter data from an experiment file
jdssat.chemicals	xfile.js	returns a list of objects containing chemicals data from an experiment file
jdssat.fields	xfile.js	returns a list of objects containing field data from an experiment file
jdssat.simulationControls	xfile.js	returns a list of objects containing simulation controls data from an experiment file
jdssat.tillageImplement	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of tillage implements
jdssat.fertilizersMaterial	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of fertilizer and amendments
jdssat.fertilizersApplications	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of Fertilizer and Chemical Applications methods
jdssat.plantingMethods	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of planting materials/methods
jdssat.plantingDistribution	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of plant distribution
jdssat.harvestComponents	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of harvest components
jdssat.harvestSizeCategories	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of harvest size categories
jdssat.irrigationMethods	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of irrigation methods
jdssat.residueMaterial	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of residues and organic fertilizers
jdssat.chemicalMaterial	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of chemicals (herbicides, insecticides, fungicides, etc.)
jdssat.chemicalMethod	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of fertilizer and chemical applications methods
jdssat.envModificationFactors	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of environment modification factors
jdssat.fieldHistory	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of field history
jdssat.soilTexture	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of soil texture
jdssat.drainageType	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of drainage types
jdssat.harvestStage	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of harvest stage by crop
jdssat.soilMethod	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of soil analysis methods
jdssat.crops	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of crops and Weed Species
jdssat.simulationGeneralStart	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation start options
jdssat.simulationOptionsSymbiosis	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation symbiosis options
jdssat.simulationOptionsCO2	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation CO2 options
jdssat.simulationMethodsWeather	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation weather methods
jdssat.simulationMethodsInitialSoilConditions	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation initial soil conditions methods
jdssat.simulationMethodsEvapotransportation	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation evapotranspiration methods
jdssat.simulationMethodsInfiltration	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation infiltration methods
jdssat.simulationMethodsPhotosynthesis	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation photosynthesis methods
jdssat.simulationMethodsHydrology	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation hydrology methods
jdssat.simulationMethodsSOM	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation soil organic matter methods
jdssat.simulationMethodsSoilEvaporation	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation soil evaporation methods
jdssat.simulationMethodsSoilLayerDistribution	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation soil layer distribution methods
jdssat.simulationManagementPlanting	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation planting management options
jdssat.simulationManagementIrrigation	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation irrigation management options
jdssat.simulationManagementFertilization	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation fertilization management options
jdssat.simulationManagementResidue	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation residue management options
jdssat.simulationManagementHarvest	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation harvest management options
jdssat.simulationOutputs	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation output options
jdssat.simulationOutputsVerbose	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation output verbose options
jdssat.simulationOutputsFormat	cde.js	returns a list of objects containing CDE (ID) and description (NAME) of simulation output format options
jdssat.cropModels	cde.js	returns a list of objects containing simulation models (ID) and crops (NAME)

2.7.1 Ambiente de Produção

Os instaladores da Crop Rotation Tool estão disponíveis no GitHub para os sistemas operacionais Windows, Linux e MacOS, através do seguinte endereço Web: <https://github.com/alexsebbencunha/CropRotationTool/releases>.

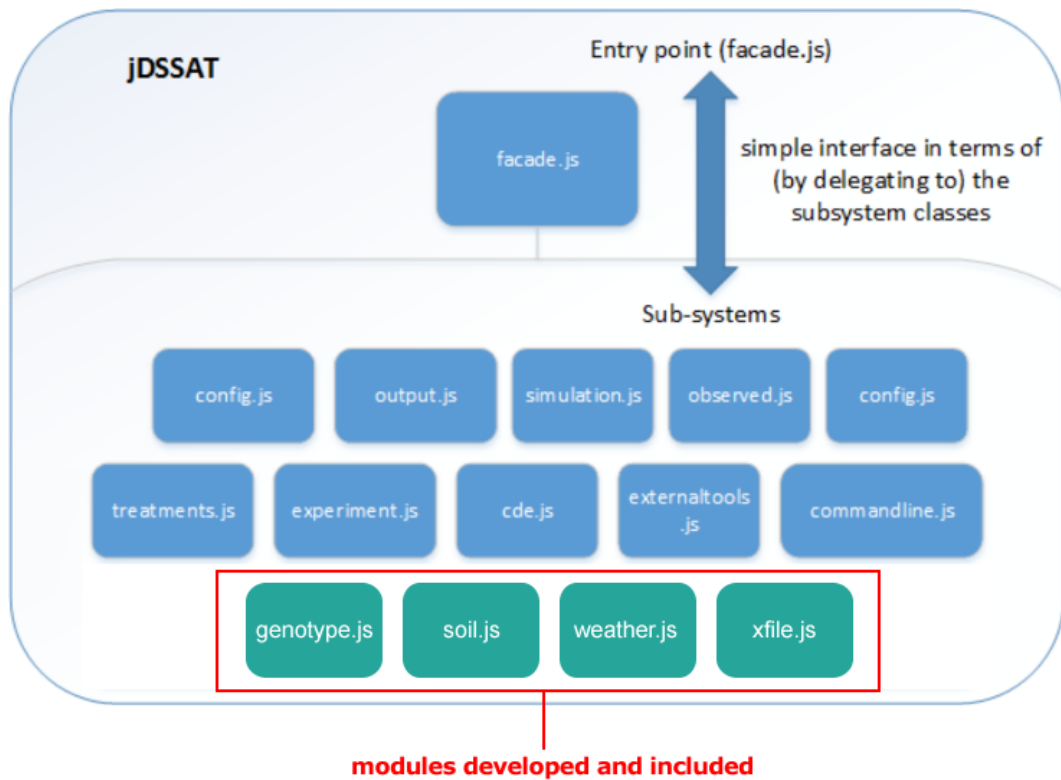


Figura 6. Expansão do módulo jDSSAT para integração da Crop Rotation Tool com o DSSAT: Adaptada [6].

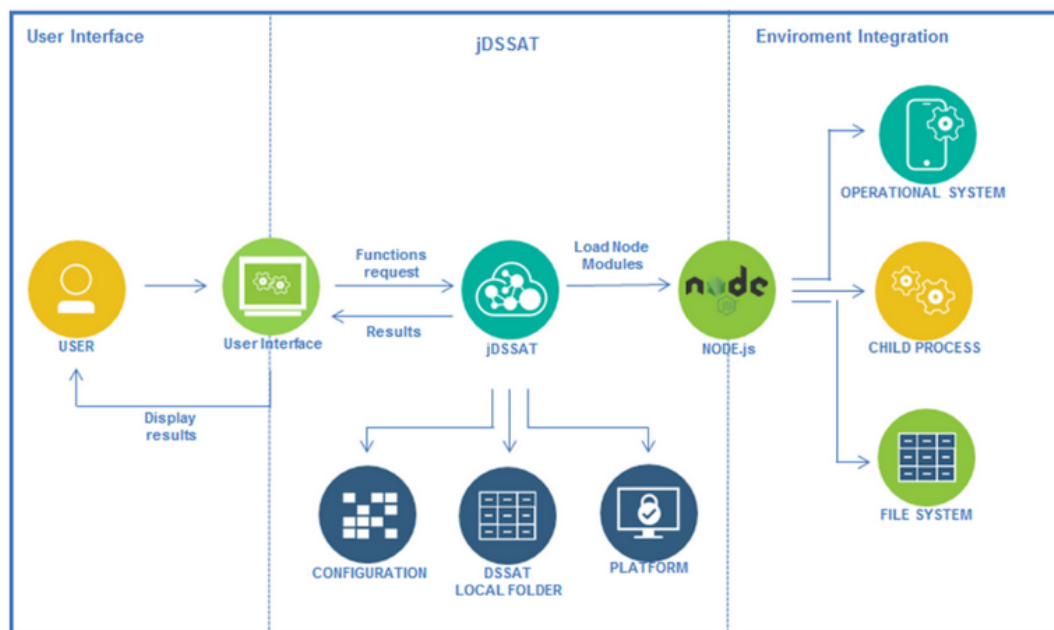


Figura 7. Arquitetura de componentes do jDSSAT e a integração com pastas e arquivos do sistema operacional [6].

Os requisitos para instalação da ferramenta em ambiente de produção são:

- Sistema Operacional: Windows, Linux ou MacOS;

- DSSAT-CSM v4.6+

2.7.2 Ambiente de Desenvolvimento

O código-fonte da ferramenta, bem como as instruções para instalação em modo de desenvolvimento, também estão disponíveis para download no GitHub, através do endereço: <https://github.com/alexsebbencunha/CropRotationTool>.

Os requisitos para instalação da ferramenta em ambiente de desenvolvimento são:

- Sistema Operacional: Windows, Linux ou MacOS;
- DSSAT-CSM v4.6+
- NodeJS 8+

2.8 EXEMPLOS ILUSTRATIVOS

Para exemplificar a utilização da Crop Rotation Tool, será utilizado o arquivo de experimento "MSKB8901.SQX", o qual é fornecido junto à instalação do DSSAT.

Ao clicar no botão "Open File", é apresentada na interface a lista de arquivos de sequência contidos na pasta *Sequence* do DSSAT, conforme visualizado na Figura 8.

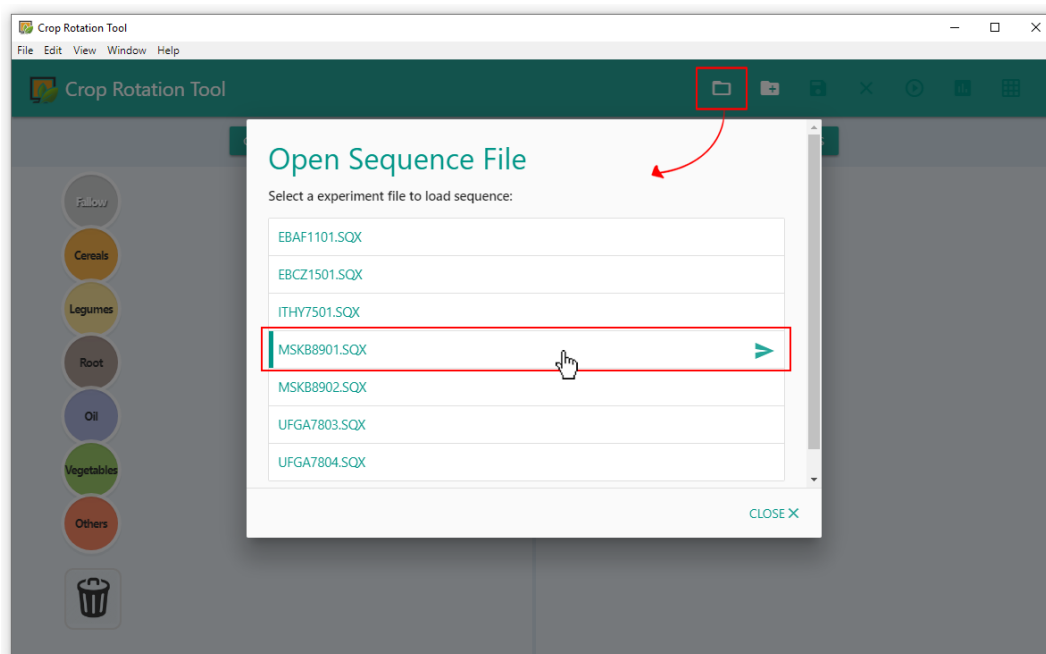


Figura 8. Botão "Open File" e a Lista de Experimentos de Sequência. Selecionando o arquivo "MSKB8901.SQX".

Ao clicar no arquivo "MSKB8901.SQX", por exemplo, carregará na interface os dados do experimento e as configurações. Para uma melhor visualização dos tratamentos na interface, os

mesmos são apresentados ao usuário em formato de "linha do tempo", onde o usuário pode expandir ou comprimir o painel de configurações de cada tratamento, conforme visualizado na Figura 9. Uma visão geral do experimento e seus nove tratamentos pode ser visualizada na Figura 10.

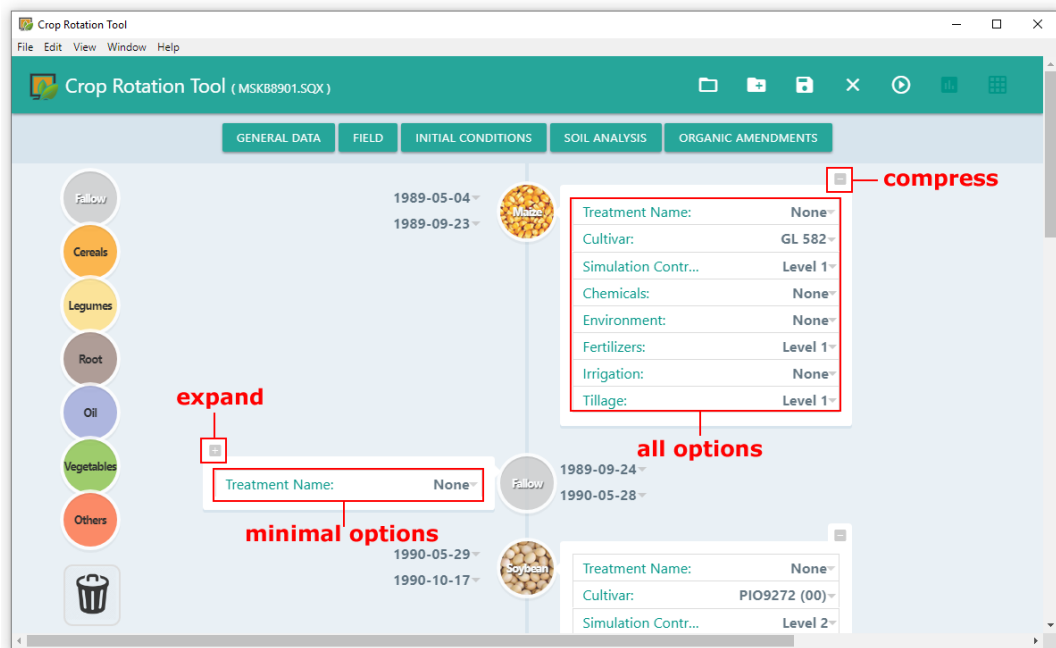


Figura 9. Possibilidade de expandir ou comprimir o painel de opções de cada tratamento.

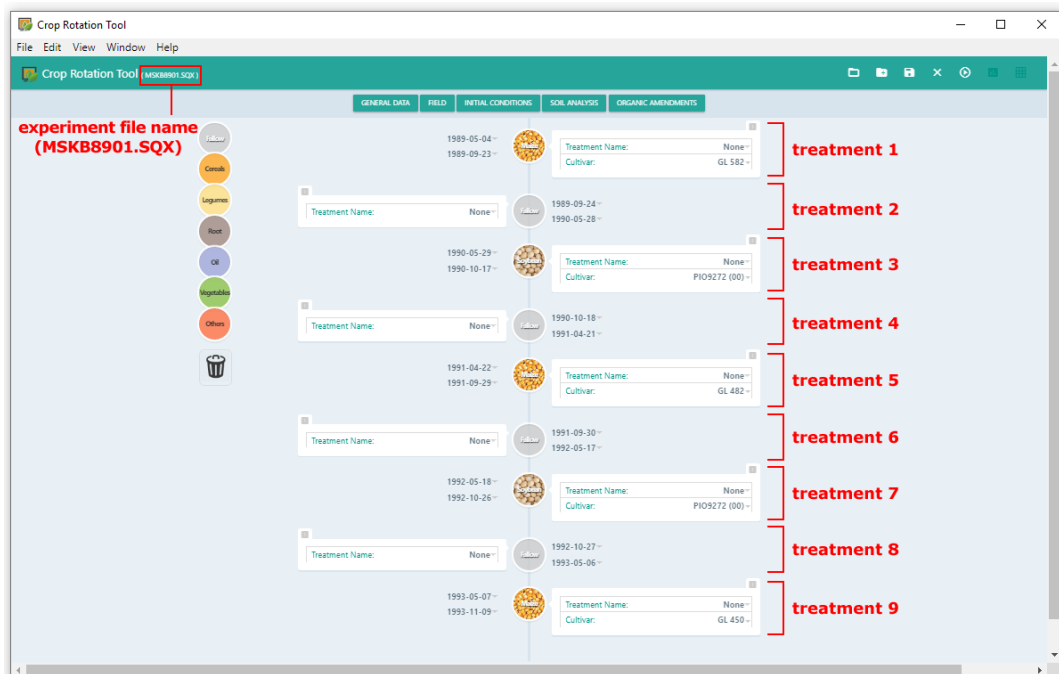


Figura 10. Visão geral dos nove tratamentos do experimento "MSKB8901.SQX".

Além de carregar na interface os dados de arquivos de sequência existentes (botão *Open File*), a Crop Rotation Tool permite a criação de arquivos de sequência através do botão *New File*. A Figura 11 apresenta a criação de um arquivo chamado "TTPF1901.SQX", onde o nome do arquivo é

formado pela concatenação dos valores preenchidos nos seguintes campos, respectivamente: *Institute Code*, *Site Code*, *Year of Experiment*, *Experiment Number*.

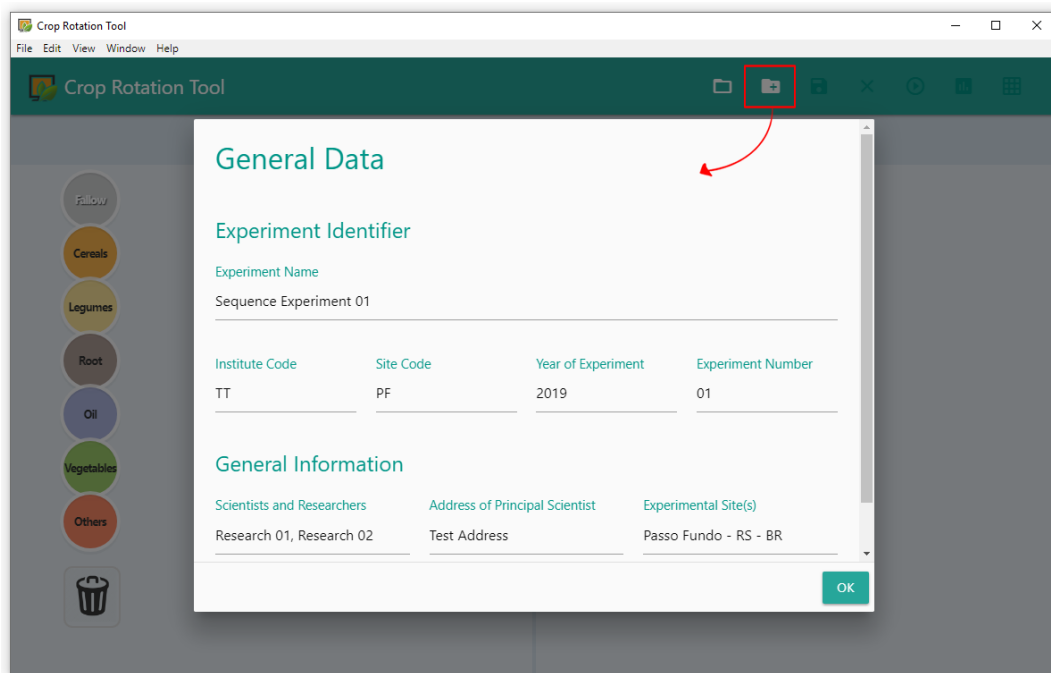


Figura 11. Criação de um arquivo de seqüência chamado "TTPF1901.SQX".

Ao reordenar tratamentos na Crop Rotation Tool, a ferramenta verifica se as datas de plantio e colheita estão em ordem crescente. Caso contrário ela apresentará ao usuário um alerta em forma de *tooltip*, conforme visualizado na Figura 12.

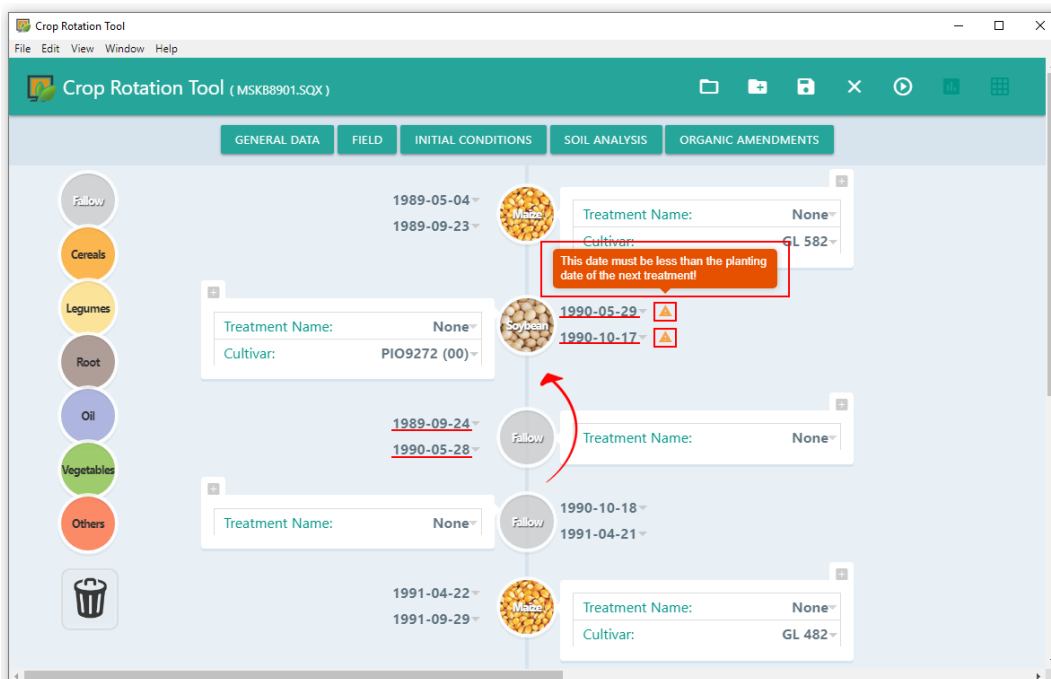
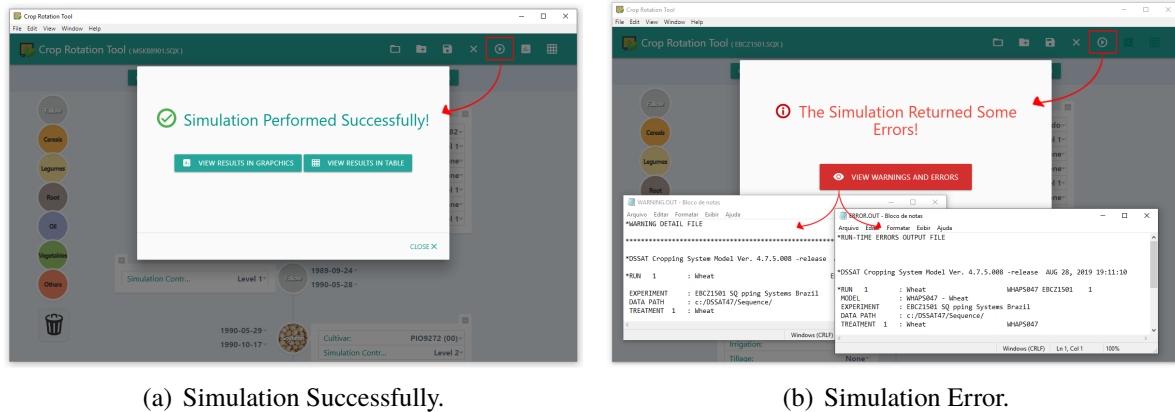


Figura 12. Verificação de Datas de Plantio e Colheita na Ordenação de Tratamentos.

Para executar a simulação do experimento, o usuário deve clicar no botão *Run Simulation*. Em caso de sucesso, a interface apresentará ao usuário uma janela *modal* com uma mensagem de sucesso e dois botões: *View Results in Graphics* e *View Results in Table*. Já em caso de erro na execução da simulação, a interface apresentará ao usuário uma mensagem de erro e um botão *View Warnings and Errors*, o qual abre em um editor de texto do sistema operacional, os arquivos "WARNING.OUT" e "ERROR.OUT", conforme visualizado na Figura 13.



(a) Simulation Successfully.

(b) Simulation Error.

Figura 13. Mensagens de retorno da execução de uma simulação pela Crop Rotation Tool.

A Crop Rotation Tool também possibilita ao usuário visualizar os resultados das simulações em gráficos interativos, comparando os dados simulados com os observados, conforme apresentado na Figura 14. Os dados observados localizam-se na pasta *Sequence* do DSSAT, no arquivo "MSKB8901.SQT". Para fins de exemplo foram utilizados dados fictícios como observados.

Os gráficos gerados pela Crop Rotation Tool são responsivos, ou seja, se adaptam a diferentes resoluções de tela. Além disso, eles são interativos, permitindo que o usuário visualize a informação quantitativa ao posicionar o cursor do mouse sobre cada ponto do gráfico. É possível também habilitar ou desabilitar a visualização de linhas ou pontos do gráfico clicando sobre os itens da legenda e ainda fazer o download do gráfico em imagem, no formato PNG (*Portable Network Graphics*).

Além da visualização de resultados em gráficos, a Crop Rotation Tool possibilita ao usuário visualizar os resultados das simulações em uma tabela, para que o usuário possa explorar os dados, conforme apresentado na Figura 15.

Para facilitar a configuração de visualização dos resultados, foi utilizado um formulário com etapas (*wizard*), onde o usuário seleciona o arquivo de saída, as variáveis para X e Y, as *runs* e o *plot mode*.

A ferramenta possui visualização em gráficos e tabelas para diversos arquivos de saída do DSSAT. Entre eles estão: ".OEB", ".OEV", ".OLC", ".OLN", ".OMO", ".ONO", ".OPG", ".OPH", ".OPN", ".OSC", ".OSN", ".OST", ".OSU", ".OSW", ".OWE".

Os arquivos ".OSU" (*Seasonal Summary*) e ".OEV" (*Evaluation*) possuem um formato diferenciado em relação aos demais. A visualização do arquivo ".OSU" no gráfico de resultado permite plotar duas variáveis, uma contra a outra, como rendimento versus chuva, por exemplo. Um

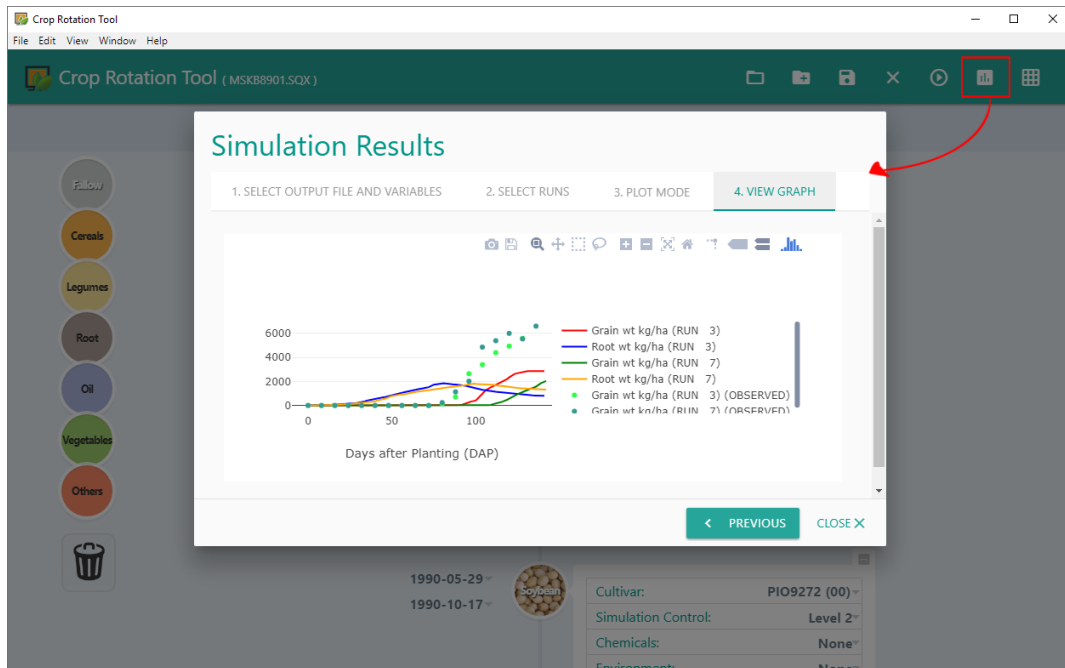


Figura 14. Visualização dos Gráficos de Resultado.

@YEAR	DOY	DAS	DAP	L#SD	GSTD	LAID	LWAD	SWAD	GWAD	RWAD	VWAD	CWAD
1990	169	21	20	1.7	0	0.168	61	20	0	98	81	81
1990	170	22	21	1.9	0	0.188	70	24	0	110	94	94
1990	171	23	22	2.0	0	0.211	74	26	0	115	100	100
1990	172	24	23	2.3	0	0.249	88	32	0	129	120	120
1990	173	25	24	2.4	0	0.277	94	34	0	122	127	127
1990	174	26	25	2.5	0	0.296	100	34	0	120	134	134
1990	175	27	26	2.7	0	0.322	114	43	0	138	157	157
1990	176	28	27	2.8	0	0.352	128	56	0	164	184	184
1990	177	29	28	3.0	0	0.393	140	67	0	184	207	207
1990	178	30	29	3.3	0	0.454	160	79	0	203	240	240

Figura 15. Visualização da Tabela de Resultados.

exemplo de gráfico gerado para esse tipo de arquivo pode ser visualizado na Figura 16. Já a visualização do arquivo ".OEV" no gráfico de resultado permite comparar os dados simulados e observados, onde é possível encontrar *S* (*simulated*) e *M* (*measured*) para a mesma variável. Um exemplo de gráfico gerado para esse tipo de arquivo pode ser visualizado na Figura 17.

2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O intuito da Crop Rotation Tool não é substituir a utilidade das ferramentas do DSSAT, visto que o mesmo corresponde a um conjunto de ferramentas. O objetivo da ferramenta desenvolvida é

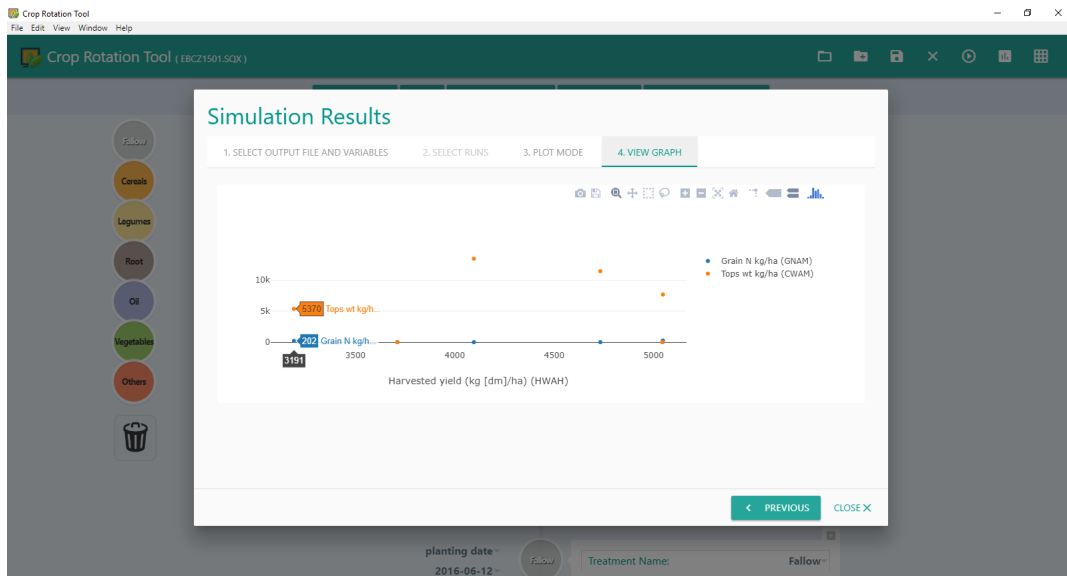


Figura 16. Exemplo de Plotagem do Arquivo .OSU.

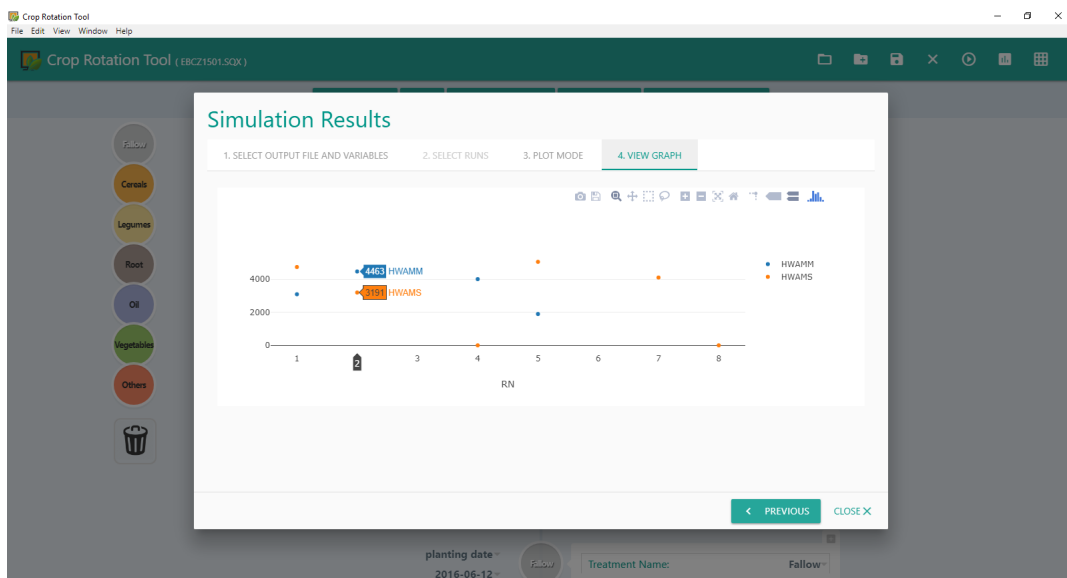


Figura 17. Exemplo de Plotagem do Arquivo .OEV.

auxiliar o usuário na criação, edição e visualização de experimentos de sequência, assim como dos resultados das simulações, tudo em uma mesma interface.

A ferramenta desenvolvida encoraja desenvolvedores a continuarem desenvolvendo novas ferramentas e interfaces para o DSSAT, bem como a utilizarem e expandirem o módulo jDSSAT, ou ainda, novos módulos para integração de interfaces com o DSSAT-CSM.

O código-fonte da Crop Rotation Tool pode ainda, servir como base para a criação de uma ferramenta para edição de experimentos de única cultura, como alternativa ao XBuild do DSSAT, ou ainda, o mesmo código-fonte pode ser atualizado para permitir a edição de experimentos em dois modos: modo "single crop" para arquivos ".X" ou modo "multi crop" para arquivos ".SQX".

O foco desse trabalho foi o desenvolvimento da ferramenta proposta, a partir de um estudo das ferramentas do DSSAT. Sugere-se que em trabalhos futuros sejam realizados testes para medir a usabilidade da Crop Rotation Tool.

3. SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO TRIGO E SOJA EM CARAZINHO, RS, BRASIL

3.1 RESUMO

O sistema de produção trigo e soja é o mais utilizado para a produção de grãos no Norte do Rio Grande do Sul (RS), por várias razões: uma delas, é o fato do trigo ser cultivado no inverno e a soja no verão; a outra, por utilizarem a mesma infraestrutura de máquinas e equipamentos. O objetivo deste trabalho é a simulação do sistema de produção trigo e soja em Carazinho, RS, um experimento de sequência de cultivos realizado de junho de 2015 a junho de 2018, em uma fazenda no Sul do Brasil, onde esse sistema de produção é comum. Foram coletados dados de solo e clima para a realização da simulação de cultivos em sequência, e dados de crescimento e desenvolvimento das culturas para comparação com os dados simulados. Para a realização da simulação da sequência de cultivos, visualização e análise de resultados, foi utilizada a ferramenta Crop Rotation Tool integrada ao DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*). Através da visualização dos gráficos da ferramenta, verificou-se que, as linhas que representam os dados simulados, apresentaram uma tendência aproximada em relação aos pontos do gráfico, os quais representam os dados observados. Para a comparação dos resultados, além da utilização da Crop Rotation Tool, utilizou-se a medida RMSE (*Root Mean Square Error*) para cada variável simulada x observada, nas safras de trigo e soja. O uso das ferramentas Crop Rotation Tool e DSSAT, auxiliam no entendimento dos fatores que envolvem um sistema tão complexo, que é o sistema de sequência de cultivos.

3.2 INTRODUÇÃO

O sistema de produção trigo-soja é o mais utilizado para a produção de grãos no Norte do Rio Grande do Sul, por várias razões. Agronomicamente, as culturas se complementam pelo fato do trigo ser cultivado no inverno e a soja no verão, e por utilizarem a mesma infraestrutura de máquinas e equipamentos. No verão, apesar de haver outras culturas de grãos economicamente viáveis como, por exemplo, o milho, a soja é preferida devido ao menor custo de produção e maior liquidez no mercado, gerando, inclusive, maior retorno econômico ao agricultor. Além disso, a cultura da soja apresenta menor risco climático, especialmente quanto ao risco associado ao déficit hídrico durante o ciclo, comparado ao milho. No caso do trigo, a cultura entra nos sistemas de produção como a principal cultura de produção de grãos no inverno, devido ao domínio tecnológico que o agricultor tem sobre a mesma e a complementaridade que apresenta em relação às culturas de verão, além de sua importância na produção de alimentos. As outras culturas de produção de grãos de inverno, têm particularidades ainda não assimiladas pelos agricultores e, por isso, estão sujeitas a maiores riscos de produção e de liquidez, de maneira que seu cultivo é restrito a agricultores com maior nível tecnológico e de domínio dos cultivos.

Embora o avanço do melhoramento genético tenha contribuído significativamente para o aumento do potencial do rendimento de grãos da soja e do trigo, a expressão do mesmo depende do manejo que é dado a cada cultura. A variabilidade das condições meteorológicas e/ou climáticas, associada aos tipos de solos que existe na região, é responsável pela formação de distintos potenciais de produção, que emergem da interação destes fatores. O vetor resultante destas interações afeta as culturas, desde a semeadura até a colheita e, via de regra, é responsável por determinar estratégias de manejo diferenciadas durante o ciclo das mesmas entre locais de produção. Neste contexto, a modelagem do crescimento e do desenvolvimento das culturas de soja e trigo é uma importante ferramenta que pode auxiliar na precisão dos manejos adotados e também na compreensão dos processos que determinarão a expressão do potencial produtivo das mesmas.

A literatura agrônômica apresenta inúmeros resultados que mostram a importância da rotação de culturas, composta pela sucessão de cultivos de espécies de diferentes famílias botânicas e/ou de diferentes necessidades de recursos produtivos, como forma de manter e aumentar produtividades das culturas de trigo e soja. A base científica que explica esse efeito, entre outros fatores, está centrada nos benefícios que uma espécie cultivada tem sobre a outra, seja direta ou indiretamente. Ocorre que, nem sempre esse tipo de impacto é percebido quando as culturas são avaliadas isoladamente, uma vez que o mesmo é o resultado de uma série de processos associados, interdependentes e até espaçados no tempo. Por isso, a compreensão dos reais impactos que ocorrem em um ambiente produtivo, composto pela sucessão de espécies em rotação de culturas, depende de uma ferramenta capaz de simular essas interações, e entregar resultados compreensíveis a nível científico e também para a transferência de tecnologia.

Modelos de simulação de culturas têm sido usados para muitas aplicações diferentes em vários países ao redor do mundo. Garcia e Garcia et al. [10] avaliaram a capacidade do DSSAT-CSM para simular a produção de algodão, milho e amendoim sob várias seqüências de rotação de culturas para fazendas selecionadas no sudoeste da Geórgia, EUA; Sarkar e Kar [11] utilizaram o DSSAT e a ferramenta Sequence Analysis para simular uma seqüência arroz-trigo-pousio na Índia e avaliar a mudança na produtividade do sistema arroz-trigo com variabilidade climática; Soler et al. [12] utilizaram as mesmas ferramentas para simular o rendimento de diferentes culturas e estimar as mudanças no carbono orgânico do solo (SOC) para diferentes sistemas de cultivo na África Ocidental.

O DSSAT e a ferramenta Sequence Analysis, permitem ao usuário realizar simulações de rotações ou seqüências de culturas e analisar os resultados [13]. O principal aspecto da análise de seqüência é a consideração de experimentos conduzidos em várias épocas de cultivo. Portanto, a transferência do estado da água e dos nutrientes do solo é afetada de uma estação de cultivo ou cultura para a subsequente [14]. Outra ferramenta que possibilita a realização da simulação de seqüência de cultivos e a visualização de resultados é Crop Rotation Tool, a qual foi utilizada neste estudo de caso, ou seja, a simulação do sistema de produção trigo e soja em Carazinho, RS, um experimento de seqüência de cultivos realizado de junho de 2015 a junho de 2018 em uma fazenda no Sul do Brasil.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Caracterização Experimental

No período de junho de 2015 a junho de 2018 foram realizados experimentos de campo em lavouras comerciais de trigo e soja, no formato *On Farm*, envolvendo três safras de cada cultura. A propriedade, denominada Granja Capão Grande, visualizada na Figura 18, localiza-se no município de Carazinho, RS (28°13'46"S, 52°54'32"W e 517m), e tem 553,7 ha de área total e 455 ha de área cultivada, sob sistema de rotação de culturas e plantio direto. O clima da região é Cfa segundo a classificação de Köppen [15] e o solo é um Latossolo Vermelho Alumino férrico típico [16]. As características do solo podem ser visualizadas na Tabela 5. No verão que antecedeu a semeadura do trigo do primeiro experimento, as áreas foram cultivadas com soja e após com a cultura do nabo antes da semeadura do trigo. As glebas cultivadas apresentaram inclinação entre 5 e 10%, com exposição predominantemente Leste/Nordeste e foram cultivadas sob preceitos de agricultura de precisão, especialmente no manejo da fertilidade do solo e monitoramento da colheita.

A coleta de dados seguiu o método da amostragem (*Surveys*) simples em transectos localizados na área central representativa das glebas utilizadas para os experimentos, denominada de área controle, cujo ponto central possuía, pelo menos, 100 metros de raio, em relação à borda da lavoura. Essa estratégia foi adotada devido à coleta de dados micrometeorológicos, os quais necessitam desta condição de contorno para evitar a advecção de energia do meio externo à área de controle dos experimentos. Para os experimentos com a cultura do trigo, além da faixa padrão *On Farm*, estabeleceu-se uma faixa adicional de coleta de dados chamada de *Double Farm*, que foi cultivada com o dobro da dose de nitrogênio (N), como forma de testar a sensibilidade de estratégias de modelagem. Por isso, as avaliações feitas nos experimentos de trigo *On Farm* foram feitas paralelamente, também para a faixa *Double Farm*.

3.3.2 Instalação e Manejo das Culturas

As culturas avaliadas foram semeadas dentro da época indicada pelo zoneamento agrícola para a região. A semeadura do trigo, cultivar BRS Parrudo, foi realizada com semeadora adubadora, em sistema de plantio direto, em 09/06/2015, 13/06/2016 e 15/06/2017, com emergência das plantas ocorrida em 20/06/2015, 26/06/2016 e 25/06/2017, respectivamente nos três anos experimentais. O encerramento do ciclo ocorreu com a colheita realizada em 26/10/2015, 08/11/2016 e 26/10/2017, respectivamente. As características do cultivar BRS Parrudo podem ser visualizadas na Tabela 7. Para a soja foram utilizados genótipos de hábito de crescimento indeterminado, de mesma faixa de grupo de maturação relativa (GMR): BMX Apolo RR (5.5), NS 5445 IPRO (5.4) e DM 5958 RSF IPRO (5.8), nos experimentos de 2015, 2016 e 2017, respectivamente. A semeadura ocorreu em 16/11/2015, 8/11/2016 e 13/11/2017, com emergência das plantas em 24/11/2015, 16/11/2016 e 21/11/2017. O término do ciclo da soja ocorreu com a colheita em 24/03/2016, 24/03/2017 e



Figura 18. Localização do Experimento: Granja Capão Grande, Carazinho - RS.

03/04/2018, respectivamente. As características do cultivar BMX Apolo podem ser visualizadas na Tabela 6.

Para o trigo, o espaçamento entre linhas adotado foi de 17 cm em todos os experimentos e a população final de plantas foi de 405, 376 e 326 plantas m^{-2} , respectivamente, para 2015, 2016 e 2017. A adubação de base foi realizada conforme análise de solo e indicação de alto rendimento de grãos para a cultura, com aplicação de 150 $kg\ ha^{-1}$ de fosfato diamônico, da fórmula 18-46-00 em 2015; 150 $kg\ ha^{-1}$ de fosfato diamônico, da fórmula 18-46-00 em 2016; e 180 $kg\ ha^{-1}$ de fosfato diamônico, da fórmula 18-46-00 em 2017. A adubação de cobertura foi feita com ureia, com 45% de nitrogênio, sendo aplicado 85 $kg\ ha^{-1}$ de nitrogênio (N) em 2015, 82 $kg\ ha^{-1}$ de N em 2016 e 80 $kg\ ha^{-1}$ de N em 2017, em duas aplicações. Em 2015 a dose total de N foi dividida em duas aplicações iguais em 02/07/2015 e em 27/07/2015. Em 2016 a primeira aplicação de N foi de 54 $kg\ ha^{-1}$, em 18/07/2016 e a segunda foi de 28 $kg\ ha^{-1}$ em 04/08/2016. Já em 2017 as duas aplicações de N foram de 40 $kg\ ha^{-1}$ e realizadas em 19/07/2017 e 04/08/2017, respectivamente. Em todos os experimentos de trigo a faixa adicional de cultivo recebeu a dosagem em dobro nas mesmas datas de fertilização, em relação ao padrão de manejo do N em *On Farm*. Para a aplicação de N em cobertura foi observada a disponibilidade de umidade no solo em momento imediatamente antes e/ou após o perfilhamento do trigo. A semente de trigo utilizada recebeu tratamento fitossanitário com Vitavax + Thiran 200 SC (2,5 $ml\ Kg^{-1}$) (Carboxina (200 $g\ L^{-1}$) - Fungicida) + Portero (1,5 $ml\ Kg^{-1}$) (Carbendazim (500 $g\ L^{-1}$) – Fungicida) + Imidagold 700 WG (1,0 $ml\ Kg^{-1}$) (Imidacloprido (700 $g\ Kg^{-1}$) – Inseticida). Os controles fitossanitários da parte aérea feitos na fazenda foram realizados conforme indicações técnicas e necessidade para o cultivo do trigo, seguindo as sequências da Tabela 3. Em todos os experimentos foi utilizado redutor de crescimento para a cultura do trigo na dose de 0,3 $L\ ha^{-1}$ do produto Moddus (Trinexapaque-Etílico (250 $g\ L^{-1}$)).

Tabela 3. Data de execução de operação de manejo fitossanitário, com respectivos produtos e dosagens utilizadas em experimentos *On Farm* para a cultura do trigo em 2015, 2016 e 2017, em Carazinho, RS.

Data	Operação	Produtos/Doses
Experimento de trigo de 2015		
07/06/2015	Dessecação Pré-Semeadura: Herbicida + Fertilizante Foliar Regulador	Helmozone (1,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
31/07/2015	Herbicida + Fungicida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Zartan (0,07Kg ha ⁻¹) + Abacus (0,3L ha ⁻¹) + Assist (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
19/08/2015	Fungicida + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Abacus (0,3L ha ⁻¹) + Fastac Duo (0,3L ha ⁻¹) + Assist (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
04/09/2015	Fungicida + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Opera Ultra (0,75L ha ⁻¹) + Fastac Duo (0,30L ha ⁻¹) + Assist (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
23/09/2015	Fungicidas + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Opera Ultra (0,6L ha ⁻¹) + Propiconazole (0,3L ha ⁻¹) + Fastac Duo (0,15L ha ⁻¹) + Nimbus (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,025L ha ⁻¹)
Experimento de trigo de 2016		
10/06/2016	Dessecação Pré-Semeadura: Herbicida + Fertilizante Foliar Regulador	Helmozone (1,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
22/07/2016	Herbicida + Adjuvante	Tricea (0,4L ha ⁻¹) + Assist (0,3L ha ⁻¹)
12/08/2016	Fungicida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Abacus (0,4L ha ⁻¹) + Orix (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
26/08/2016	Fungicida + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Abacus (0,4L ha ⁻¹) + Galil (0,30L ha ⁻¹) + Assist (0,4L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
09/09/2016	Fungicidas + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Opera Ultra (0,6L ha ⁻¹) + Tino (0,3L ha ⁻¹) + Nomolt (0,1L ha ⁻¹) + Assist (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
26/09/2016	Fungicidas + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Opera Ultra (0,6L ha ⁻¹) + Tino (0,3L ha ⁻¹) + Assist (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
Experimento de trigo de 2017		
15/06/2017	Dessecação Pré-Semeadura: Herbicida + Fertilizante Foliar Regulador	Helmozone (1,7L ha ⁻¹) + Tek F (0,05L ha ⁻¹)
25/07/2017	Herbicida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Hussar (0,1Kg ha ⁻¹) + Hoefix (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,02L ha ⁻¹)
07/08/2017	Fungicida + Inseticida + Adjuvante + Aplicação Foliar de Molebdênio + Fertilizante Foliar Regulador	Abacus (0,4L ha ⁻¹) + Fastac Duo (0,30L ha ⁻¹) + Assist (0,5L ha ⁻¹) + Microxisto MO16 (0,15L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
24/08/2017	Fungicida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Abacus (0,3L ha ⁻¹) + Assist (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,05L ha ⁻¹)
12/09/2017	Fungicida + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Opera Ultra (0,72L ha ⁻¹) + Fastac Duo (0,19L ha ⁻¹) + Assist (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)

Tabela 4. Data de execução de operação de manejo fitossanitário, com respectivos produtos e dosagens utilizadas em experimentos *On Farm* para a cultura da soja, em 2015, 2016 e 2017, em Carazinho, RS.

Data	Operação	Produtos/Doses
Experimento de soja de 2015		
14/11/2015	Dessecação Pré-Semeadura	Glifosato WG (1,33Kg ha ⁻¹) + Heat (0,07Kg ha ⁻¹) + Spider (0,03Kg ha ⁻¹) + Assist (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
26/12/2015	Herbicida + Inseticida + Fertilizante Foliar Regulador	Glifosato WG (1,5Kg ha ⁻¹) + Prêmio (0,05L ha ⁻¹) + Tek F (0,055L ha ⁻¹)
01/01/2016	Fungicidas + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Hóros (0,5L ha ⁻¹) + Unizeb Gold (1,5Kg ha ⁻¹) + Black True (0,3L ha ⁻¹) + Nimbus (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,02L ha ⁻¹)
16/01/2016	Fungicidas + Adjuvante + Inseticida	Elatus (0,2Kg ha ⁻¹) + Difere (0,5L ha ⁻¹) + Nimbus (0,6L ha ⁻¹) + Exalt (0,07L ha ⁻¹)
01/02/2016	Fungicidas + Inseticidas + Adjuvante	Elatus (0,2Kg ha ⁻¹) + Difere (0,5L ha ⁻¹) + Rapel (1,3Kg ha ⁻¹) + Nomold (0,12L ha ⁻¹) + Nimbus (0,6L ha ⁻¹)
20/02/2016	Fungicidas + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Hóros (0,5L ha ⁻¹) + unizeb Gold (1,36Kg ha ⁻¹) + Nomold (0,15L ha ⁻¹) + Nimbus (0,4L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
06/03/2016	Fungicidas + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Azimut (0,5L ha ⁻¹) + Difere (0,5L ha ⁻¹) + Unizeb Gold (0,5L ha ⁻¹) + Exalt (0,075L ha ⁻¹) + Nimbus (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
Experimento de soja de 2016		
04/11/2016	Dessecação Pré-Semeadura	Glifosato WG (1,5Kg ha ⁻¹) + Poast (1,2Kg ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
05/12/2016	Herbicida + Fertilizante Foliar Regulador	Glifosato WG (1,2Kg ha ⁻¹) + Tek F (0,055L ha ⁻¹)
28/12/2016	Herbicida + Fertilizante Foliar Regulador	Glifosato WG (1,0Kg ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
29/12/2016	Fungicida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Horos (0,5L ha ⁻¹) + Nimbus (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
13/01/2017	Fungicidas + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Elatus (0,2Kg ha ⁻¹) + Difere (0,5L ha ⁻¹) + Nimbus (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
27/01/2017	Fungicidas + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Ativum (0,8L ha ⁻¹) + Difere (0,5L ha ⁻¹) + Urge 750 SP (1,2Kg ha ⁻¹) + Assist (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
16/02/2017	Fungicidas + Inseticida + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Ativum (0,8L ha ⁻¹) + Difere (0,5L ha ⁻¹) + Urge 750 SP (1,2Kg ha ⁻¹) + Assist (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,04L ha ⁻¹)
Experimento de soja de 2017		
10/11/2017	Dessecação Pré-Semeadura	Paradox (1,8L ha ⁻¹) + Spider (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,05L ha ⁻¹)
27/11/2017	Herbicida + Fertilizante Foliar Regulador	Glifosato WG (1,0Kg ha ⁻¹) + Tek F (0,025L ha ⁻¹)
22/12/2017	Herbicida + Fertilizante Foliar Regulador	Glifosato WG (1,5Kg ha ⁻¹) + Tek F (0,02L ha ⁻¹)
27/12/2017	Fungicidas + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Orkestra (0,3L ha ⁻¹) + Status (0,5L ha ⁻¹) + Assist (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,05L ha ⁻¹)
27/12/2017	Fungicidas + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Orkestra (0,3L ha ⁻¹) + Status (0,5L ha ⁻¹) + Assist (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,05L ha ⁻¹)
11/01/2018	Fungicidas + Adjuvante + Fertilizante Foliar Regulador	Cuprodil (0,75Kg ha ⁻¹) + Horos (0,5L ha ⁻¹) + Rumba (0,5L ha ⁻¹) + Tek F (0,05L ha ⁻¹)
26/01/2018	Fungicidas + Inseticidas + Adjuvantes + Fertilizante Foliar Regulador	Ativum (0,8L ha ⁻¹) + Difere (0,5L ha ⁻¹) + Voraz (0,75L ha ⁻¹) + Fastac Duo (0,35L ha ⁻¹) + Assist (0,5L ha ⁻¹) + Break-Thru (0,03L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
13/02/2018	Fungicidas + Adjuvantes + Fertilizante Foliar Regulador	Elatus (0,2Kg ha ⁻¹) + Versatilis (0,3Kg ha ⁻¹) + Break-Thru (0,03L ha ⁻¹) + Nimbus (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)
01/03/2018	Fungicidas + Inseticida + Adjuvantes + Fertilizante Foliar Regulador	Elatus (0,2Kg ha ⁻¹) + Versatilis (0,3Kg ha ⁻¹) + Rapel (0,9Kg ha ⁻¹) + Break-Thru (0,05L ha ⁻¹) + Nimbus (0,3L ha ⁻¹) + Tek F (0,03L ha ⁻¹)

Na cultura da soja o espaçamento adotado foi de 45 cm entre linhas em todos os anos. A população final de plantas foi de 26,9, 26,8 e 23,9 plantas m^{-2} . A adubação de base foi realizada conforme análise de solo e indicação de alto rendimento de grãos para a cultura, com aplicação de 281 $kg\ ha^{-1}$ de NPK em 2015, 304 $kg\ ha^{-1}$ de NPK mais 171 $kg\ ha^{-1}$ de KCl em cobertura antes da semeadura em 2016 e 300 $kg\ ha^{-1}$ de NPK mais 160 $kg\ ha^{-1}$ de KCl em cobertura antes da semeadura em 2017, da fórmula 05-20-20, 04-28-08 e 04-28-08, respectivamente. A semente utilizada recebeu inoculação com 3 ml Kg^{-1} de *Bradyrhizobium japonicum* para melhorar a fixação biológica de N, tratamento fitossanitário com contendo uma mistura de Fipronil (250 $g\ L^{-1}$) + Piraclostrobina (25 $g\ L^{-1}$) + Tiofanato-Metílico (225 $g\ L^{-1}$) na dose de 2,0 ml Kg^{-1} , composto de aminoácidos (2,0 ml Kg^{-1}) e fertilizante composto (3,0 ml Kg^{-1}) contendo mix de nutrientes: Mo (10%), N (3%), Co (1%), Zn (1%), S (1%) e COT (6%). Os controles fitossanitários da parte aérea feitos na fazenda foram realizados conforme indicações técnicas e necessidade para o cultivo da soja, seguindo as sequências da Tabela 4.

3.3.3 Coleta de Dados Fenológicos e Biométricos das Culturas Durante o Ciclo

O monitoramento da fenologia das culturas de trigo e soja iniciou-se com a emergência das plantas e foi realizada com frequência semanal durante o ciclo, por ocasião da coleta de dados biométricos. Em cada momento de avaliação foram anotados os estádios fenológicos em que as plantas se encontravam de acordo com as escalas fenológicas de Zadoks et al. [17] para o trigo e a escala de Ritchie et al. [18], adaptada por Yorinori [19] para a soja. O estágio fenológico foi considerado quando 50% das plantas do dossel da lavoura se encontravam no mesmo no momento da avaliação.

A altura do dossel foi determinada com régua até o crescimento máximo das plantas. Para a cultura do trigo foram utilizadas 20 repetições em 2015 e 10 repetições em 2016 e 2017 e para a cultura da soja foram 20 repetições em todos os experimentos.

Semanalmente, também foram coletadas plantas em segmentos de linha para determinação da matéria seca total da parte aérea (MST_T = Trigo e MST_S = Soja) e o fracionamento em seus componentes. Para o trigo, em 2015 foram coletadas oito repetições de 0,5 m. Nos demais experimentos foram coletadas 4 repetições de um metro de linha, tanto para o trigo, quanto para a soja. Os segmentos de linha foram coletados deixando-se, pelo menos, uma planta de bordadura de cada lado. Após a coleta foi determinado o número de plantas em casa segmento colhido. As plantas coletadas foram acondicionadas em embalagens plásticas e trazidas para o laboratório, e foram dissecadas em folhas verdes (MSF_T), colmo (MSC_T), espiga (MSE_T) e grãos (MSG_T) no caso do trigo, e em folhas (MSF_S), ramos (MSR_S), legumes (MSL_S) e grãos (MSG_S) no caso da soja. Em seguida, as amostras de cada uma das partes foram acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa de secagem de material vegetal, com circulação forçada de ar e temperatura de 65°C até massa constante. A massa da matéria seca foi determinada em balança analítica de precisão (0,001g) modelo BL 320H, marca SHIMADZU.

Para determinar o índice de área foliar do trigo (IAF_T), foi medida a área foliar do trigo (AF_{TT}) em planímetro óptico, modelo 3100-L, marca LICOR, em frequência quinzenal, utilizando

todas as folhas verdade. No caso da soja, paralelamente a coleta de plantas para determinação da MST_S foram coletadas quatro plantas pareadas e foi determinada a área foliar da soja (AF_{SS}) no mesmo planímetro, também com frequência quinzenal. As folhas da soja utilizadas para determinação da AF_{SS} foram acondicionadas em embalagens de papel e colocadas para determinação da massa da matéria seca (MSF_{SS}) na estufa de secagem de material vegetal. Com os dados de AF_{TT} e AF_{SS} e as respectivas massas da matéria seca de folhas (MSF_T e MSF_{SS} , respectivamente) quinzenais, foi ajustada a equação de estimativa da área foliar específica para o trigo (equação 1) e para a soja (equação 2),

$$AF_{eT} = a + bMSF_T \quad (1)$$

$$AF_{eS} = a + bMSF_{SS} \quad (2)$$

onde: AF_{eT} é a área foliar específica do trigo em $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$; AF_{eS} é a área foliar específica da soja em $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$; MSF_T é a massa da matéria seca de folhas de trigo (g); MST_{SS} é a massa da matéria seca de folhas de soja; a e b são os coeficientes linear e angular da equação de regressão simples, respectivamente.

Com os coeficientes a e b ajustados para trigo e soja, foi calculada a AF_T e a AF_S aplicando-se as equações 1 e 2, respectivamente, tendo como variáveis independentes, a MSF_T e a MSF_S , medidas semanalmente. O IAF_T do trigo e o índice de área foliar da soja (IAF_S) semanal, foram calculados pela equação 3:

$$IAF_i = \frac{AF_i}{A_i} \quad (3)$$

em que: IAF_i é o índice de área foliar da cultura i (trigo ou soja); AF_i é a área foliar semanal da cultura i (trigo ou soja); A_i é a área de solo ocupada pela amostra de MSF_T ou MSF_S , respectivamente, de acordo com o IAF_i que estiver sendo calculado.

3.3.4 Determinação do Rendimento e Componentes do Rendimento de Grãos

O rendimento de grãos foi determinado no estádio da maturação de colheita nos experimentos de trigo e de soja. As amostragens foram feitas na parte central da área de controle dos experimentos, sobre os transectos previamente determinados.

Para o experimento de trigo de 2015 foram colhidas oito repetições de 10 metros lineares, perfazendo área útil de $1,7 \text{ m}^2$ por repetição. Em 2016 também foi colhida uma área de $1,7 \text{ m}^2$ de área útil por repetição, mas foram realizadas apenas quatro repetições. Já em 2017 foram mantidas as quatro repetições para avaliação do rendimento de grãos em trigo, mas foi colhida uma área útil de $2,55 \text{ m}^2$ por repetição, a partir da colheita de três linhas de cinco metros. As plantas de cada repetição foram colhidas próximo ao solo e acondicionadas em embalagens plásticas tipo *bag*, para serem trazidas ao laboratório. No laboratório cada repetição foi trilhada separadamente, com

máquina elétrica para trilha de parcelas, modelo P204, marca IMACK. Os grãos foram separados e as impurezas restantes foram retiradas pela passagem da amostra em um soprador elétrico, com fluxo de ar controlado. Em seguida foi determinada a umidade dos grãos de cada parcela, com o equipamento marca AGROLOGIC PORTÁTIL, modelo AL-101. O rendimento de grãos foi corrigido para 13% de umidade e calculado para uma área de um hectare. Nas amostras de rendimento de grãos foi determinado o peso de hectolitro (PH).

Além da avaliação do rendimento de grãos, em todos os experimentos de trigo foi determinado o peso de mil grãos a partir de uma amostra retirada daquela utilizada para avaliação do rendimento de grãos. A amostra de grãos selecionada foi colocada em estufa de circulação forçada de ar a 65°C de temperatura, para determinação da matéria seca de 1000 grãos (MSG_{T1000}). O peso de mil grãos (PMG_T) também foi corrigido a 13% de umidade. A partir do PMG_T e rendimento de grãos da parcela foi calculado o número de grãos por m^{-2} ($NGMQ_T$).

Para avaliação do rendimento de grãos da soja, em todos os experimentos foram colhidas quatro repetições. Em 2015 foi colhida uma linha de 10 metros em cada repetição, correspondendo a uma área de 4,5 m^2 . Em 2016 e 2017 foram colhidas duas linhas de 10 metros em cada repetição, perfazendo uma área de 9 m^2 . Próximo ao local de coleta de cada repetição (amostra principal) foi retirada uma amostra secundária de 10 plantas pareadas para determinação dos componentes do rendimento de grão. As plantas dos segmentos de linha selecionados e aquelas das amostras secundárias foram cortadas próximo à superfície do solo e acondicionadas em embalagens plásticas, tipo *bag* (amostra principal), e em embalagens de algodão (amostra secundária) para transporte até o laboratório. No laboratório foi contabilizado o número de plantas de cada repetição e, posteriormente, as amostras primárias foram trilhadas em colheitadeira de parcelas, modelo WINTERSTEIGER, marca CLASSIC. Os grãos foram separados e as impurezas restantes foram retiradas pela passagem da amostra em um soprador elétrico, com fluxo de ar controlado. Em seguida foi determinada a umidade dos grãos de cada parcela, com o equipamento marca AGROLOGIC PORTÁTIL, modelo AL-101. O rendimento de grãos foi corrigido para 13% de umidade e calculado para uma área de um hectare.

Nas 10 plantas da amostra secundária foram retirados e contado o número de legumes por planta (NLP). A partir de uma amostra de 10 legumes, retirados ao acaso, foi determinado, por contagem, o número de grãos por legume (NGL). O peso de mil grãos (PMG_S) foi determinado a partir de uma amostra de mil grãos retirada do volume de grãos utilizados para determinação do rendimento de grãos. O PMG_S também foi corrigido a 13% de umidade. A partir do PMG_S e rendimento de grãos da parcela, foi calculado o número de grãos por m^{-2} ($NGMQ_S$).

3.3.5 Monitoramento de Variáveis Ambientais

Para o monitoramento das variáveis ambientais foi instalada uma torre no centro da área de controle de cada experimento de trigo e soja e de pousio, com sensores instalados a 1,5 m de altura do solo. Para a medição da temperatura e umidade relativa do ar foi utilizado um sensor

conjugado, modelo HC2S3-L da Campbell Scientific, Inc. A radiação solar global e a radiação solar fotossinteticamente ativa incidentes foram medidas com um piranômetro modelo SP-110-L-10 e um sensor quantum modelo SQ-110, respectivamente, ambos da marca Apogee Instruments. O vento foi medido com um anemômetro sônico bidirecional, modelo WINDSONIC1-L34, marca GILL. A precipitação pluvial foi medida com o pluviômetro TB4-L, da Campbell Scientific, Inc. Todos os sensores foram conectados a um *datalogger*, com multiplexador de canais e as leituras foram feitas a cada 30 segundos, com médias e/ou totalização, armazenadas a cada 15 minutos, conforme a variável. Os sensores também foram programados para registrarem os valores máximos e mínimos diários para as variáveis cujos limites são indicadores importantes. Os registros dos dados destas variáveis foram feitos continuamente, desde o início do ciclo experimental em 2015 até o término do mesmo, em junho de 2018.

Para efeito de utilização destes dados, em sistemas de modelagem, a série de dados foi construída desde o início do ano de 2015. Os dados de 2015 anteriores ao início do período experimental foram obtidos da estação meteorológica da Embrapa Trigo, pertencente ao 8º Distrito de Meteorologia (8º DISME), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados meteorológicos registrados na estação meteorológica da Embrapa Trigo, também foram utilizados para preenchimento de falhas quando detectadas nas análises de consistência e adequação dos dados, realizadas durante o período experimental.

3.3.6 Caracterização Físico-hídrica e Química do Perfil de Solo

A caracterização físico-hídrica e química do perfil de solo foi realizada duas vezes no período experimental, em decorrência de mudanças das áreas experimentais. Uma terceira avaliação foi realizada no final do ciclo de experimentos, na área do primeiro experimento, para confirmar e complementar a coleta de variáveis. As avaliações foram feitas em 02/07/2015, 03/06/2016 e 11/12/2018.

Para as avaliações físico-hídricas e químicas do solo foram abertas trincheiras de até 1 m de profundidade. O solo foi caracterizado no centro das camadas de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 20, 20 a 30, 30 a 40, 40 a 70 e 70 a 100 cm de profundidade.

Em amostras deformadas de solo foi determinada a composição granulométrica dos perfis em areia, silte e argila, baseada no método da pipeta [20]. Com base nos teores destas frações, o solo foi classificado de acordo com seu tipo, em relação a sua capacidade de retenção de água, de acordo com a Instrução Normativa Nº 2 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA – de 2008.

Ao mesmo tempo da coleta das amostras deformadas também foram coletadas amostras indeformadas de solo, com anéis de 5cm de diâmetro e 5cm de altura para a determinação das curvas de retenção de água no solo, porosidade e densidade aparente do mesmo.

Para a determinação das curvas de retenção de água no solo os anéis com solo foram saturados por 24 horas. Após, foi determinada a massa da amostra saturada com balança de precisão.

Em seguida, cada anel foi submetido às tensões de 0,001MPa, e 0,006MPa, 0,01MPa, em mesa de tensão [20] e às tensões de 0,1MPa e 0,03MPa, em Câmaras de Richards [21]. As respectivas tensões se equivalem aos potenciais matriciais de água no solo de: -0,001MPa, -0,006MPa (capacidade de campo), -0,01MPa e -0,03MPa. Quando cessava a saída de água das amostras, as mesmas foram retiradas dos equipamentos e foi determinada a massa da amostra em balança de precisão, retornando em seguida para a aplicação das tensões subsequentes [22]. Ao término da aplicação das tensões as amostras foram colocadas em estufa de secagem de solo, a 105 °C até massa constante (massa de solo seco). Com os dados das massas de solo e água, do ponto de saturação, de todas as tensões aplicadas e da massa de solo seco foi calculada a umidade gravimétrica do solo (g/g) em cada ponto. A umidade gravimétrica do solo no potencial de -1,5MPa foi determinada por um modelo baseado no teor de argila, proposto por Klein et al. [23]. A umidade gravimétrica foi multiplicada pela densidade do solo e transformada em umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$). Os valores de umidade volumétrica, nos respectivos potenciais matriciais, foram ajustados à equação de Van Genuchten [24], utilizando procedimento elaborado por Dourado Neto et al. [25].

Com os dados obtidos nos procedimentos de determinação das curvas características de retenção de água no solo, foi calculada a porosidade total pela diferença entre a massa da amostra saturada e a massa de solo seco da amostra. Assim, a porosidade total correspondeu ao volume de água existente entre esses dois limites, o qual foi convertido para m^3 de poros por m^{-3} de solo ($m^3 m^{-3}$). A distribuição de tamanho de poros no solo foi realizada para as categorias de macro, micro e criptoporos, conforme classificação de Klein e Libardi [26]. De acordo com essa classificação, os macroporos são aqueles representados pelo volume de água extraída até o potencial matricial de -0,006MPa, conhecidos como poros de drenagem, com diâmetro superior a $50\mu m$. Os poros entre $50\mu m$ e $0,2\mu m$ correspondem àqueles de retenção de água às plantas e são obtidos pela diferença volumétrica de água entre a massa de solo úmido após retirada da aplicação do potencial matricial de -0,006MPa e a massa de solo úmido após aplicação do potencial de -1,5MPa. A diferença volumétrica de umidade do solo entre a massa de solo úmido no potencial matricial de -1,5MPa e a massa de solo seco, corresponde aos criptoporos, ou seja, à água teoricamente indisponível às plantas. Ao final da determinação da curva característica de retenção de água no solo foi calculada a densidade aparente do solo ($Mg m^{-3}$), pelo método do anel volumétrico [20], que relaciona a massa de solo seco e o volume do anel para a respectiva massa de solo seco.

Além das avaliações já descritas, na amostragem de solo de 11/12/2018 foi determinada a condutividade hidráulica saturada (Ko , $cm dia^{-1}$), seguindo procedimento descrito por Cauduro e Dorfman [22]. Para esta avaliação foram coletados cilindros de solo com 7,5 cm de altura e 7 cm de diâmetro para todas as camadas, exceto para as camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm, que, devido a menor espessura, foram unificadas em uma amostragem considerando uma camada de solo de 0 a 10 cm. Após a coleta, as amostras foram embaladas em recipientes adequados e trazidas para o laboratório, onde foram saturadas por um período de 48 horas para retirada completa do ar presente nos poros do solo. Para a determinação da condutividade hidráulica saturada do solo foi utilizado um permeâmetro de carga constante [22], preparado para avaliação da Ko de 7 amostras de solo ao mesmo tempo. A

carga hidráulica de cada amostra submetida na mesma bateria de avaliação foi medida com régua milimétrica. O volume de água percolado pelas amostras de solo foi coletado a cada 5 minutos e medido em provetas graduadas. O número de coletas de água percolada para cada amostra foi realizado até identificar 3 valores constantes.

As análises químicas do solo foram realizadas a partir da coleta de amostras de solo deformadas em cada profundidade. O solo para esta avaliação foi acondicionado em embalagens plásticas e trazido para o laboratório de solo da Embrapa Trigo. As análises químicas do solo de pH, índice SMP, matéria orgânica, teor de fósforo, potássio, alumínio, cálcio, magnésio, acidez total, CTC efetiva, soma de bases, porcentagem de saturação da CTC e percentual de saturação em relação à CTC efetiva foram realizadas conforme Tedesco et al. [27].

3.3.7 Medição de Variáveis Micrometeorológicas

O número de variáveis micrometeorológicas medidas, o número de sensores utilizados na determinação de cada variável e os níveis de instalação dos sensores foram distintos entre os diferentes experimentos de trigo e soja. Isso ocorreu devido a variabilidade na disponibilidade de sensores e equipamentos de coleta de dados, em consequência de aquisições ao longo do tempo e/ou da ocorrência de falhas nos sistemas e/ou ainda em função da necessidade de manutenção dos mesmos. Apesar disso, sempre foi mantido um núcleo de sensores para uma coleta padrão de dados em todos os experimentos. Portanto, na descrição a seguir será destacado, sempre que houve, uma mudança da situação padrão de coleta de dados. Em todos os experimentos de trigo e soja os sensores foram instalados em transectos, na área central representativa de cada área cultivada.

As variáveis micrometeorológicas determinadas foram: radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) transmitida e refletida pelo dossel das culturas, saldo de radiação (R_n), temperatura da superfície do dossel, perfil vertical de temperatura e umidade relativa do ar, perfil de vento, fluxo de calor no solo, molhamento foliar e fluxos de CO_2 , água e calor. Os sensores foram conectados a multiplexadores de canais, modelo AM16/32B, da Campbell Scientific, Inc., e estes ligados a *dataloggers*, modelo CR 1000, da Campbell Scientific, Inc. Os *dataloggers* foram programados para realizarem leituras a cada 30 segundos e as médias foram armazenadas a cada 15 minutos. Valores extremos máximos e mínimos foram registrados também em escala diária, para as variáveis em que estes indicadores são importantes.

3.3.8 Radiação PAR transmitida e refletida pelo dossel

A PAR transmitida ao nível do solo (PARTs) e refletida pelo dossel (PARr) das culturas foi medida utilizando barras de medição de radiação PAR (sensores PAR), manufaturadas com cinco células de silício amorfo [28] e calibradas com o sensor modelo SQ-110, da marca Apogee Instruments. Desta forma foi obtida uma equação específica para cada sensor, cujo coeficiente angular da reta foi

utilizado como coeficiente de conversão dos valores de PAR, registrados em milivolts, para $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

No experimento de trigo a PARts foi medida com cinco repetições instalados em 2015, quatro em 2016 e quatro em 2017, e a PARr, com três repetições em 2015, quatro em 2016 e quatro em 2017, respectivamente. Além da PARts, nos experimentos de 2016 e 2017 foram instaladas três repetições na altura de 40 cm e três na altura de 60 cm da superfície do solo para medição da PAR transmitida no meio do dossel (PARtm) e próximo ao topo do dossel (PARtt). Foi utilizado o mesmo número de repetições (sensores) para medição da PAR no tratamento padrão *On Farm* e no *Double Farm*, para a cultura do trigo.

No experimento de soja a medição da PARts foi realizada com quatro sensores em 2015, oito em 2016 e oito em 2017. A PARr, para os mesmos experimentos foi medida com quatro, quatro e seis sensores, respectivamente. Em todos os experimentos de soja foram instalados sensores na altura de 40 e 60 cm da superfície do solo para medir a PAR transmitida no meio do dossel (PARtm) e próximo ao topo do dossel (PARtt). Para a PARtm e PARtt foram utilizados quatro sensores nos experimentos de 2015 e 2016 e cinco no experimento de 2017.

Os sensores de medição da PARts, foram instalados a 5 cm da superfície do solo, fixados em estacas de madeira, já aqueles, para medir a PARr, foram instalados a 1,5 m acima do solo e fixados em hastes de metal. Hastes de metal também foram utilizadas para fixar os sensores de PARtm e PARtt em suas respectivas alturas. Todos estes sensores foram instalados transversalmente à linha de plantas e nivelados com a parte sensível orientada para o topo do dossel. As medições de PARts iniciaram, aproximadamente, entre 20 a 30 dias após a emergência das plantas, devido a necessidade de um IAF mínimo para redução dos erros nas medições de transmissividade do dossel. No caso da PARr os registros iniciaram imediatamente após a instalação dos sensores e no caso da PARtm e PARtt, os registros foram considerados a partir do momento em que as plantas começaram a sombrear os respectivos sensores, ou seja, logo após que as plantas atingiram as alturas de 40 e 60 cm, respectivamente.

Os dados de PAR obtidos em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ foram transformados para $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, conforme equação proposta por Thimijan and Heins [29]. Em seguida foram calculadas a PAR interceptada (PARit), a PAR absorvida (PARab), a eficiência de interceptação (ϵ_i), a eficiência de absorção (ϵ_a), o coeficiente de extinção de luz (k) e a eficiência de uso da PAR pelas culturas (RUE), conforme demonstrado em Dalmago et al. [30].

3.3.9 Saldo de Radiação (Rn)

O saldo de radiação foi medido com saldo radiômetros, modelo NR-LITE2-L, da marca Kipp & Zonen, comercializados pela Campbell Scientific, Inc. Os mesmos foram instalados em hastes de metal, mantendo o sensor nivelado a 1,5 m de altura da superfície do solo. A parte sensível dos sensores foi posicionada sempre sobre uma linha de plantas, independente da cultura. Limpezas frequentes foram realizadas na parte sensível para manter a eficiência das leituras.

No experimento de 2015 foram instaladas duas repetições, enquanto que nos experimentos de 2016 e 2017 foi utilizada apenas uma repetição, tanto no padrão *On Farm*, quanto na estratégia *Double Farm*. Em 2015 as leituras iniciaram 13 dias após a emergência (DAE), em 2016 foi 3 DAE e em 2017 iniciou no dia da sementeira do trigo, permanecendo até a maturação fisiológica e/ou colheita das plantas para avaliação do rendimento de grãos. No experimento de soja foram utilizadas 4 repetições em 2015 e duas repetições nos experimentos de 2016 e 2017. As leituras iniciaram no dia da sementeira da soja, exceto no experimento de 2016, que foi um dia após a mesma, e foram realizadas, de maneira ininterrupta, até a maturação fisiológica e/ou colheita da lavoura. Para o saldo de radiação foram registrados apenas valores de 15 em 15 minutos.

3.3.10 Temperatura da Superfície do Dossel

A temperatura da superfície do dossel foi medida em ambas as culturas durante todos os experimentos, com termômetros infravermelhos, modelo SI-111, da marca Apogee Instruments. Os termômetros foram instalados em hastes de metal, em um ângulo de inclinação de 45°. A extremidade de leitura foi mantida entre 30 e 50 cm acima do dossel, realizando-se os ajustes de posicionamento de altura até o final do ciclo das plantas, conforme o crescimento do dossel. Frequentemente foi realizada a limpeza da lente de leitura dos comprimentos de onda emitidos pelas superfícies.

Para a cultura do trigo, no experimento de 2015 foram instaladas duas repetições, e nos experimentos de 2016 e 2017 foi instalada uma repetição, tanto no padrão *On Farm*, quanto na estratégia *Double Farm*. As leituras iniciaram cerca de 40 DAE em 2015, 17 DAE em 2016 e 10 DAE em 2016, permanecendo até a maturação fisiológica e/ou colheita das plantas para avaliação do rendimento de grãos. No experimento de soja foram instaladas quatro repetições em 2015 e duas repetições em 2016 e 2017. O início das leituras ocorreu em 9 DAE, em 2015, no dia da emergência em 2016 e 7 DAE em 2018, e foram realizadas de maneira ininterrupta, até a maturação fisiológica e/ou colheita da lavoura. Para temperatura da superfície do dossel em ambas as culturas foram feitos registros de valores médios, máximos e mínimos de 15 minutos e diários.

3.3.11 Perfil Vertical de temperatura, Umidade Relativa do Ar e Vento

No centro das áreas experimentais de trigo e soja, no padrão *On Farm*, próximo aos transectos de coleta de dados, em todos os experimentos foi instalada uma torre micrometeorológica de quatro metros de altura, construída com hastes de metal. A torre foi fixada ao solo em uma haste metálica enterrada e mantida estável, em nível, com auxílio de três tirantes feitos de fios (arame) de metal e distribuídos em formato triangular.

Nas alturas de 0,5 m, 1,0 m, 2,0 m e 4,0 m acima do dossel, foi instalado um sensor conjugado, modelo HC2S3-L, da Campbell Scientific, Inc, para medição da temperatura e da umidade relativa do ar. Na extremidade oposta aos sensores de temperatura e umidade relativa do ar, nas mesmas alturas, foi instalado um anemômetro sônico bidirecional, modelo WINDSONIC1-L34, marca GILL,

para medição da velocidade e direção do vento. Ambos os conjuntos de sensores formaram um perfil vertical exponencial de variação dos fluxos térmico, hídrico, de momentum e da direção do vento. Sempre que as plantas atingiram 30 cm do conjunto de sensores mais próximos à base, a torre foi erguida, deixando o respectivo conjunto de sensores, novamente a 0,5 m em relação ao topo de dossel. Para todas as variáveis foram feitos registros diários de valores médio, máximo e mínimo, a cada 15 min.

3.3.12 Fluxo de Calor no Solo

O fluxo de calor no solo foi medido com placas de fluxo de calor no solo, modelo HFP01SC da marca Hukseflux. Nos experimentos de trigo foram instaladas quatro repetições em 2015 e duas repetições em 2016 e 2017, tanto no padrão *On Farm*, quanto na estratégia *Double Farm*. Em 2015 e 2017 as leituras iniciaram no dia da emergência das plantas e em 2016 o início ocorreu 2 DAE e prosseguiram até o término do ciclo das plantas. Nos experimentos de soja foram instaladas oito repetições em 2015, quatro repetições em 2016 e seis repetições em 2017, com início das medições na data de emergência da soja, em todos os experimentos, e foram realizadas até o término do ciclo das plantas.

Na instalação das placas de fluxo de calor no solo, em todos os experimentos de ambas as culturas, a metade delas foram instaladas na linha e a outra metade entre as linhas de planta. Todos os sensores foram instalados na profundidade de 1 cm, mediante a retirada do solo e a sua recolocação após o posicionamento das placas. Para evitar a movimentação do sensor no solo e sua retirada acidental, o cabo do sensor foi preso ao solo com grampos de metal.

3.3.13 Molhamento foliar

Em todos os experimentos de trigo e soja, o molhamento foliar foi medido com sensor LWS – *Dielectric Leaf Wetness Sensor*, da Decagon Devices, licenciado pela Campbell Scientific, Inc. Os sensores foram instalados em hastes de metal com um metro de altura, com sistema de deslizamento pela haste, conforme o crescimento da cultura e/ou objetivo da coleta de dados.

No experimento de trigo de 2015 foram instaladas duas repetições, com início das medições em 40 DAE. Neste experimento, os sensores foram mantidos sempre próximos ao topo das plantas pelo ajuste da posição, à medida que as plantas cresciam em altura. Nos experimentos de 2016 e 2017 foi utilizado apenas uma repetição de um perfil de quatro sensores instalados nas alturas de 10, 20, 40 e 80 cm. Para estes dois anos as leituras iniciaram em 17 DAE e 9 DAE, respectivamente. O deslocamento dos sensores seguiu a ordem do sensor mais próximo ao topo do dossel e quando o respectivo sensor atingia a altura pré-determinada, aquele imediatamente superior era deslocado para o topo do dossel. Este, por sua vez foi deslocado até atingir a sua posição pré-determinada no perfil e assim sucessivamente. Desta forma, após a cultura atingir sua altura máxima de dossel, estabeleceu-se o perfil de molhamento no interior do dossel.

Para os experimentos com soja, a lógica foi a mesma daqueles com o trigo. Nos experimentos de 2015 e 2016 foram utilizadas quatro repetições de sensores LWS em cada ano. Os mesmos foram instalados em hastes de metal e os quatro sensores foram mantidos no topo do dossel mediante deslocamento constante, à medida que as plantas cresciam. Para estes dois experimentos as leituras iniciaram na data de emergência das plantas e em 35 DAE, respectivamente. No experimento de 2017 foram instalados três perfis, com sensores instalados nas mesmas alturas dos experimentos de trigo de 2016 e 2017. O deslocamento dos sensores seguiu os mesmos procedimentos realizados nos experimentos de trigo. Em 2017 as leituras iniciaram na data de emergência das plantas.

O período de molhamento foliar foi calculado pelo tempo em que a leitura do sensor acusou valores iguais ou maiores do que 284 mV, conforme especificado no manual do sensor. Essa cotação foi feita independente do dia civil, ou seja, a cotação foi feita considerando o início e o fim do molhamento foliar.

3.3.14 Fluxos de CO₂, Água e Calor

Nos experimentos de trigo (*On Farm*) e soja, e nos experimentos de pousio (será detalhado posteriormente), entre os experimentos de trigo e soja manteve-se instalado nas respectivas áreas, um sistema de coleta de dados Eddy Covariance, modelo EC150-SH-EB, composto com sensor analisador de H₂O e CO₂ aberto, integrado ao anemômetro sônico CSAT3 e barômetro avançado, marca Campbell Scientific, Inc., controlado por um *datalogger*, modelo CR1000, também da marca Campbell Scientific, Inc. Os sensores foram instalados em um tripé e posicionados na altura fixa de 1,5 m acima do solo, de forma que a altura variou na mesma taxa de crescimento das culturas. O conjunto do tripé e sensores foi reposicionado ao término e ao início de cada experimento com as culturas de trigo e soja, bem como no início e término de cada experimento de pousio. Devido a problemas operacionais o sistema de coleta de dados Eddy Covariance foi instalado no experimento de trigo *On Farm* de 2015 e início daquele de 2016, no primeiro experimento de pousio de primavera, no primeiro experimento de soja de 2015/2016 e no primeiro experimento de pousio de outono de 2016.

O processamento dos dados foi realizado conforme Veeck [31]. As trocas de energia na forma de calor sensível e latente foram estimadas a partir dos dados de alta frequência (10 Hz), e os fluxos foram calculados usando média em bloco de 30 minutos através do software EddyPro, que utiliza o método da covariância dos vórtices (*Eddy Covariance*).

3.3.15 Monitoramento da Umidade do Solo

O monitoramento da variação da umidade volumétrica do solo, em todos os experimentos de trigo e soja, foi feito com sensores TDR, modelo CS616 – *Water Content Reflectometers*, marca Campbell Scientific, Inc. O *datalogger*, modelo CR1000, equipado com multiplexador de canais, modelo AM16/32B, ambos da Campbell Scientific, Inc, foi programado para leituras com frequência de

amostragem e registros horários. A variação do conteúdo de água no solo foi medida nas profundidades de 5, 10, 20, 30 e 40 cm, e nas camadas de solo de 0 a 30 cm e 50 a 80 cm, em todos os experimentos com trigo e soja.

No experimento de trigo de 2015 foram instaladas duas repetições, apenas no padrão *On Farm*, em 30/07/2015 (40 DAE). Nos experimentos de 2016 e 2017 foi instalada uma repetição no *On Farm* e uma no *Double Farm*, em 12/06/2016 (16 DAE) e 20/07/2017 (35 DAE), respectivamente. Para os experimentos com soja foram instaladas duas repetições no de 2015/2016, três no de 2016/2017 e duas no de 2017/2018. Nos dois primeiros experimentos, a instalação dos TDRs foi realizada no dia da emergência das plantas, em 24/11/2015 e 16/11/2016, respectivamente, enquanto que no último experimento a instalação ocorreu em 21/11/2017, sete dias após a emergência das plantas.

Para a instalação dos TDRs foi aberta uma pequena trincheira até 50 cm de profundidade na entrelinha de plantas. No caso do trigo, como a entrelinha é menor do que a da soja, foi retirada uma linha de plantas no formato de um bloco de solo e depois as plantas foram recolocadas no local original. Os TDRs das profundidades de 5 a 40 cm foram inseridos horizontalmente no solo, transversalmente à linha plantas. Os TDRs das camadas 0 a 30 cm e 50 a 80 cm foram instalados verticalmente no solo, sendo um instalado na superfície (0 a 30 cm) e outro dentro da trincheira (50 a 80 cm).

As leituras de teor de água no solo foram feitas até o final do ciclo da cultura, no estágio de maturação fisiológica dos grãos. O valor registrado às 09h foi utilizado para representar a leitura da umidade do solo para o respectivo dia.

3.3.16 Períodos de Pousio entre os Experimentos

Os períodos de pousio foram divididos em dois tipos de experimentos: aqueles que ocorreram entre o término dos experimentos com trigo e o início dos experimentos de soja (primavera), e aqueles que ocorreram entre o término dos experimentos com soja e o início dos experimentos de trigo da safra seguinte (outono), ou término do ciclo experimental. Para os tipos de experimento de pousio de primavera foram realizados dois experimentos: o primeiro foi de 29/10/2015 a 16/11/2015 (18 dias) e o segundo de 07/11/2017 a 13/11/2017 (5 dias). Entre o final do experimento de trigo e o início do experimento com soja em 2016, não houve experimento de pousio devido a colheita do trigo e a semeadura da soja terem ocorrido no mesmo dia (08/11/2016). Para o período de outono foram realizados três experimentos de pousio: o primeiro foi de 30/03/2016 a 13/06/2016 (75 dias), o segundo foi de 24/03/2017 a 15/06/2017 (83 dias) e o terceiro foi de 03/04/2018 a 13/06/2018 (71 dias).

Nos experimentos de pousio de primavera sobre a área experimental *On Farm*, foram avaliadas variáveis micrometeorológicas influenciadas pela palha do trigo sobre o solo. Para a instalação dos sensores foi estabelecido um transecto no centro da faixa de distribuição da palha deixada pela colhedora, paralelo ao deslocamento da mesma na lavoura. No primeiro experimento de pousio foram instalados os seguintes sensores/conjunto de sensores: torre micrometeorológica para medição do perfil de temperatura e umidade relativa do ar e de vento; dois sensores PAR (barras de

medição da radiação solar fotossinteticamente ativa) instalados para medir radiação PAR refletida pela cobertura do solo; um saldo radiômetro para medição do Rn; duas placas de fluxo de calor no solo; e o sistema de coleta de dados *Eddy Covariance*. Neste experimento os sensores foram instalados no dia de colheita da área *On Farm* pelo agricultor, em 29/10/2015. No segundo experimento de pousio de primavera os sensores foram instalados em 07/11/2017, XX após a colheita da área *On Farm* pelo agricultor. Neste experimento foi instalada apenas a torre micrometeorológica para medição do perfil de temperatura e umidade relativa do ar e de vento, devido ao atraso na instalação dos sensores e perda dos valores iniciais mais importantes, e também, devido ao período muito curto de medição.

Nos experimentos de pousio de outono foram avaliadas variáveis micrometeorológicas sobre a palha da soja. Para a instalação dos sensores no primeiro e segundo experimentos, seguiu-se a mesma estratégia utilizada nos experimentos de pousio de primavera. Foi estabelecido um transecto no centro da faixa de distribuição da palha deixada pela colhedora, paralelo ao deslocamento da mesma na lavoura, onde os mesmos foram instalados. No terceiro experimento uma repetição de sensores foi instalada também entre as linhas de distribuição de palha pela colhedora, uma vez que a distribuição de palha se mostrou mais desuniforme do que nos experimentos anteriores.

O primeiro experimento de pousio de outono foi iniciado um dia após a colheita, em 31/03/2016. Neste experimento foram instalados os seguintes sensores: torre micrometeorológica para medição do perfil de temperatura e umidade relativa do ar e de vento; quatro sensores PAR (barras de medição da radiação solar fotossinteticamente ativa), instalados para medir radiação PAR refletida pela cobertura do solo; dois saldo radiômetros para medição do Rn; quatro placas de fluxo de calor no solo; sistema de coleta de dados *Eddy Covariance*; dois termômetros infravermelhos para medição da temperatura de superfície; e duas repetições de quatro TDRs para medição da umidade do solo nas profundidades de 5, 10, 15 cm e na camada de 20 cm a 50 cm. Os TDRs foram instalados em 05/04/2016.

O segundo experimento de pousio de outono iniciou em 28/03/2017, cinco dias após a colheita da soja na área pelo agricultor. Neste experimento foram instalados os seguintes sensores: torre micrometeorológica para medição do perfil de temperatura e umidade relativa do ar e de vento; quatro sensores PAR (barras de medição da radiação solar fotossinteticamente ativa), instalados para medir radiação PAR refletida pela cobertura do solo; dois saldo radiômetros para medição do Rn; quatro placas de fluxo de calor no solo; dois termômetros infravermelhos para medição da temperatura de superfície; duas repetições de quatro TDRs para medição da umidade do solo nas profundidades de 5, 10, 15 cm e na camada de 20 cm a 50 cm; e uma repetição de termopares tipo T para medição da temperatura de solo nas profundidades de 2, 5, 10, 20, 30, 40 e 50 cm. Os TDRs e os termopares tipo T foram instalados em 11/04/2017.

O terceiro experimento de pousio de outono iniciou em 09/04/2018, seis dias após a colheita da soja na área pelo agricultor. Neste experimento foram instalados sensores em dois transectos: um conjunto no centro da faixa de distribuição de palha da soja pela colhedora e outro conjunto entre as faixas de distribuição de palha. Para a medição da temperatura e umidade relativa do ar, e para a medição da velocidade e direção do vento, foi instalado apenas um sensor capacitivo e um

sensor sônico, respectivamente. Para as demais variáveis foi instalado um conjunto sobre a faixa de distribuição de palha e um entre as faixas, compostos da seguinte forma: quatro sensores PAR (barras de medição da radiação solar fotossinteticamente ativa), instalados para medir radiação PAR refletida pela cobertura do solo; um saldo radiômetro para medição do R_n ; duas placas de fluxo de calor no solo; um termômetro infravermelho para medição da temperatura de superfície; e três repetições de TDRs para medição da umidade do solo na camada de 0 a 20 cm. Os TDRs e o termômetro infravermelho foram instalados em 17/04/2017.

Em todos os experimentos de pousio a instalação dos sensores de medição das variáveis micrometeorológicas seguiu o mesmo procedimento descrito para os experimentos de trigo e soja, exceto a parte referente à movimentação dos mesmos, a qual não ocorreu pelo fato de não haver plantas crescendo sobre o solo. Também, manteve-se o mesmo tempo de coleta e registro de dados pelos *dataloggers*. Além dos sensores utilizados em cada experimento de pousio, foi mantida a estrutura de medição dos dados de monitoramento de variáveis ambientais no mesmo formato, relacionado no item específico.

Nos experimentos de pousio de outono, além das medições de variáveis micrometeorológicas, foi feita a avaliação da taxa de decomposição da palha da soja deixada na superfície do solo após a colheita. Para isso, foram marcados previamente, transectos na parte central das faixas de distribuição da palha da soja pela colhedora, os quais foram amostrados semanalmente em conjunto de quatro repetições. O procedimento de amostragem consistiu na marcação de um metro quadrado no centro do transecto, em que toda a palha da soja e outros restos vegetais foram recolhidos e colocados em embalagens de algodão. As quatro repetições foram trazidas para o laboratório e colocados em estufa de secagem de material vegetal, a 65 °C, com ventilação forçada, até apresentarem massa da matéria seca constante. Após retiradas da estufa a massa da matéria seca das amostras foi determinada em balança de precisão. No experimento de outono de 2018, amostras de palha também foram coletadas de transectos marcados entre as faixas de distribuição de palha pelas colhedoras, seguindo o mesmo procedimento de amostragem e determinação da massa da matéria seca adotado para as amostragens sobre a faixa de distribuição de palha.

3.3.17 Análise de Dados

A análise de dados foi realizada conforme a resposta característica de cada variável ao longo do tempo e de acordo com os estádios de crescimento e desenvolvimento das plantas. O efeito do ano foi considerado aleatório. Foram utilizadas análise de regressão linear e não linear, baseadas em modelos mistos. A análise de correlação também foi realizada quanto a distribuição de probabilidade da variável permitiu. As análises foram orientadas para a obtenção dos coeficientes dos parâmetros clássicos de crescimento e desenvolvimento das plantas e da interação destas com os sistemas de solo e atmosfera.

3.3.18 Simulação do Experimento na Crop Rotation Tool

Para a simulação do sistema de produção trigo e soja em Carazinho, Rio Grande do Sul, Brasil, experimento realizado de 2015 à 2018, utilizou-se o DSSAT 4.7.5 com a interface multiplataforma Crop Rotation Tool 1.2.5 em um computador com sistema operacional Windows 10, 8GB de RAM e processador Intel Core i5 2.9GHz.

O arquivo de experimento nomeado de EBCZ1501.SQX foi editado com o auxílio da Crop Rotation Tool, a qual possibilita a edição de arquivos de sequência do DSSAT. A Figura 19 apresenta o experimento carregado na interface com seus onze tratamentos cujos painéis de configurações estão em modo compacto, apresentando apenas as principais informações como: nome do tratamento, cultura, cultivar, data de plantio e colheita.

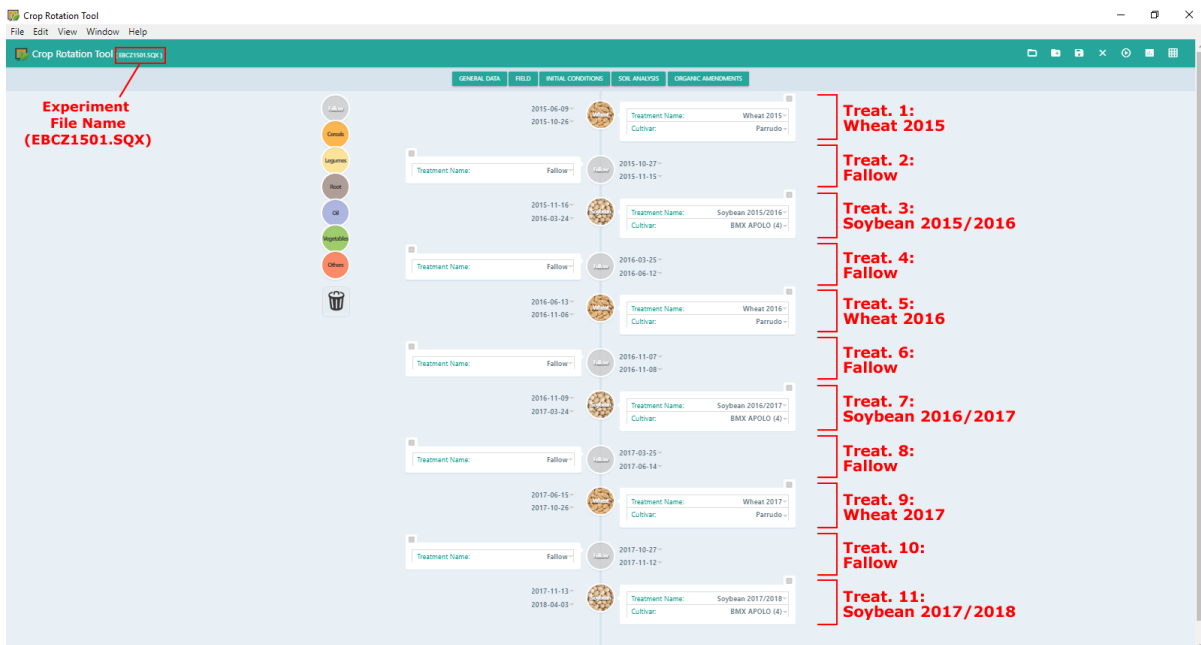


Figura 19. Treatments in the Crop Rotation Tool.

Os dados observados do experimento foram utilizados para comparar com os dados simulados na ferramenta, a qual possibilita comparação visual por meio de gráficos interativos.

Os dados observados foram armazenados nos arquivos EBCZ1501.SQA e EBCZ1501.SQT, os quais foram criados e disponibilizados na pasta *Sequence* do DSSAT para que a Crop Rotation Tool pudesse ter acesso aos mesmos.

Para a realização da simulação do experimento, tornou-se necessária a adição de arquivos de solo e clima nas pastas do DSSAT, bem como dos dados dos cultivares de trigo e soja do Brasil nos arquivos do DSSAT. A configuração desse sistema seguiu-se os seguintes passos:

1. Criação e adição do arquivo de solo EB.SOL na pasta *Soil* do DSSAT;
2. Criação e adição dos arquivos de clima EBCZ1501.WTH, EBCZ1601.WTH, EBCZ1701.WTH e EBCZ1801.WTH na pasta *Weather* do DSSAT, os quais possuem respectivamente, os dados

de clima dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018 coletados pela estação meteorológica da Embrapa Trigo;

3. Inclusão dos dados do cultivar de trigo BRS Parrudo no arquivo WHAPS047.CUL (arquivo do modelo de simulação NWheat), localizado na pasta *Genotype* do DSSAT;
4. Inclusão dos dados do cultivar de soja BMX Apolo no arquivo SBGRO047.CUL (arquivo do modelo de simulação CRGRO), localizado na pasta *Genotype* do DSSAT;

Para a geração do gráfico de resultados na Crop Rotation Tool, seguiu-se os seguintes passos:

1. Carregou-se o experimento na interface;
2. Executou-se a simulação;
3. Abriu-se o *wizard* para geração do gráfico;
4. Na etapa 1 do *wizard* selecionou-se o arquivo de saída EBCZ1501.OPG (*Daily plant growth*), a variável do eixo X DAP (*Days After Planting*) e as variáveis do eixo Y, neste caso selecionada apenas a variável GWAD (*Grain wt kg/ha*). Foram utilizadas também as variáveis LWAD (*Leaf wt kg/ha*), SWAD (*Stem wt kg/ha*) e CWAD (*Tops wt kg/ha*) em outras visualizações;
5. Na etapa 2, para visualização dos dados de trigo selecionou-se as *runs* 1, 5 e 9. Já para a visualização dos dados de soja selecionou-se as *runs* 3, 7 e 11;
6. Na etapa 3 manteve-se selecionado o *Plot Mode "Lines"*;
7. Na etapa 4 visualizou-se o gráfico gerado com os dados simulados e observados, onde foi possível realizar a comparação entre os mesmos.

Tabela 5. Soil characteristics used in the experiment.

Depth cm	Particle size distribution, %		Bulk density g cm ⁻³	Lower limit cm ³ cm ⁻³	Upper limit, drained cm ³ cm ⁻³	Upper limit, saturated cm ³ cm ⁻³	Root growth factor 0 to 1 scale
	clay	silt					
0-5	51	15	1.4	0.23	0.408	0.449	1
5-10	52	15	1.46	0.245	0.41	0.431	1
10-20	54	14	1.57	0.27	0.387	0.388	0.9
20-30	56	15	1.52	0.271	0.396	0.404	0.7
30-40	64	12	1.41	0.286	0.442	0.446	0.5
40-70	67	12	1.35	0.29	0.460	0.473	0.1
70-100	72	13	1.32	0.303	0.483	0.490	0.01

3.4 RESULTADOS

3.4.1 Cenário 01: Grain wt kg/ha (Wheat 2015 x Wheat 2016 x Wheat 2017)

No primeiro cenário realizou-se uma comparação da variável GWAD (*Grain wt kg/ha*) nas 3 *runs* (1, 5 e 9) da cultura de trigo, nos respectivos anos de plantio e colheita: 2015, 2016 e 2017,

Tabela 6. Genetic coefficients of cultivar BMX Apolo obtained in calibration experiments.

Cultivar trait	Acronym	Unit	Genetic coefficients
Critical short day length below which reproductive development progresses with no daylength effect (for shortday plants) (hour)	CSDL	h	12.83
Slope of the relative response of development to photoperiod with time	PPSEN	h ⁻¹	0.303
Time between plant emergence and flower appearance (R1)	EM-FL	Photothermal day	19.8
Time between first flower and first pod (R3)	FL-SH	Photothermal day	8.0
Time between first flower and first seed (R5)	FL-SD	Photothermal day	15.5
Time between first seed (R5) and physiological maturity (R7)	SD-PM	Photothermal day	34.80
Time between first flower (R1) and end of leaf expansion	FL-LF	Photothermal day	18.00
Maximum leaf photosynthesis rate at 30 C, 350 vpm CO ₂ , and high light	LFMAX	CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	1.030
Specific leaf area of cultivar under standard growth conditions	SLAVR	cm ² g ⁻¹	375.0
Maximum size of full leaf (three leaflets)	SIZLF	cm ²	180.0
Maximum fraction of daily growth that is partitioned to seed + shell	XFRT		1.00
Maximum weight per seed	WTPSD	g	0.18
Seed filling duration for pod cohort at standard growth conditions	SFDUR	Photothermal day	23.0
Average seed per pod under standard growing conditions	SDPDV	Numbers per pod	2.05
Time required for cultivar to reach final pod load under optimal conditions	PODUR	Photothermal day	10.0
Threshing percentage. The maximum ratio of (seed/(seed+shell)) at maturity. Causes seeds to stop growing as their dry weight increases until shells are filled in a cohort	THRSH		78.0
Fraction protein in seeds	SDPRO	$\frac{\text{g}^{\text{protein}}}{\text{g}^{\text{seed}}}$	0.400
Fraction oil in seeds	SDLIP	$\frac{\text{g}^{\text{oil}}}{\text{g}^{\text{seed}}}$	0.200

Tabela 7. Genetic coefficients of cultivar BRS Parrudo obtained in calibration experiments.

Cultivar trait	Acronym	Unit	Genetic coefficients
Sensitivity to vernalisation	VSEN		2.50
Sensitivity to photoperiod	PPSEN		4.00
Thermal time from seedling emergence to the end of the juvenile phase	P1		400.0
Thermal time (base 0oC) from beginning of grainfill to maturity	P5	range 500 to 700	700.0
Phyllochron interval	PHINT		100.0
Coefficient of kernel number per stem weight at the beginning of grain filling	GRNO	kernels (g stem) ⁻¹	24.0
Potential kernel growth rate	MXFIL	mg kernel day ⁻¹ ; Values between 1.0 and 3.0	2.10
Potential final dry weight of a single tiller (excluding grain)	STMMX	g stem ⁻¹ values 1.0 - 3.0	3.00
Ratio of leaf area to mass at emergence	SLAP1	cm ² g ⁻¹	300.0
Ratio of leaf area to mass at end of leaf growth	SLAP2	cm ² g ⁻¹	225.0
For calculating tc1: tiller number from emerg. to term. spik.(=stem elongation)	TC1P1		2.50
tc1 = tc1_p1 + tc1_p2 *cumph_nw(istage)	TC1P2		1.00
For calculating dt1n: tiller number after term. spik.(=stem elongation)	DTNP1		0.005
For calculating plag: potential leaf growth. plag= plag_p1*cumph(istage)**plag_p2	PLGP1		1400.
For calculating plag: potential leaf growth. plag= plag_p1*cumph(istage)**plag_p2	PLGP2		0.60
Threshold AD in a layer becoming effective on root growth	P2AF		0.60
Length of downwards root not effected under aeration deficit	P3AF		50.0
Days to be accumulated before aeration deficit effects root growth	P4AF		3.00
Power term at af1	P5AF		1.00
Days to be accumulated before aeration deficit effects crop growth	P6AF		3.00
Threshold aeration deficit (AF2) affecting LAI	ADLAI	1.0 = no stress run	1.00
Threshold aeration deficit (AF2) effecting tillering	ADTIL	1.0 = no stress run	1.00
Threshold aeration deficit (AF2) effecting photosyn.	ADPHO	1.0 = no stress run	1.00
0=original C to grain translocation, >0 to 1.0 sets % of C of stem to be transloc. to grain	STEMN		0.00
Max N uptake per day	MXNUP		0.60
0.035=20%, .04=23% protein, max n:c ratio of grain growth	MXNCR		0.040
Power term for water effect on N supply	WFNU		2.00
Potential uptake rate	PNUPR	mg meter ⁻¹ day ⁻¹	0.450
Exponent for NO3 supply factor	EXNO3		6.75
Minimum for NO3 supply factor	MNNO3		0.00
Exponent for NH4 supply factor	EXNH4		6.50
Minimum for NH4 supply factor	MNNH4		0.00
Initial grain weight	INGWT	mg grain ⁻¹	3.50
% protein, initial grain N conc (init_grain_nconc or p_init_grain_nconc from APSIM Nwheat)	INGNC		0.030
Fraction between end ear and begin grainfilling, setting min stem weight for remobilisation	FREAR		0.250
% protein, min n:c ratio of grain growth	MNNCR		1.230
gpp_start_stage - Grain per plant: 2=stem elong., 3=end leaf stage at which to start accumo. stem for gpp calc.	GPPSS		2.00
gpp_end_stage - Start grainfilling stage at which to end accumulation stem for Grain per plant calc	GPPES		5.00
Maximum kernal weight	MXGWT	100 = no effect	55.0
Min root n due to grain n initialisation (root_n_min or p_root_n_min from APSIM Nwheat)	MNRTN	0 = off	4.50
Fraction of accum stem weight that is not mobile	NOMOB	0 = original	0.250
Sw effect	RTDP1	0 = old version	1
Crop stress effect	RTDP2	0 = old version	1

através do gráfico de visualização na Crop Rotation Tool. A Figura 20 apresenta o gráfico gerado com título e legenda, onde os dados simulados estão representados pelas linhas no gráfico e os observados pelos pontos.

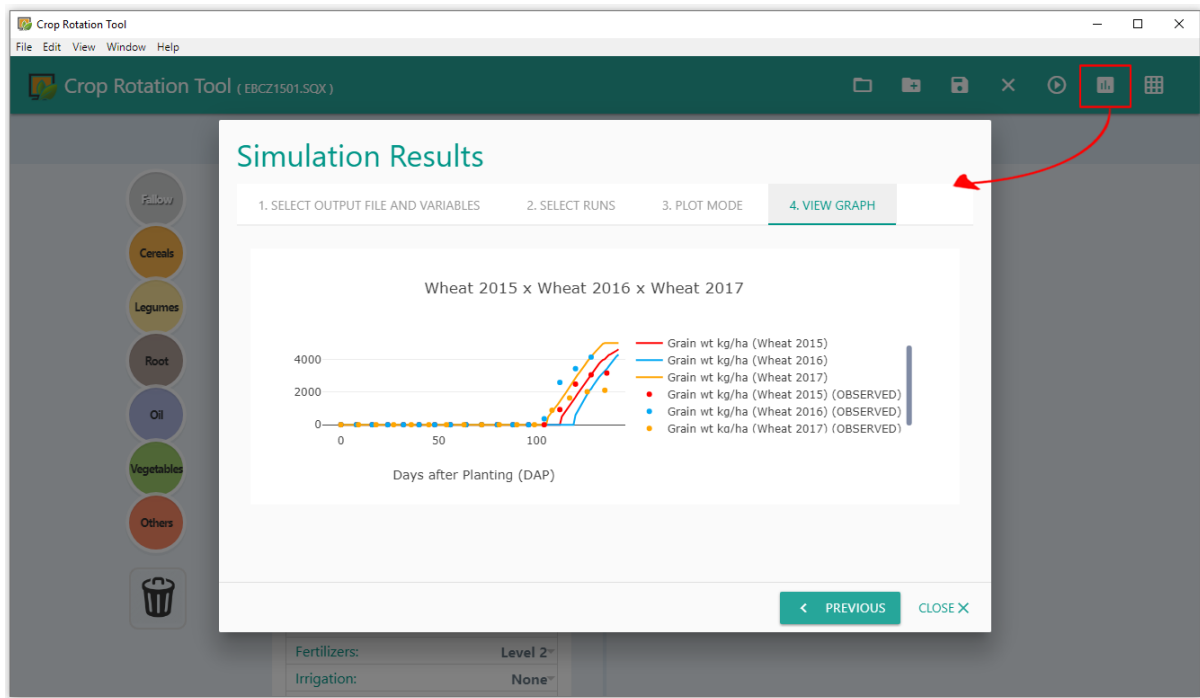


Figura 20. Grain wt kg/ha (Wheat 2015 x Wheat 2016 x Wheat 2017).

3.4.2 Cenário 02: Grain wt kg/ha (Soybean 2015/2016 x Soybean 2016/2017 x Soybean 2017/2018)

No segundo cenário realizou-se uma comparação da variável GWAD (*Grain wt kg/ha*) nas 3 *runs* (3, 7 e 11) da cultura de soja, nos respectivos intervalos de plantio e colheita: 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018, através do gráfico de visualização na Crop Rotation Tool, onde os dados simulados estão representados pelas linhas no gráfico, já os observados estão representados pelos pontos, conforme apresentado na Figura 21.

3.4.3 Cenário 03: Exploração de Dados Simulados

Além da visualização por meio de gráficos, foi possível através da Crop Rotation Tool explorar os dados simulados em uma tabela. Nesse cenário explorou-se os dados das diversas variáveis simuladas na *run* 1 (Wheat 2015), conforme apresentado na Figura 22.

Para a visualização da tabela de resultados simulados na Crop Rotation Tool, seguiu-se os seguintes passos:

1. Carregou-se o experimento na interface. Como a simulação já havia sido executada anteriormente não foi necessário executá-la novamente, pois os arquivos de saída gerados pelo modelo de simulação já existiam na pasta *Sequence* do DSSAT;
2. Abriu-se o *wizard* para geração da tabela;

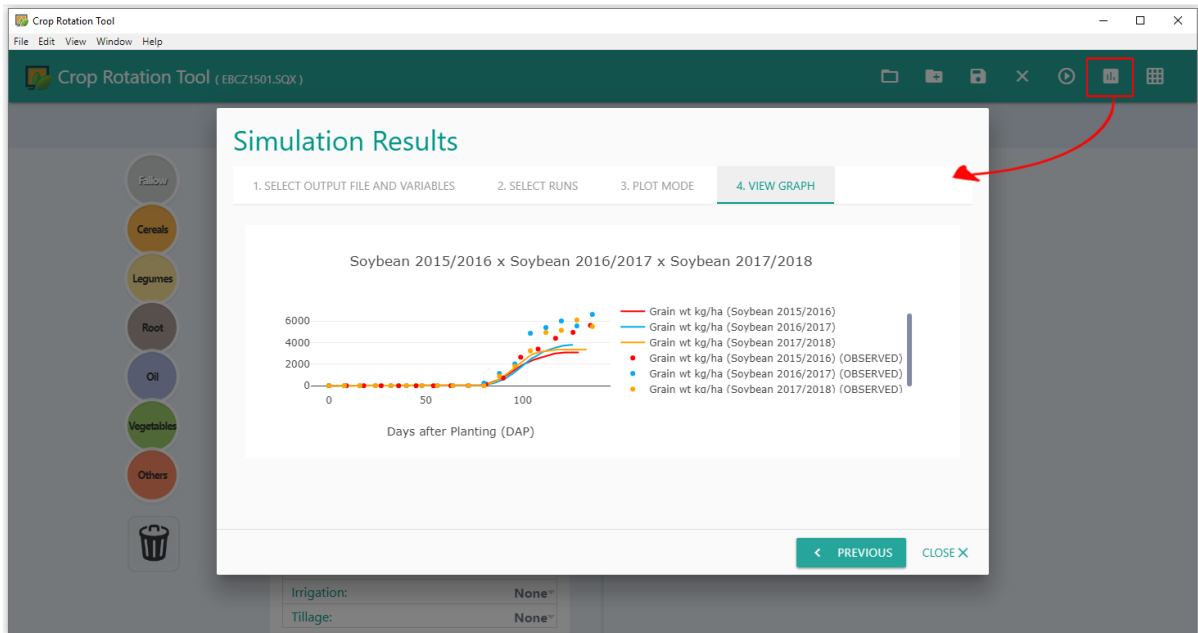


Figura 21. Grain wt kg/ha (Soybean 2015/2016 x Soybean 2016/2017 x Soybean 2017/2018).

Simulation Results

1. SELECT AN OUTPUT FILE 2. SELECT A RUN 3. VIEW DATA TABLE

@YEAR	DOY	DAS	DAP	DCCD	GSTD	LAID	LWAD	SWAD	GWAD	RWAD	VWAD	CWAC
2015	270	171	110	68.566	4	2.409	1927	3566	0	1680	7385	7385
2015	271	172	111	69.189	4	2.379	1927	3772	0	1686	7591	7591
2015	272	173	112	69.882	4	2.349	1927	3992	0	1694	7812	7812
2015	273	174	113	70.434	5	2.315	1927	3677	494	1695	7496	7990
2015	274	175	114	71.002	5	2.312	1927	3683	658	1696	7503	8161
2015	275	176	115	71.547	5	2.306	1927	3560	851	1686	7380	8231
2015	276	177	116	71.939	5	2.296	1927	3519	1011	1680	7338	8349
2015	277	178	117	72.346	5	2.287	1927	3575	1164	1682	7394	8558
2015	278	179	118	72.845	5	2.276	1927	3617	1311	1684	7436	8747
2015	279	180	119	73.486	5	2.260	1927	3572	1493	1680	7392	8885

Showing 111 to 120 of 143 entries

PREVIOUS 1 ... 11 12 13 14 15 NEXT

PREVIOUS CLOSE X

planting date: 2016-06-12 Treatment Name: Follow

Figura 22. Exploração dos dados simulados (Wheat 2015).

3. Na etapa 1 do *wizard* selecionou-se o arquivo de saída EBCZ1501.OPG (*Daily plant growth*);
4. Na etapa 2, para visualização dos dados de trigo selecionou-se a *run* 1 (wheat 2015);
5. Na etapa 3 visualizou-se a tabela gerada com os dados simulados, onde foi possível explorar os dados das diversas variáveis simuladas.

3.4.4 RMSE (Root Mean Square Error)

A RMSE (Raiz do Erro Médio Quadrático) é a medida de erro mais comumente usada para aferir a qualidade do ajuste de um modelo. Ela é a raiz do erro médio quadrático da diferença entre o valor simulado e o valor real [32]. Pode-se pensar nela como sendo uma medida análoga ao desvio padrão. A medida pode ser representada pela equação 4,

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2} \quad (4)$$

onde M_i e S_i representam, respectivamente, valores medidos e simulados para cada instância i (safra), e n é o número total de dados no intervalo considerado.

A Tabela 8 apresenta os valores simulados, observados e a RMSE de cinco variáveis analisadas durante o período de 2015 a 2017 com a cultura do trigo. A RMSE corresponde aos valores simulado x observado referentes às três safras de trigo, para cada variável analisada.

Tabela 8. Valores simulados e observados durante o período de 2015 a 2017 com a cultura do trigo em propriedade rural no município de Carazinho, RS.

Variable	Wheat 2015		Wheat 2016		Wheat 2017		RMSE
	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	
Anthesis day (dap)	93	91	102	106	97	96	2.64
Physiological maturity day (dap)	134	127	142	141	135	131	4.08
Yield at harvest maturity (kg [dm]/ha)	4064	3087	4584	4001	3951	3013	851.32
Tops weight at maturity (kg [dm]/ha)	11037	9235	12879	9436	11921	7837	3254.76
Leaf area index, maximum	3.15	4.49	4.38	5.78	4.62	4.12	1.15

A Tabela 9 apresenta os valores simulados, observados e a RMSE de seis variáveis analisadas durante o período de 2015 a 2018 com a cultura da soja. A RMSE corresponde aos valores simulado x observado referentes às três safras de soja, para cada variável analisada.

Tabela 9. Valores simulados e observados durante o período de 2015 a 2018 com a cultura do soja em propriedade rural no município de Carazinho, RS.

Variable	Soybean 2015/2016		Soybean 2016/2017		Soybean 2017/2018		RMSE
	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	
Yield at harvest maturity (kg [dm]/ha)	3908	4463	4100	5013	4258	4027	631.12
Number at maturity (no/m ²)	2331	3623	2701	3273	2595	3723	1043.84
Unit wt at maturity (g [dm]/unit)	0.16	0.15	0.15	0.18	0.16	0.16	0.01
Tops weight at maturity (kg [dm]/ha)	8546	9211	10626	11318	9200	11903	1656.02
Leaf area index, maximum	3.32	5.56	5.86	8.13	5.45	8.46	2.95
Harvest index at maturity	0.45	0.46	0.38	0.44	0.46	0.42	0.04

3.5 DISCUSSÃO

A edição do experimento de sequência "EBCZ1501.SQX" pode ser realizada pelo XBuild do DSSAT. Os tratamentos nessa ferramenta são visualizados e editados em uma interface semelhante a uma tabela ou planilha, onde basicamente utiliza-se os códigos numéricos para representar cada

conjunto de informação, conforme apresenta a Figura 23(a). Já na Crop Rotation Tool os tratamentos são visualizados em uma *timeline* onde o nome dos tratamentos, as culturas, cultivares e datas de plantio e colheita se destacam, como visualiza-se na Figura 23(b). Além disso, a Crop Rotation Tool permite ao usuário reordenar e remover tratamentos através de recursos *drag and drop*. Esses recursos são muito utilizados em sistemas operacionais e são cada vez mais utilizados em softwares para simplificar tarefas e facilitar a interação do usuário com a interface [33].

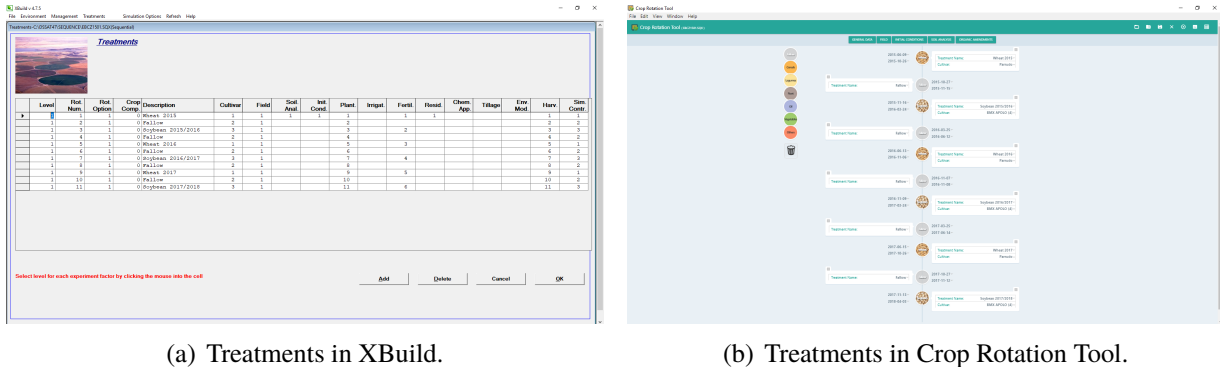


Figura 23. Treatments: XBuild x Crop Rotation Tool

Os resultados da simulação do experimento podem ser visualizados nas ferramentas de gráficos GBuild e Sequence Analysis do DSSAT [34]. Neste exemplo, foi utilizado o resultado da simulação da variável *Grain wt kg/ha* nas *runs* Wheat 2015 x Wheat 2016 x Wheat 2017. Diferentemente das ferramentas GBuild e Sequence Analysis, o gráfico da Crop Rotation Tool apresenta legenda, dados observados e possibilita interatividade ao posicionar o cursor do mouse sobre as linhas ou pontos do mesmo, conforme visualizado na Figura 24(b).

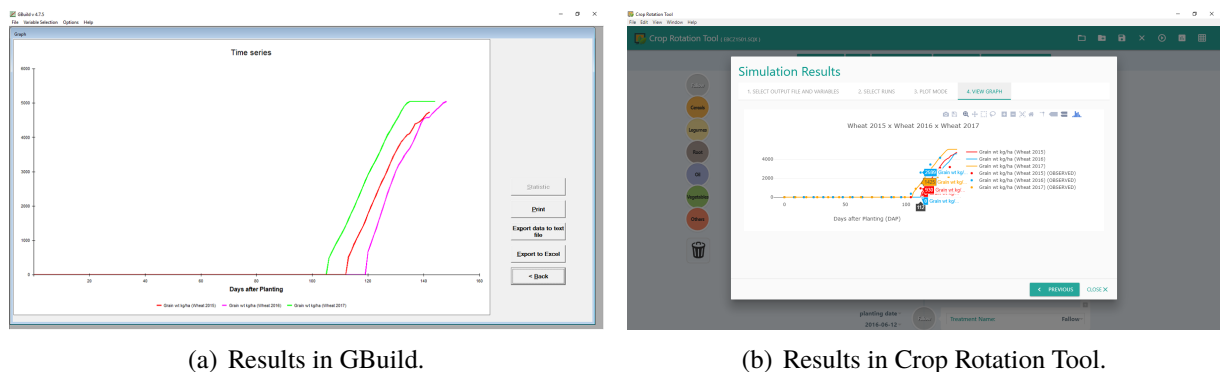


Figura 24. GBuild x Crop Rotation Tool - Grain wt kg/ha (Wheat 2015 x Wheat 2016 x Wheat 2017)

Como a interface do DSSAT está disponível apenas para o sistema operacional Windows, esforços foram e estão sendo feitos para tornar o DSSAT multiplataforma, como é o caso do DSSAT Shell [6] e do DSSAT Lite [7]. Essas interfaces listam os arquivos de experimento, executam a simulação desses experimentos e exibem o resultado da simulação em uma ferramenta chamada Graph Builder [6], porém as mesmas não editam os arquivos de experimento (.X), a exemplo do XBuild

ou arquivos de experimento de sequência de cultivos (.SQX), a exemplo da Crop Rotation Tool. Essa, utiliza as mesmas tecnologias do DSSAT Shell e DSSAT Lite para possibilitar a utilização de uma interface para o DSSAT em diferentes sistemas operacionais, ou seja, é uma ferramenta multiplataforma, compatível com Windows, Linux e MacOS.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através desse estudo de caso foi possível realizar a simulação de um experimento real de sequência de cultivos e a comparação dos dados simulados com os observados, utilizando a Crop Rotation Tool integrada ao DSSAT. Verificou-se que, nos cenários 01 e 02, as linhas do gráfico que representam os dados simulados apresentaram uma tendência aproximada em relação aos pontos do gráfico, os quais representam os dados observados. Além disso, foi possível verificar o funcionamento da Crop Rotation Tool e obter experiência na configuração dos diversos arquivos que fazem parte do sistema do DSSAT e que são utilizados pela interface desenvolvida. O estudo de caso também propiciou a identificação e realização de melhorias e correções na Crop Rotation Tool, as quais não foram identificadas anteriormente por conta da utilização de estudos de caso fictícios. Além disso, o uso das ferramentas Crop Rotation Tool e DSSAT auxiliaram no entendimento dos fatores que envolvem um sistema tão complexo, que é o sistema de sequência de cultivos.

4. CONCLUSÃO

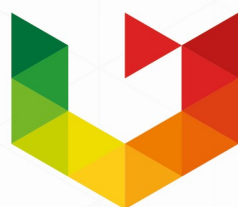
A Crop Rotation Tool busca atender uma demanda do setor do agronegócio: a previsão do crescimento e desenvolvimento de cultivos em sequência. Ela pode representar um avanço tecnológico para o produtor/setor produtivo. Além de possibilitar aos usuários do DSSAT, configurar e simular experimentos de sequência de cultivos, em diferentes sistemas operacionais e de forma amigável, seu desenvolvimento oportunizou, ainda, a expansão do módulo JavaScript jDSSAT, para permitir a leitura, gravação e processamento de arquivos do DSSAT relacionados à sequência de cultivos. O jDSSAT pode, ainda, ser utilizado e expandido para a criação de novas ferramentas e interfaces para o DSSAT. Também foi de fundamental importância, a simulação do sistema de produção trigo e soja em Carazinho, RS, Brasil, pois possibilitou a validação e a identificação de melhorias e correções na Crop Rotation Tool, a qual pode, ainda, ser expandida e melhorada para possibilitar a configuração de experimentos em 2 modos: "single crop" e "multi crop". Dessa forma, conclui-se que o uso das ferramentas Crop Rotation Tool e DSSAT auxiliam no entendimento dos fatores que envolvem um sistema tão complexo, que é o sistema de sequência de cultivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JONES, J. W. et al. Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, v. 155, p. 240–254, 2016.
- [2] DSSAT. *Models & Applications*. Disponível em: <<https://dssat.net/models-and-applications>>. Acesso em: Abr. 18, 2018.
- [3] CHANGE, I. P. on C. Summary for policymakers. In: _____. *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. p. 1–30.
- [4] CAVIGLIA, O.; SADRAS, V. Long-term simulation of productivity in crop sequences differing in intensification in the argentina pampas. In: . [S.l.: s.n.], 2004.
- [5] MCCOWN, R.; HOCHMAN, Z.; CARBERRY, P. Probing the enigma of the decision support system for farmers: Learning from experience and from theory. *Agricultural Systems*, v. 74, n. 1, p. 1 – 10, 2002. ISSN 0308-521X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X02000215>>.
- [6] RESENES, J. de A. et al. jdssat: A javascript module for dssat-csm integration. *SoftwareX*, v. 10, p. 100271, 2019. ISSN 2352-7110. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271101930158X>>.
- [7] RESENES, J. et al. Dssat lite: a web-based application for running crop models and analyzing results from dssat-csm. no prelo.
- [8] J., S. *Scrum: a arte de fazer o dobro do trabalho na metade do tempo*. São Paulo, SP: Leya, 2016.
- [9] TRELLO. *Home Page*. 2018. Disponível em: <<https://trello.com/>>. Acesso em: Set. 2018.
- [10] Y., G. et al. *Using a Decision Support System for simulating Yield of On-Farm Crops Rotations*. [S.l.]: Annual Meetings Abstracts, 2006.
- [11] SARKAR, R.; KAR, S. Sequence analysis of dssat to select optimum strategy of crop residue and nitrogen for sustainable rice-wheat rotation. *Agron*, v. 100, p. 87–97, 2008.
- [12] SOLER, C. et al. Soil organic carbon dynamics and crop yield for different crop rotations in a degraded ferruginous tropical soil in a semi-arid region:a simulation approach. *Journal of Agricultural Science*, v. 149, p. 579–593, 2011.
- [13] BOWEN, W. T.; THORNTON, P. K.; HOOGENBOOM, G. The simulation of cropping sequences using dssat. In: _____. *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998. p. 313–327. ISBN 978-94-017-3624-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_15>.

- [14] THORNTON, P. K. et al. Sequence analysis. in dssat v3, decision support system for agrotechnology transfer. *University of Hawaii*, v. 3, p. 67–136, 1994.
- [15] ALVARES, C. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013.
- [16] STRECK, E. et al. *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222 p.
- [17] ZADOKS, J.; CHANG, T.; KONZAK, C. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, v. 14, p. 415 – 421, 1974.
- [18] RITCHIE, S.; HANWAY, J.; THOMPSON H.E.; BENSON, G. *How a soybean plant develops*. Ames, 1977.
- [19] YORINORI, J. *Cancro da haste: epidemiologia e controle*. Londrina, 1996.
- [20] SOLOS, E. C. N. de Pesquisa de. *Manual de métodos de análise de solos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Fantasma, 1997. 212 p.
- [21] LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba: [s.n.], 1995. 497 p.
- [22] CAUDURO, F. A.; DORFMANN, R. *Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem*. Brasília: [s.n.], 1988. 216 p.
- [23] KLEIN, V. A. et al. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. *Ciência Rural*, v. 40, n. 7, p. 1550–1556, 2010.
- [24] GENUCHTEN, M. T. V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society America Journal*, v. 44, p. 892–898, 1980.
- [25] NETO, D. D. et al. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de genuchten. *Engenharia Rural*, v. 1, p. 92–102, 1990.
- [26] KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 843–853, 2002.
- [27] TEDESCO, M. J. et al. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. Porto Alegre, 1995. 174 p.
- [28] CHARTIER, M. et al. Utilization des cellules au silicium amorphe pour la mesure du rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm). *Agronomie*, v. 9, p. 281–284, 1989.
- [29] THIMIJJAN, R. W.; HEINS, R. D. Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: a review of procedures for interconversion. *HortScience*, v. 18, n. 6, p. 818–822, 1983.
- [30] DALMAGO, G. A. et al. Use of solar radiation in the improvement of spring canola (*brassica napus* L., brassicaceae) yield influenced by nitrogen topdressing fertilization. *Agrometeoros*, v. 26, n. 1, p. 223–237, 2018.

- [31] VEECK, G. P. *Trocas de energia e massa no cultivo de soja e trigo no sul do Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Física – UFSM, Santa Maria, RS, Brasil, 2018.
- [32] MALIK, W.; ISLA, R.; DECHMI, F. Dssat-ceres-maize modelling to improve irrigation and nitrogen management practices under mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, v. 213, p. 298 – 308, 2019. ISSN 0378-3774. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377418316263>>.
- [33] BROWN, C. E. *The Essential Guide to Flex 2 with ActionScript 3.0*. [S.l.]: Apress, 2007.
- [34] DSSAT. *Tools*. 2018. Disponível em: <<https://dssat.net/tools>>. Acesso em: Abr. 2018.



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br