

ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APLICAÇÃO À TAXA VARIADA
PARA PRODUÇÃO EM PEQUENA ESCALA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz

Coorientadores: Francisco de A. de C. Pinto

Domingos Sárvio M. Valente

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C672d
2020
Coelho, Andre Luiz de Freitas, 1989-
Desenvolvimento de um sistema de aplicação à taxa variada
para produção em pequena escala / Andre Luiz de Freitas
Coelho. – Viçosa, MG, 2020.
80 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura de precisão. 2. Computadores de placa única.
3. Sistemas embarcados (Computadores). I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 631.3

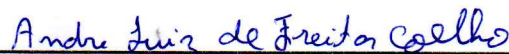
ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA APLICAÇÃO À TAXA VARIADA
PARA PRODUÇÃO EM PEQUENA ESCALA

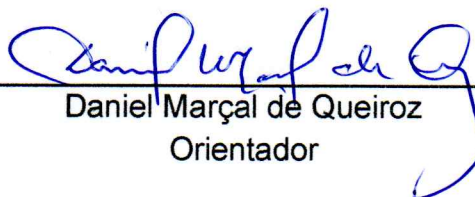
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 23 de novembro de 2020.

Assentimento:



Andre Luiz de Freitas Coelho
Autor



Daniel Marçal de Queiroz
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter guiado cuidadosamente todos meus passos.

Aos meus pais José Paulo e Maria Auxiliadora.

Às minhas irmãs Ana Paula, Angélica e Amanda pelo apoio e incentivo.

À minha esposa Elenice por, incansavelmente, estar ao meu lado e apoiar meus sonhos desde o dia que nos conhecemos.

À pequena Maria Júlia que chegou para alegrar e nos ensinar ser ainda mais fortes.

Ao professor Daniel por ter acreditado em meu potencial e pela orientação.

Aos professores coorientadores Francisco e Sárvio pelas contribuições neste trabalho.

Aos membros externos da Banca Examinadora Dr. Evandro Chartuni Mantovani, Prof. Samuel de Assis Silva e Prof. Fábio Lúcio Santos pelas contribuições neste trabalho.

À EMBRAPA Milho e Sorgo pela doação das sementes de milhos utilizadas no ensaio em campo.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola pelos conhecimentos adquiridos nas disciplinas.

Aos servidores do Departamento de Engenharia Agrícola que diretamente e indiretamente contribuíram e fizeram parte dessa jornada.

Aos membros do Laboratório de Mecanização Agrícola, em especial Emanuel, Jorge, Pedro, Juliano, Fernando, Marcelo, Lucas, pelas contribuições e companheirismo.

À Universidade Federal de Viçosa por me deixar fazer parte de sua história.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola pela infraestrutura disponibilizada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro

BIOGRAFIA

ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO, filho de José Paulo Coelho e Maria Auxiliadora de Freitas Coelho, nasceu em Guidoal, Minas Gerais, em 6 de fevereiro de 1989.

Em 2004 iniciou o Ensino Médio pela Escola Estadual “Mariana de Paiva”, em Guidoal, Minas Gerais, concluindo em 2006.

Em março de 2007, iniciou o curso de Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, concluindo em dezembro de 2012.

Em fevereiro de 2012, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, área de concentração em Mecanização Agrícola, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2014, submeteu-se aos exames de defesa da dissertação, para a obtenção do título de *Magister Scientiae*.

No período entre março de 2014 e fevereiro de 2017, atuou com Engenheiro Mecânico na empresa Ecosoluções.

Em março de 2017, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Doutorado, área de concentração em Mecanização Agrícola, pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

Em novembro de 2020, submeteu-se aos exames de defesa da tese, para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

RESUMO

COELHO, Andre Luiz de Freitas, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2020. **Desenvolvimento de um sistema de aplicação à taxa variada para produção em pequena escala.** Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientadores: Francisco de Assis de Carvalho Pinto e Domingos Sarvio Magalhães Valente.

A agricultura de precisão é uma estratégia de manejo das lavouras comumente adotada na agricultura moderna. A sua adoção tem sido impulsionada pela necessidade de otimização do sistema produtivo, buscando a máxima lucratividade para o agricultor. Para a aplicação de insumos são utilizadas máquinas que possuem controladores para aplicação à taxa variada. Esses controladores permitem que a máquina agrícola altere, automaticamente, a taxa de aplicação à medida que se desloca no talhão. Nas máquinas de aplicação à taxa variada com base em mapa, a determinação da quantidade de insumos requer a aquisição de dados do sistema solo-planta, que são analisados e utilizados para gerar os mapas de aplicação. Logo, é importante garantir a confiabilidade e precisão dos dados adquiridos, permitindo que estes possam ser usados nas tomadas de decisões. Máquinas com controladores para aplicação à taxa variada e sistemas de monitoramento estão disponíveis no mercado nacional e internacional. Contudo, o custo de aquisição tem sido uma barreira para a adoção da agricultura de precisão por agricultores de pequena escala. Assim, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver sistemas de baixo custo, contribuindo para que os agricultores de pequena escala possam utilizar a agricultura de precisão. Para se desenvolver um sistema de baixo custo, compatível com a agricultura de pequena escala, componentes de código aberto, como o computador de placa única Beaglebone Black, o módulo GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite) u-blox NEO6M e o módulo GSM (Sistema Global para Comunicações Móveis) SIM800L foram utilizados no presente trabalho. Programas de computador, linguagens de programação e ferramentas de código aberto, como QGIS, Python e PyQt, foram utilizados, dispensando a aquisição de licenças. Um sistema embarcado de análise de dados foi desenvolvido para permitir a filtragem de dados, geração de mapa interpolado e geração de mapa de agrupamento em classes, enquanto o usuário ainda estava em campo. O estudo de caso, realizado com dados de produtividade de soja,

confirmou a importância da filtragem dos dados antes da sua utilização em tomadas de decisões. Nesse estudo de caso, o sistema embarcado desenvolvido removeu 29,4% dos dados brutos. O desvio padrão do erro de interpolação reduziu de 1,25 para 0,49 Mg ha⁻¹, como consequência da limpeza dos dados. Foi observado que dados inconsistentes podem mascarar a variabilidade espacial, o que pode resultar em tomadas de decisões erradas. Para a semeadura à taxa variada, um controlador foi desenvolvido e instalado em uma semeadora manual de precisão. Esse controlador foi utilizado para controlar a velocidade angular do motor elétrico de acionamento do mecanismo dosador de sementes. O ensaio em campo mostrou que a semeadora equipada com o controlador desenvolvido apresentou índice de qualidade de distribuição entre 65,6 e 76,16% quando distribuiu entre 40000 e 70000 plantas ha⁻¹. Essa qualidade de distribuição é compatível com resultados obtidos em ensaios de outras semeadoras de taxa fixa que adotam o disco horizontal perfurado como mecanismo de distribuição de sementes. Concluiu-se que o controlador foi eficaz em controlar a velocidade angular do motor, com base na densidade de plantas prescrita no mapa, e na posição e velocidade da semeadora. No controlador desenvolvido foi incluído um módulo GSM de baixo custo. Este módulo permitiu enviar os dados da operação para um servidor de armazenamento a cada quatro segundos, possibilitando o monitoramento remoto e em tempo real da operação. A análise dos dados enviados para o servidor permitiu identificar a eficiência de campo da operação e uma falha ocorrida no mecanismo distribuidor de sementes.

Palavras-chave: Computador de placa única. Sistemas embarcados. Agricultura de pequena escala. Internet das coisas.

ABSTRACT

COELHO, Andre Luiz de Freitas, D.Sc., Universidade Federal de Vicosa, November, 2020. **Development of a variable application rate system for small-scale production.** Adviser: Daniel Marçal de Queiroz. Co-advisers: Francisco de Assis de Carvalho Pinto and Domingos Sarvio Magalhães Valente

Precision agriculture is a crop management strategy commonly adopted in modern agriculture. Its adoption has been driven by the need to optimize the production system, seeking maximum profitability for the farmer. For input application, machines with controllers that allow variable rate application are used. These controllers allow the machine to automatically change the application rate as it moves through the field. For variable rate application based on maps, determination of the quantity of inputs to be applied requires the acquisition of data from the soil-plant system, which are analyzed and used to generate the application maps. Therefore, it is important to guarantee the reliability and accuracy of the acquired data, allowing it to be used in decision making. Machines with controllers for variable rate application and monitoring systems are available in the national and international markets. However, the cost of acquisition has been a barrier to the adoption of precision agriculture by smallholder farmers. Thus, the objective of the present work was to develop low-cost systems to allow the adoption of precision agriculture by smallholder farmers. To develop a low-cost system, compatible with small-scale agriculture, open source components, such as the single board computer Beaglebone Black, the GNSS module (Global Navigation Satellite System) u-blox NEO6M and the module GSM (Global System for Mobile Communications) SIM800L were used in the present work. Computer programs, programming languages and open source tools, such as QGIS, Python and PyQt, were used to avoid the acquisition of licenses. An embedded data analysis system was developed to allow data filtering, generation of interpolated map and clustering analysis, while the user was still in the field. A case study, carried out with soybean yield data, confirmed the importance of filtering the data before its use in decision making. In this case study carried out with soybean yield data, the developed embedded system removed 29.4% of the raw data. The standard deviation of the interpolation error decreased from 1.25 to 0.49 Mg ha⁻¹ because of the data cleaning process. It has

been observed that inconsistent data can mask spatial variability, which can result in wrong decision making. For variable rate seeding, a controller was developed and installed on a manual precision planter. This controller was used to control the angular speed of the electric motor that drives the seed metering mechanism. This planter used a horizontal perforated disk as a seed distribution mechanism. The field test showed that the planter equipped with the developed controller had a quality of feed index between 65.6 and 76.16% when it distributed between 40,000 and 70,000 plants ha⁻¹. This distribution quality is compatible with results obtained in tests of other fixed rate planter that adopt the horizontal perforated disk as a seed metering device. It was concluded that the controller was effective in controlling the angular speed of the motor, based on the plant density prescribed on the map, and the position and speed of the planter. A low-cost GSM module was included in the developed controller. This module allowed the operation data to be sent to a cloud-based server every four seconds, enabling remote and real-time monitoring of the operation. The analysis of the data sent to the server allowed to identify the field efficiency of the operation and a flaw that occurred in the seed distribution mechanism.

Keywords: Single board computer. Embedded systems. Smallholder farming. Internet of things.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1	Organização da tese	12
1.2	Referências bibliográficas	12
2	SISTEMA EMBARCADO PARA ANÁLISES DE DADOS OBTIDOS POR SENSORES	15
2.1	Resumo	15
2.2	Abstract	16
2.3	Introdução	17
2.4	Material e métodos	18
2.5	Resultados e discussão	22
2.6	Conclusões	30
2.7	Referências	30
3	DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE BAIXO CUSTO PARA UMA SEMEADORA MANUAL DE PRECISÃO	34
3.1	Resumo	34
3.2	Abstract	35
3.3	Introdução	35
3.4	Material e Métodos	38
3.5	Resultados e discussão	49
3.6	Conclusões	58
3.7	Referências	58
4	SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE CÓDIGO ABERTO PARA UMA SEMEADORA MANUAL DE PRECISÃO	63
4.1	Resumo	63
4.2	Abstract:	63
4.3	Introdução	64
4.4	Material e métodos	66
4.5	Resultados e discussão	72
4.6	Conclusões	76
4.7	Referências	76
5	CONCLUSÕES GERAIS	79

1 INTRODUÇÃO GERAL

Um dos grandes desafios que a humanidade está enfrentando e continuará a enfrentar nos próximos anos é a garantia da produção de alimentos para toda a população. Estima-se que a produção agrícola mundial necessite crescer em até 110 %, a fim de garantir alimentos para toda a população em 2050 (WU et al., 2018). Um fator crítico para a ampliação da produção de alimentos é a escassez de áreas cultiváveis ainda não exploradas e a escassez de recursos naturais, como a água (MARIN et al., 2016). Devido a estes e outros fatores, os agricultores vêm otimizando o seu sistema produtivo. É preciso aperfeiçoar o manejo das lavouras para se aproximar da produtividade potencial das áreas cultivadas e, simultaneamente, aumentar a eficiência no uso de água, fertilizantes, defensivos agrícolas e outros insumos (BECHAR; VIGNEAULT, 2016). Ao aumentar a eficiência de uso de insumos garante-se a sustentabilidade da produção agrícola, contribuindo para a redução dos impactos ambientais relacionados à produção de alimentos (DE BARROS et al., 2015).

A adoção da agricultura de precisão permite uma produção agrícola mais eficiente, motivo pelo qual está sendo adotada em lavouras de todo o mundo. A agricultura de precisão pode ser definida como o manejo das variações espaciais das características do solo e da planta, que influenciam na produtividade das culturas (TSCHIEDEL; FERREIRA, 2002). O agricultor define o manejo em cada região da lavoura buscando otimizar a sua lucratividade (THOMPSON et al., 2019).

Uma forma de manejo amplamente utilizada na agricultura de precisão é a aplicação à taxa variada. Na aplicação à taxa variada, a partir de informações coletadas do solo e/ou da planta, calcula-se e aplica-se, em cada região do talhão, a quantidade adequada do insumo. Na medida em que a máquina de aplicação se desloca na área realizando uma operação, ocorrem alterações nos mecanismos dosadores para que ocorra a variação das dosagens aplicadas (WERNER et al., 2007). Os equipamentos para aplicação à taxa variada podem ser divididos em duas categorias: com base em mapas e com base em sensores. Nos equipamentos com base em mapa, um mapa de aplicação é gerado e inserido no controlador do sistema de aplicação. Estes mapas são gerados por

profissionais com auxílios de ferramentas computacionais. Dentre as informações utilizadas na geração dos mapas de aplicação cita-se mapas de produtividade de safras anteriores, dados obtidos por sensores, dados obtidos em literaturas, experiência e anotações do agricultor, dados obtidos em análises de solo e de folha, entre outros. Controladores para semeadura à taxa variada, por exemplo, utilizam mapas de prescrição que contêm a densidade de plantas a ser adotada em cada região do talhão. Nos equipamentos de aplicação à taxa variada com base em sensores, a determinação da dosagem a ser aplicada é realizada, em tempo real, a partir de dados coletados por sensores que medem características da planta ou do solo (FOROUZANMEHR; LOGHAVI, 2012).

Durante a geração dos mapas de aplicação, utilizados nos controladores de aplicação à taxa variada com base em mapa, é indispensável que os dados utilizados sejam confiáveis e precisos. Erros podem ocorrer durante a aquisição dos dados, resultando no armazenamento de dados incoerentes. Além disso, a densidade amostral adotada pode não ser suficiente para descrever a variabilidade espacial da variável em questão. Taylor et al. (2007) afirmaram que a remoção de dados incoerentes é importante para garantir decisões agronômicas corretas.

O monitoramento das operações agrícolas é outro recurso que vem sendo adotado na agricultura de precisão. Esse monitoramento, especialmente se for remoto e tempo real, permite ao agricultor acompanhar as operações e tomar decisões rápidas e precisas (FOUNTAS et al., 2015; ELIJAH et al., 2018). Conseqüentemente, o monitoramento remoto contribui para a otimização do sistema produtivo, visto que possibilita o uso racional de combustível, a alocação eficiente de máquinas e recursos humanos, o aumento de capacidade operacional e a aplicação de insumos com redução de desperdícios.

Apesar de ter importante contribuição no aumento de eficiência do sistema produtivo, os agricultores de pequena escala têm acesso restrito aos equipamentos e ferramentas de agricultura de precisão existentes no mercado. Um dos motivos para tal é a disponibilidade no mercado de equipamentos com custo de aquisição não compatível com a capacidade de investimento desse grupo de agricultores (OLIVEIRA, 2016).

Os recentes avanços na eletrônica e a difusão dos conceitos de componentes de projeto aberto e programas de código aberto vêm permitido o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo. Assim, o desenvolvimento destes sistemas permite a difusão da agricultura de precisão na agricultura de pequena escala.

Diante do exposto, esse trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver um controlador de distribuição de sementes à taxa variada para produção em pequena escala. Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Desenvolver um sistema embarcado de código aberto para análises de dados obtidos por sensores;
- Desenvolver um controlador de código aberto e de baixo custo para semeadura à taxa variada;
- Desenvolver um sistema remoto de código aberto para monitoramento de uma semeadora manual.

1.1 Organização da tese

A presente tese foi organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo, foi apresentada uma introdução geral, justificando o desenvolvimento deste trabalho. Nos três capítulos subsequentes são apresentados o desenvolvimento dos trabalhos referentes aos três objetivos específicos. No último capítulo são apresentadas as considerações finais da tese.

1.2 Referências bibliográficas

BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. **Biosystems Engineering**. v. 149, p. 94–111, 2016.

DE BARROS, M. M.; VOLPATO, C. E. S.; SILVA, F. C.; PALMA, M. A. Z.; SPAGNOLO, R. T. Avaliação de um sistema de aplicação de fertilizantes à taxa variável adaptado à cultura cafeeira. **Coffee Science**, v. 10, n. 2, p. 223–232, 2015.

ELIJAH, O., RAHMAN, T. A., ORIKUMHI, I., LEOW, C. Y., HINDIA, M. N. An

Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges, **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 5, p. 3758-3773, 2018

FOROUZANMEHR, E., LOGHAVI, M. Design, development and field evaluation of a map-based variable rate granular fertilizer application control system. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v.14, n.4, p.255–261, 2012

FOUNTAS, S.; SORENSEN, C. G.; TSIROPOULOS, Z.; CAVALARIS, C.; LIAKOS, V.; GEMTOS, T. Farm machinery management information system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 110, p. 131–138, 2015.

MARIN, F. R.; PILAU, F.G.; SPOLADOR, H.F.S.; OTTO, R.; PEDREIRA, C.G. intensificação sustentável da agricultura brasileira: cenários para 2050. **Revista de Política Agrícola**, v. 25, n.3, p.108-124, 2016

OLIVEIRA, R. P. de. Apoio à Decisão na Adoção da Agricultura de Precisão: A Tecnologia da Informação em Apoio ao Conhecimento Agrônômico. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 02, n. 01, p. 89–109, 2016.

TAYLOR, J. A., MCBRATNEY, A. B., & WHELAN, B. M. Establishing management classes for broadacre agricultural production. **Agronomy Journal**, v.99, n.5, p.1366-1376, 2007.

THOMPSON, N., BIR, C., WIDMAR, D., MINTERT, J. Farmer perceptions of precision agriculture technology benefits. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 51, n.1, p.142-163, 2019

TSCHIEDEL, MAURO; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, v. 32, n. 1, p.159-163, 2002.

WERNER, V.; SCHLOSSER, J. F.; ROZIN, D.; PINHEIRO, E. D.; DORNELLES, M. E. C.; C DORNELLES, M. E. Aplicação de fertilizantes à taxa variada em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 6, p. 658–663, 2007.

WU, W., YU, Q., YOU, L., CHEN, K., TANG, H., LIU, J. Global cropping intensity gaps: Increasing food production without cropland expansion. **Land Use Policy**, v. 76, n.1, p.515–525, 2018

2 SISTEMA EMBARCADO PARA ANÁLISES DE DADOS OBTIDOS POR SENSORES ¹

2.1 Resumo

Sistemas de monitoramento de solo e plantas são ferramentas importantes para a adoção da agricultura de precisão. Para adquirir dados do sistema solo-planta, o usuário estabelece uma estratégia de amostragem, vai para o campo, realiza a coleta e retorna ao escritório para a análise de dados. Durante a análise, pode ser observado que a estratégia de amostragem adotada não ser adequada, demandando retorno ao campo para uma nova coleta. Para evitar problemas com a estratégia de amostragem, uma solução é ter um sistema embarcado que realize a análise dos dados imediatamente após sua coleta, enquanto o usuário ainda está no campo. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema embarcado de código aberto para realizar análises de dados imediatamente após sua aquisição. O programa de computador para o sistema embarcado foi desenvolvido usando a linguagem Python 3.6, sendo a ferramenta PyQt (Riverbank Computer Limited, Reino Unido) utilizada para construção de uma interface gráfica do usuário. O computador de placa única BeagleBone Black, com sistema operacional Debian versão 8.6, foi usado para executar o programa de computador. A análise de dados foi dividida em três etapas: na primeira, uma análise de *outlier* e *inlier* foi realizada para remover dados indesejados; na segunda, o mapa interpolado e o mapa de desvio padrão do erro de interpolação foram gerados por krigagem ordinária; e na última, uma análise de agrupamento foi realizada. Para testar o programa de computador desenvolvido, foram utilizados dados de produtividade de soja de um talhão de 31,6 ha. O programa desenvolvido mostrou-se eficiente em realizar a análise dos dados. A comparação dos mapas gerados confirmou a importância de se filtrar os dados antes de realizar qualquer análise para tomada de decisões.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Krigagem ordinária. Análise de agrupamento. Mapa de produtividade. Limpeza de dados.

¹ Este capítulo se refere a uma versão em português do artigo “An open-source spatial analysis system for embedded systems” publicado no periódico *Computer and Electronics in Agriculture*, volume 158, p. 289-295, 2018.

2.2 Abstract

Soil and plant monitoring systems are important tools for applying precision agriculture. To acquire soil-plant system data, the user establishes a sampling strategy, goes to the field, collects data and finally goes to the office for data analysis. During the analysis, it can be observed that the sampling strategy was not adequate, requiring return to the field for a new data collection. To avoid problems with the sampling strategy, the solution is to have an embedded system that performs the data analysis immediately after its collection, while the user is still in the field. The objective of this work was to develop an open source embedded system to perform data analysis in the field, right after data acquisition. The software was developed using Python 3.6; the PyQt Integrated Development Environment (Riverbank Computer Limited, United Kingdom) was used to design a graphical user interface. The BeagleBone Black board, with Debian version 8.6 operational system, was used to run the software. The analysis was divided into three steps: in the first one, an outlier and inlier analysis was performed to remove unwanted data; in the second one, the interpolated and standard deviation of interpolation error map was produced by ordinary kriging; and in the last one, a cluster analysis was performed. To test the developed software, soybean yield data of a 31.6-ha field were used. The developed software was shown to be efficient at performing the analysis of soybean yields. The comparison of the generated maps confirmed the importance of filtering the data before performing the analysis.

Keywords: Precision agriculture. Ordinary kriging. Clustering analysis. Yield map. Data cleaning.

2.3 Introdução

O monitoramento das plantas e do solo é uma tarefa rotineira quando as técnicas de agricultura de precisão são adotadas (QUEIROZ et al., 2017). Os sistemas de monitoramento são compostos por um ou mais sensores, e um controlador para a aquisição, apresentação ao usuário, armazenamento e/ou a transmissão dos dados. Utilizando estes sistemas, o usuário geralmente define a estratégia de amostragem e vai à campo para a aquisição dos dados desejados. A coleta em campo pode ser realizada manualmente ou com o auxílio de veículos terrestres ou aéreos.

Após a coleta, os dados são importados para programas de computador, onde, onde são analisados. As análises realizadas estão relacionadas ao manejo das lavouras, como determinação da densidade de plantas e dosagem de fertilizantes a ser utilizada na operação. No entanto, erros podem ser detectados durante a análise, afetando a precisão e confiabilidade da representação da variabilidade espacial das variáveis em análise. Os erros podem estar relacionados à densidade amostral inadequada, à falha no valor informado pelos sensores devido a calibração ou à erros humanos durante a operação do sistema. Dependendo da severidade do erro detectado, é necessário o retorno ao campo para uma nova coleta de dados. Contudo, essa tarefa adicional gera custos e demanda tempo. Portanto, evitar esse tipo de problema é benéfico para o agricultor. Outro problema é que, dependendo do tipo de dado coletado, uma grande quantidade de dados incoerentes é adquirida, ocasionando aumento no tempo de análise. Uma possível solução para os problemas citados é o desenvolvimento de um sistema embarcado com programa de computador capaz de coletar dados do sensor, e realizar a análise dos dados ainda em campo.

Computadores de placa única, como o BeagleBone Black (BBB), são uma boa alternativa para serem empregados no desenvolvimento de sistemas de monitoramento e de processamento de dados. O BBB possui portas para conexão de sensores e processador capaz de realizar cálculos complexos (MOLLOY, 2014). Devido a essas características, computadores de placa única e microcontroladores têm sido utilizados no desenvolvimento de diversos sistemas para coleta de dados relacionados à agricultura.

Queiroz et al. (2017) desenvolveu um sensor portátil para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo usando um BBB. O sistema foi desenvolvido com um programa de computador, escrito em C ++, capaz de realizar análises geoestatísticas utilizando a interpolação por krigagem ordinária. Uma estratégia de amostragem inteligente foi proposta, em que a análise do desvio padrão foi utilizada para prever a posição de novos pontos a serem amostrados. O objetivo de utilizar uma estratégia de amostragem inteligente foi obter maior precisão na caracterização da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo. Fisher e Huang (2017) desenvolveram um sistema de monitoramento de dossel de plantas utilizando apenas componentes de baixo custo. O sistema foi desenvolvido para armazenar dados em um cartão de memória, permitindo ao usuário a execução das análises dos dados no escritório. Também com o objetivo de coletar dados, Bitella et al., (2014) desenvolveram um sensor de baixo custo para monitorar a umidade no solo e outras variáveis do sistema solo-clima-planta. Seguindo o mesmo caminho, Thomasson et al. (2006) utilizaram um computador de placa única para desenvolver um monitor de produtividade para uma colhedora de amendoim.

Diversos programas de computador de código aberto e protocolos estão disponíveis para filtragem de dados (SIMBAHAN et al., 2004; SUDDUTH; DRUMMOND, 2007; TAYLOR et al., 2007; SPEKKEN et al., 2013), e para interpolação de dados e análise de agrupamento, como Vesper (WHELAN et al., 2002), FuzMe (MINASNY; MCBRATEY, 2002) e KrigMe (VALENTE et al., 2012). Assim, este trabalho objetivou desenvolver um sistema embarcado de código aberto capaz de adquirir dados de sensores, e realizar a análise destes dados enquanto usuário ainda no campo

2.4 Material e métodos

O programa de computador foi desenvolvido usando a linguagem de programação Python 3.6, com a interface gráfica gerada usando o PyQt5 (Riverbank Computer Limited, Reino Unido). O computador de placa única usado para executar o programa de computador foi o BeagleBone Black (BBB), Revisão B, com o sistema operacional Linux Debian 8.6. O BBB é baseado em um

processador Sitara AM3358 ARM Cortex-A8 1 GHz, com memória RAM 512 MB. Ele apresenta conexão HDMI e USB, leitor de cartão de memória e 96 portas de entrada e saída de uso geral. A interface gráfica do usuário foi apresentada em uma tela LCD sensível ao toque com resolução 800x480 pixel, conectada ao BBB.

O programa de computador foi desenvolvido para realizar a aquisição de dados, e realiza a filtragem dos dados, geração de mapa interpolado e mapa de agrupamento em classes (Figura 2.1). O processo de aquisição de dados consistiu em ler os dados dos sensores, realizar a conversão do sistema de coordenadas geodésicas (latitude e longitude) em coordenadas UTM (Universal Transversal Mercator) e armazenar os dados na memória do BBB. Para a conversão das coordenadas foi utilizado o datum WGS84 (World Geodetic System 84).

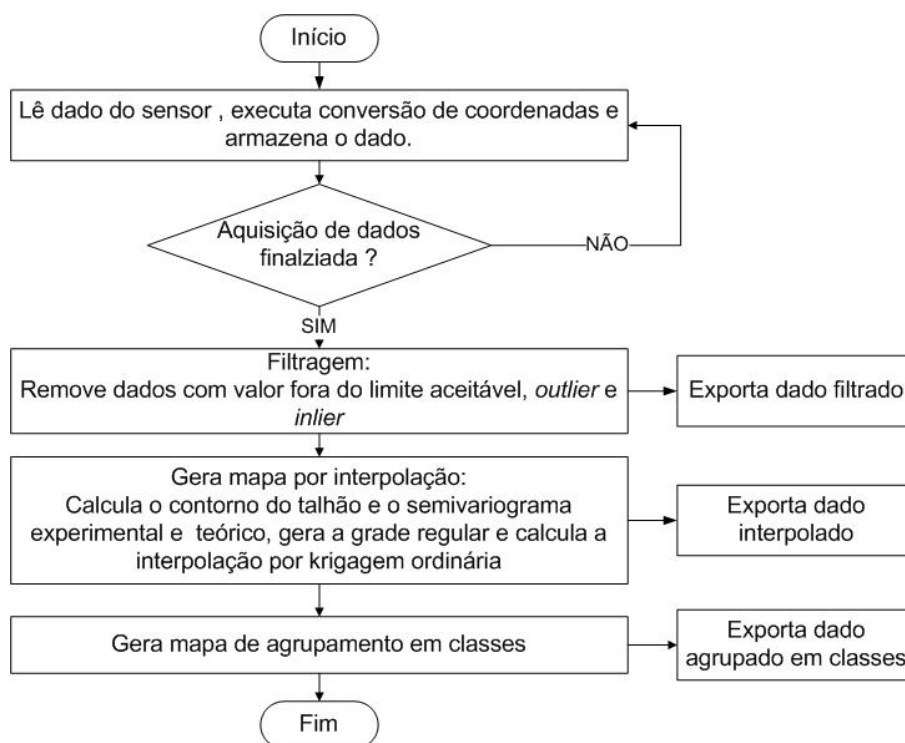


Figura 2.1: Fluxograma do programa de computador desenvolvido. Fonte: Adaptado de Coelho et al. (2018).

Filtragem dos dados

Após o término da aquisição de dados, a primeira função atribuída ao programa de computador foi filtrar os dados adquiridos pelos sensores. O

programa foi desenvolvido com base no procedimento proposto por Taylor et al. (2007), em que a filtragem é dividida em três etapas: remoção de pontos que excedem valores mínimos e máximos aceitáveis, remoção de *outliers* e remoção de *inliers*. Na primeira etapa, o usuário precisou estabelecer os limites inferior e superior com base em seu conhecimento sobre o comportamento da variável.

Na etapa de remoção de *outlier*, o programa calculou a média (μ) e o desvio padrão (σ) do conjunto de dados filtrados na etapa anterior. Os dados considerados discrepantes foram aqueles fora do intervalo $\mu \pm m \sigma$. Em que m é um fator definido pelo usuário, cujo valor padrão foi estabelecido como 2,5 (TAYLOR et al., 2007). Antes do ponto candidato a *outlier* ser efetivamente removido do conjunto de dados, seu valor foi comparado com a mediana dos valores dos vizinhos cuja distância foi inferior a 25 m. Caso o valor do ponto candidato estivesse fora do intervalo 0,75 a 1,25 vezes a medida dos vizinhos, o ponto foi removido.

A terceira etapa da filtragem consistiu na remoção de *inliers* usando os dados após a primeira (remoção de dados discrepantes) e segunda (remoção de dados discrepantes) etapas. O valor em cada ponto foi comparado com a mediana dos vizinhos cuja distância foi inferior a 25 m. Caso o valor do ponto estivesse fora do intervalo 0,75 a 1,25 vezes a medida dos vizinhos, o ponto foi classificado como um *inlier* e removido.

Geração de mapas interpolados

O programa de computador foi desenvolvido para gerar mapas por interpolação utilizando os dados obtidos após as etapas de filtragem, caso esta etapa tenha sido executada pelo usuário. Caso contrário, o programa de computador adotou os dados brutos obtidos pelo sensor. O método de interpolação adotado foi a krigagem ordinária, seguindo o protocolo e as equações descritas por Isaaks e Srivastava (1989). Antes de realizar a interpolação, o programa definiu o contorno da área com base nos pontos coletados. O algoritmo *alpha concave hull* (ASAEED et al., 2017) foi implementado para determinar, de forma automática, o contorno da área. A partir do contorno, o programa gerou uma grade regular com a distância entre os pontos definidos pelo usuário, com um valor padrão de 10 m.

Em seguida, o programa de computador gerou o semivariograma experimental, agrupando as distâncias entre pares de pontos em intervalos (*lags*). As distâncias maiores que f vezes a máxima distância entre pares de pontos não foram utilizados para geração do semivariograma. O número de intervalos de distâncias e o fator f adotados foram 16 e 0,6, respectivamente, podendo ser modificados pelo usuário. Para cada intervalo de distâncias, a semivariância foi calculada usando a equação (2.1).

$$\gamma = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (Z_i - Z_j)^2 \quad (2.1)$$

em que γ é a semivariância, N é o número de pares de pontos contidos em cada intervalo de distâncias, Z_i e Z_j são os valores da variável em cada par de ponto ij .

A partir do semivariograma experimental, o programa de computador foi desenvolvido para ajustar três modelos para o semivariograma teórico: modelo exponencial, esférico e Gaussiano. O ajuste dos parâmetros do semivariograma foi realizado com base na minimização da soma dos quadrados dos erros. O módulo *SciPy*, uma biblioteca de código aberto para Python com ferramentas de computação científica (JONES et al., 2001) foi utilizado para o ajuste do semivariograma. A escolha do modelo foi realizada adotando como critério o modelo com menor soma de quadrados dos erros.

Em cada ponto da grade regular, o programa buscou os 16 vizinhos mais próximos e calculou o valor interpolado utilizando a equação (2.2).

$$Z^* = \sum_{i=1}^N w_i Z_i \quad (2.2)$$

em que Z^* é o valor interpolado, w_i é o peso do vizinho i e Z_i é o valor da variável no vizinho i . O vetor w , composto pelos pesos a ser aplicado em cada vizinho, foi obtido pela equação (2.3).

$$w = C^{-1}d \quad (2.3)$$

em que C é matriz de covariância estimada para todos os pares de pontos vizinhos. E d é o vetor de covariância estimada entre o ponto da grade (onde o valor está sendo interpolado) e cada um dos vizinhos. A covariância estimada

entre dois pontos foi calculada utilizando a equação do modelo de semivariograma teórico ajustado e a distância entre os dois pontos.

Além dos pesos de cada vizinho, o vetor w continha o multiplicador de Lagrange. Utilizando o multiplicador de Lagrange, foi possível estimar o desvio padrão do erro de interpolação da interpolação da variável em cada ponto da grade (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Ao final da interpolação, o programa apresentou o semivariograma experimental e teórico, a grade regular utilizada e os mapas de interpolação e de desvio padrão do erro de interpolação.

Análise de agrupamento

Usando os mapas da interpolação por krigagem ordinária, um algoritmo foi implementado para realizar uma análise de agrupamento usando o algoritmo fuzzy k-means (BEZDEK et al., 1984). O número de classes, o coeficiente fuzzy e o número de interações foram estabelecidos pelo usuário, com valores padrão 2; 1,25 e 15, respectivamente.

Estudo de caso

Em vez de usar um arquivo de dados gerado pelo próprio sistema embarcado, o programa de computador desenvolvido foi testado usando um arquivo com dados de um monitor de produtividade. O arquivo foi gerado durante a colheita de um talhão de soja de 31,6 ha, em uma fazenda localizada no estado de São Paulo, Brasil. O arquivo de dados continha informações sobre a latitude, longitude e a produtividade convertida para o teor padrão de umidade de grãos.

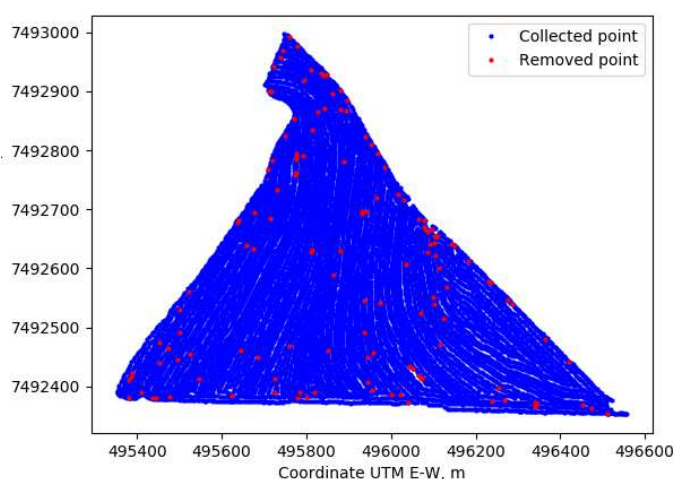
A análise foi realizada filtrando os dados, gerando o mapa de produtividade usando krigagem ordinária e o mapa com a produtividade em duas classes: baixa e alta produtividade. As etapas de interpolação e agrupamento foram realizadas usando os dados brutos e filtrados para avaliar a influência das etapas de filtragem de dados nos mapas gerados. Em todos os testes, os valores padrão para os parâmetros do programa de computador foram usados.

2.5 Resultados e discussão

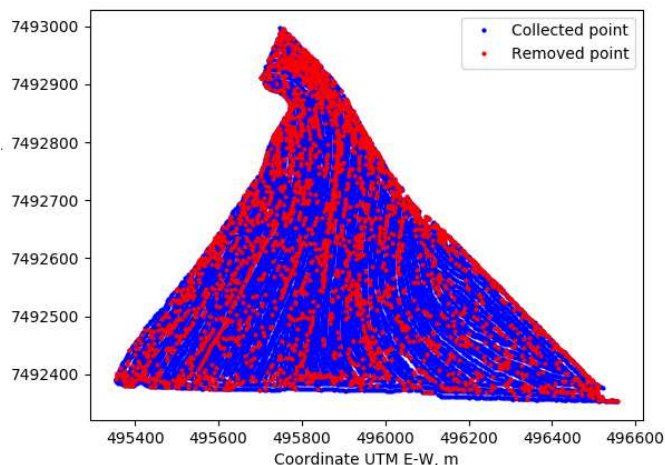
O programa de computador desenvolvido para o sistema embarcado foi nomeado como DAGAPy (programa de computador de Aquisição de Dados e

Análise Geoestatística em Python) e registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob número BR512019002802-3. Para tornar o programa de computador acessível ao público, possibilitando o seu uso e modificação, o código fonte foi disponibilizado no GitHub (<https://github.com/LabDig/DAGAPy>). Para usar o programa desenvolvido para aquisição de dados, linhas de código precisam ser incluídas para ler os sinais dos sensores utilizados pelo usuário e para salvar os dados na memória do BBB.

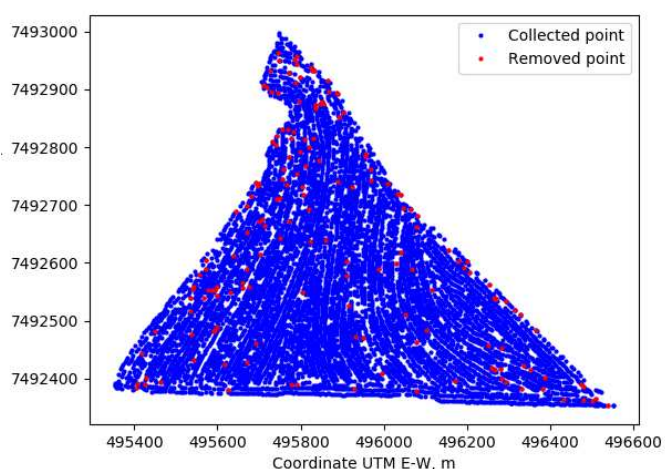
Na primeira etapa do processo de filtragem, adotaram-se os limites inferior e superior 0,5 e 8,0 Mg ha⁻¹, respectivamente, resultando na remoção de 136 pontos (Figura 2.2a). Na análise *outlier* e *inlier*, 2782 e 166 pontos foram removidos, respectivamente (Figura 2.2b e 2.2c). A grande quantidade de dados removidos na etapa de filtragem pode estar relacionada ao fato do talhão ter uma geometria irregular, resultando em um número maior de manobras e o uso parcial da plataforma de corte da colhedora. Pode ter ocorrido do operador não informar ao monitor de produtividade que a plataforma da colhedora não estava sendo completamente usada, gerando erros na determinação da produtividade. Esse tipo de problema foi relatado por Lyle et al. (2014) como um problema comum na geração de mapas de produtividade.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.2 - Localização dos pontos removidos no processo de filtragem: (a) pontos com valores fora do limite aceitável, (b) outliers e (c) inliers. Fonte: Coelho et al. (2018)

Nos dados brutos, verificou-se a presença de pontos com valores de produtividade muito baixos ou muito altos em relação aos valores de referência para produtividade da soja. Ao realizar o processo de filtragem, iniciado com o botão “*Process Filtering*”, esses pontos foram removidos. Para o histograma de dados filtrados, observou-se tendência de acompanhar a distribuição normal de probabilidade, comparado ao histograma de dados brutos (Figura 2.3). A maior similaridade a distribuição normal de probabilidade foi devido a etapa de remoção de *outliers*, que foi baseada na média e no desvio padrão dos dados (SIMBAHAN et al., 2004). Em resumo, o programa removeu 29,4% dos pontos (correspondendo a 3053 pontos) nas três etapas de filtragem. Essa porcentagem de remoção foi consistente com os valores apresentados por Ping e Dobermann

(2005) e Sun et al. (2013), que relataram a remoção de 10 a 30% dos dados gerados por monitores de produtividade.



Figura 2.3 - Janela do programa de computador para execução da filtragem, mostrando o histograma dos dados brutos e filtrados. Fonte: Coelho et al. (2018)

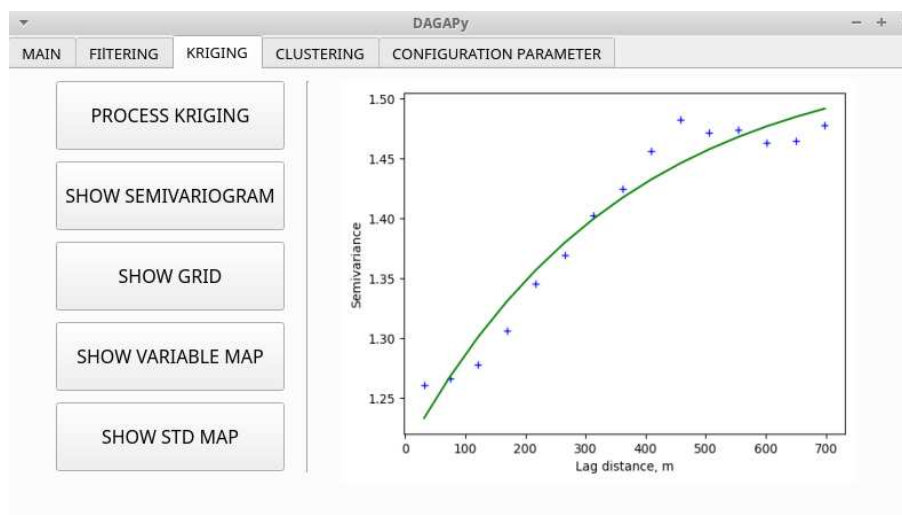
Houve um ligeiro aumento na média e mediana, bem como uma redução significativa na assimetria, curtose e desvio padrão dos dados filtrados em comparação com os dados brutos (Tabela 2.1). Resultados semelhantes foram relatados por Taylor et al. (2007) e Sudduth e Drummond (2007), que aplicaram procedimentos de filtragem similares em dados de produtividade.

Tabela 2.1 - Estatísticas resumidas dos dados brutos e filtrados. Fonte: Coelho et al. (2020)

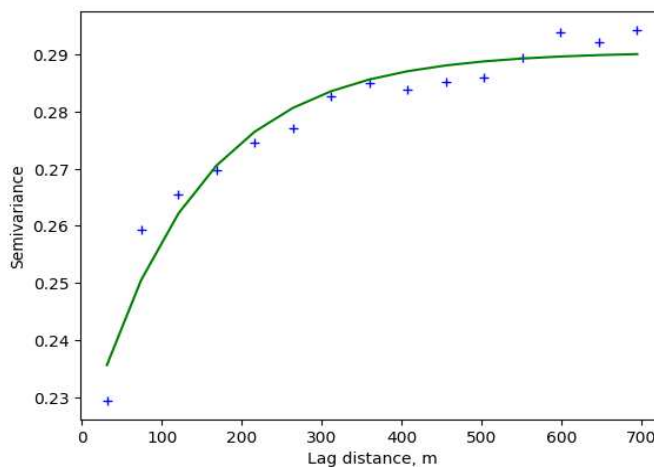
Parâmetro	Dados brutos	Dados filtrados
Número de pontos	10376	7045
Mediana (Mg ha ⁻¹)	3,17	3,23
Média (Mg ha ⁻¹)	3,28	3,30
Mínimo (Mg ha ⁻¹)	0,34	1,78
Máximo (Mg ha ⁻¹)	13,13	5,15
Assimetria	1,57	0,53
Curtose	8,95	0,13
Desvio padrão	1,18	0,51

Na janela de krigagem, o processo de interpolação foi iniciado pressionando o botão “Process Kriging”. Ao final da interpolação, o usuário pôde visualizar o semivariograma, a grade regular, o mapa interpolado e o mapa de desvio padrão (Figura 2.4a). O modelo de semivariograma teórico selecionado automaticamente pelo programa de computador para os dados de produtividade

bruto foi esférico, com valores de $1,21 \text{ Mg}^2 \text{ ha}^{-2}$; $1,47 \text{ Mg}^2 \text{ ha}^{-2}$ e 582 m para os parâmetros efeito pepita, patamar e alcance, respectivamente (Figura 2.4a). Para os dados filtrados, o programa de computador selecionou o modelo exponencial com valores de $0,19 \text{ Mg}^2 \text{ ha}^{-2}$; $0,26 \text{ Mg}^2 \text{ ha}^{-2}$ e 231 m para os parâmetros efeito pepita, patamar e alcance, respectivamente (Figura 2.4b).



(a)

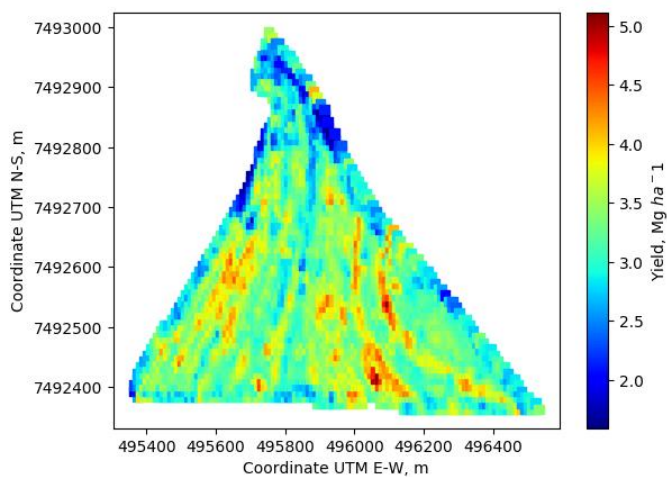


(b)

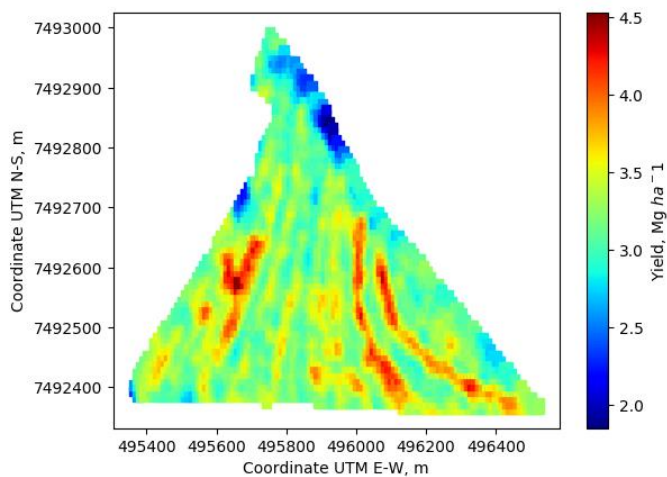
Figura 2.4 - Janela do programa de computador para executar a krigagem com opções para visualizar o semivariograma, a malha regular, o mapa interpolado e o mapa de desvio padrão. Apresentação do semivariograma usando dados brutos (a) e usando dados filtrados (b). Fonte: Coelho et al. (2018).

Verificou-se um menor efeito de pepita, menor diferença entre os semivariograma experimentais e teóricos e melhor definição do patamar quando o semivariograma foi gerado com os dados filtrados. Esse comportamento, também obtido por Simbahan et al. (2004), Sudduth e Drummond (2007) e Sun

et al. (2013), pode ser explicado como uma consequência da remoção de pontos com valores de produtividade discrepantes. Os pontos discrepantes, quando presentes, são responsáveis por aumentar a semivariância e mascarar a dependência espacial existente. Na análise dos mapas de produtividade interpolados gerados com dados brutos e com dados filtrados, foram observadas diferenças na distribuição espacial da produtividade da soja (Figura 2.5). As diferenças dos mapas podem ser devidas à influência de pontos com produtividade muito baixa ou muito alta, mascarando quaisquer dependências espaciais existentes. Spekken et al. (2013) relataram que o uso de dados filtrados tende a gerar mapas mais suaves.



(a)



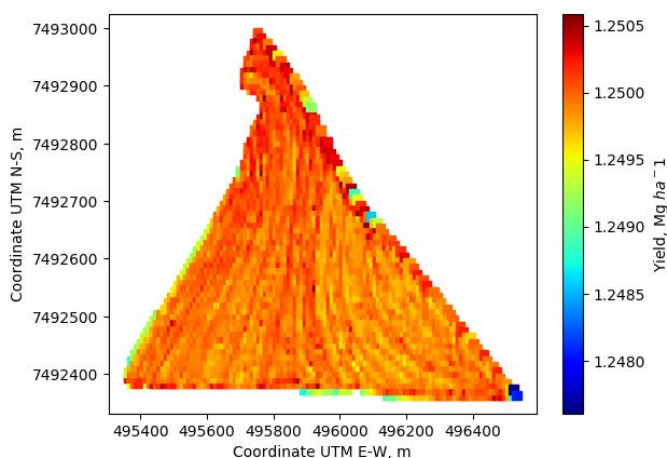
(b)

Figura 2.5 - Mapa de produtividade obtido por krigagem: (a) gerado com dados brutos e (b) gerado com dados filtrados. Fonte: Coelho et al. (2018).

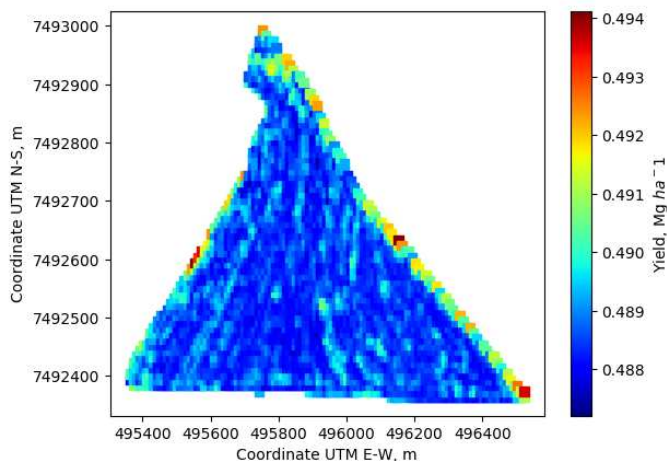
A comparação dos mapas de desvio padrão do erro de interpolação indicou que maiores valores de desvio padrão foram obtidos no mapa gerado com dados brutos (Figura 2.6). Maiores valores de desvio padrão do erro de interpolação indica a presença de pontos vizinhos fracamente correlacionados com o ponto onde a interpolação foi executada (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). O desvio padrão do erro da interpolação pode ser utilizado para avaliar se a densidade amostral adotada foi adequada para caracterizar a dependência espacial da variável em questão (CIGAGNA et al, 2015).

No mapa gerado com dados brutos, os maiores valores de desvio padrão pode ser explicados pela presença dos pontos com valores discrepantes, que mascaram a dependência espacial. Logo, tem-se que o uso de dados filtrados tende a gerar mapas interpolados mais confiáveis. A influência da quantidade e localização dos pontos amostrados no comportamento do mapa de desvio padrão do erro de estimação foi claramente observada nos resultados obtidos por Kumar e Remadevi (2006). Os autores encontraram menor desvio padrão do erro de estimação no centro da área de estudo, onde a maioria dos pontos amostrados estão localizados, e há um aumento abrupto no desvio padrão do erro de estimação à medida que se aproximava das bordas, onde não havia pontos amostrados.

No entanto, uma magnitude similar de desvio padrão do erro de estimação foi observada em todo o mapa. Uma hipótese para este comportamento foi a ausência de problemas em relação à densidade amostral, uma vez que alta densidade amostral é obtida em dados gerados em monitores de produtividade.



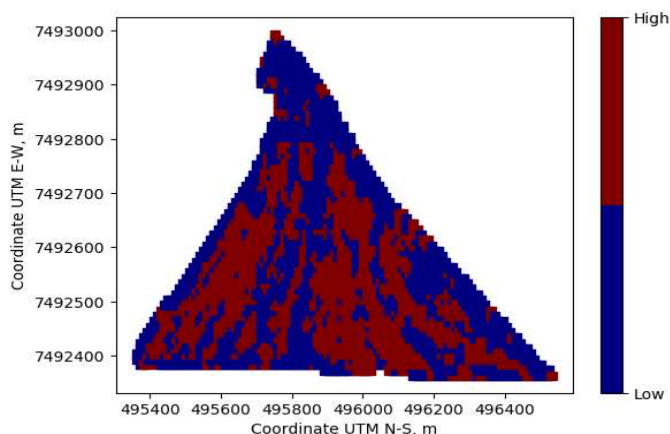
(a)



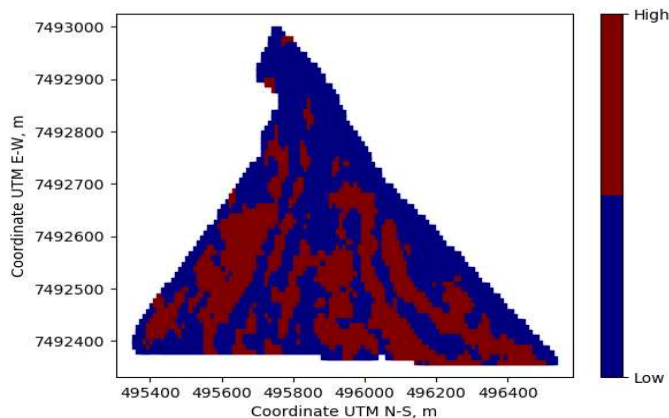
(b)

Figura 2.6 - Mapa de desvio padrão do erro de interpolação usando: (a) dados brutos e (b) dados filtrados. Fonte: Coelho et al. (2018).

Na última etapa da análise, o mapa gerado por interpolação foi agrupado adotando duas classes, baixa e alta produtividade (Figura 2.7). No mapa de classes gerado com os dados brutos, foi observado uma maior presença de pequenas regiões com alta produtividade. De acordo com Blackmore e Moore (1999), a filtragem dos dados elimina pequenas variações no mapa interpolado, gerando mapas de classes mais contínuos. No entanto, para obter mapas sem fragmentos, Córdoba et al. (2016) sugeriram o uso de um filtro mediano.



(a)



(b)

Figura 2.7 - Mapa com duas classes de produtividade gerados usando (a) dados brutos e (b) dados filtrados. Fonte: Coelho et al. (2018).

2.6 Conclusões

- Um sistema embarcado para aquisição de dados, filtragem e geração de mapa interpolado e mapa de classes foi desenvolvido.
- Em dados de produtividade, pontos com valores fora da faixa de valores aceitáveis, *outliers* e *inliers* foram detectados e removidos do conjunto de dados original.
- Diferenças foram encontradas nos mapas interpolados, mapa de desvio padrão do erro de interpolação e mapa de classes gerados com os dados brutos e filtrados.

2.7 Referências

- ASAEEDI, S.; DIDEHVAR, F.; MOHADES, A. α -Concave hull, a generalization of convex hull. **Theoretical Computer Science**, v. 702, p. 48–59, 2017.
- BEZDEK, J. C.; EHRLICH, R.; FULL, W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. **Computers & Geosciences**, v. 10, n. 2–3, p. 191–203, 1984.
- BITELLA, G.; ROSSI, R.; BOCHICCHIO, R.; PERNIOLA, M.; AMATO, M. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, v. 14, n. 10, p. 19639–19659, 2014.

- BLACKMORE, S.; MOORE, M. Remedial Correction of Yield Map Data. **Precision Agriculture**, v. 1, n. 1, p. 53–66, 1999.
- CHIGANA, C.; BONOTTO, D.M.; STURARO, J.R.; CAMARGO, A.F.M. Geostatistical techniques applied to mapping limnological variables and quantify the uncertainty associated with estimates. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.27, n. 4, p.421-430, 2015
- COELHO, A. L. de F., QUEIROZ, D. M., VALENTE, D. S. M., & PINTO, F. de A. de C. An open-source spatial analysis system for embedded systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.154, n.1, p. 289–295, 2018
- CÓRDOBA, M. A.; BRUNO, C. I.; COSTA, J. L.; PERALTA, N. R.; BALZARINI, M. G. Protocol for multivariate homogeneous zone delineation in precision agriculture. **Biosystems Engineering**, v. 143, p. 95–107, 2016.
- FISHER, D. K.; HUANG, Y. Mobile Open-Source Plant-Canopy Monitoring System. **Modern Instrumentation**, v. 06, n. 01, p. 1–13, 2017.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. v. 1
- JONES, E.; OLIPHANT, T.; PETERSON, P. **SciPy: Open Source Scientific Tools for Python**, 2001.
- KUMAR, V.; REMADEVI. Kriging of Groundwater Levels – A Case Study. **Journal of Spatial Hydrology**, v. 6, n. 1, p. 12, 2006.
- LYLE, G.; BRYAN, B. A.; OSTENDORF, B. Post-processing methods to eliminate erroneous grain yield measurements: Review and directions for future development. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 4, p. 377–402, 2014.
- MINASNY, B.; MCBRATEY, A. **FuzMe version 3.0**, Australian Centre for Precision Agriculture, The University of Sydney, Sydney, Australia, 2002.
- MOLLOY, D. **Exploring BeagleBone: Tools and Techniques for Building with Embedded Linux**. Indianapolis: John Wiley & Sons, 2014.

- PING, J. L.; DOBERMANN, A. Processing of Yield Map Data. **Precision Agriculture**, v. 6, n. 2, p. 193–212, abr. 2005.
- QUEIROZ, D. M.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K.; SANTOS, E. D. Development and test of a low-cost portable soil apparent electrical conductivity sensor using a BeagleBone Black. In: **2017 ASABE Annual International Meeting**. 2017..
- SIMBAHAN, G. C.; DOBERMANN, A.; PING, J. L. Screening yield monitor data improves grain yield maps. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 4, p. 1091–1102, 2004.
- SPEKKEN, M.; ANSELMINI, A. A.; MOLIN, J. P. A simple method for filtering spatial data. **Precision Agriculture 2013 - Papers Presented at the 9th European Conference on Precision Agriculture**, ECPA 2013.
- SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T. Yield editor: Software for removing errors from crop yield maps. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 6, p. 1471–1482, 2007.
- SUN, W.; WHELAN, B.; MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B. An integrated framework for software to provide yield data cleaning and estimation of an opportunity index for site-specific crop management. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 4, p. 376–391, 2013.
- TAYLOR, J. A.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. Establishing management classes for broadacre agricultural production. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 5, p. 1366–1376, 2007.
- THOMASSON, J. A.; SUI, R.; WRIGHT, G. C.; ROBSON, A. J. Optical peanut yield monitor: development and testing. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 22, n. 6, p. 809–818, 2006.
- VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. De; PINTO, F. D. A. D. C.; SANTOS, N. T.; SANTOS, F. L. Definition of management zones in coffee production fields based on apparent soil electrical conductivity. **Scientia Agricola**, v. 69, n. 3, p. 173–179, 2012.

WHELAN, B. M.; MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B. VESPER 1.5 - Spatial prediction software for precision agriculture. **6th International Conference on Precision Agriculture**, p. 1–14, 2002.

3 DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR DE BAIXO CUSTO PARA UMA SEMEADORA MANUAL DE PRECISÃO²

3.1 Resumo

O uso de máquinas para aplicações de insumos à taxa variada está se tornando comum na agricultura moderna. Contudo, o custo de aquisição dessas máquinas é considerado alto para os agricultores de pequena escala. Vários estudos têm sido realizados usando componentes de baixo custo no desenvolvimento de máquinas agrícolas para agricultura de precisão, tornando possível a sua adoção nos sistemas produtivos de pequena escala. Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um controlador de baixo custo para semeadura à taxa variada. O sistema foi desenvolvido e instalado em uma semeadora manual de 1 linha com um distribuidor de sementes com disco perfurado horizontal. Um motor elétrico de corrente contínua foi usado para acionar o mecanismo dosador de sementes. A velocidade angular do motor elétrico foi controlada por um computador de placa única BeagleBone Black. Um programa de computador foi desenvolvido em linguagem Python 3.6 e uma interface gráfica do usuário foi gerada usando o PyQt5. Os ensaios de campo foram realizados com sementes de milho, utilizando um disco de 28 furos e um mapa de semeadura com quatro zonas de manejo. O espaçamento entre linhas adotado foi 0,75 m e a velocidade de deslocamento foi próxima a 1,0 m s⁻¹. Testes de campo mostraram que o controlador foi eficaz na identificação das quatro zonas de manejo e no controle da velocidade angular do motor. A partir da contagem do número de plantas germinadas, verificou-se que a variação na velocidade angular do motor resultou em uma alteração na densidade de plantas. Em cada zona de manejo, a densidade de plantas real correspondeu à densidade prescrita no mapa de semeadura. O custo total dos componentes utilizados para desenvolver o controlador foi de US\$ 337,97, caracterizando-o como baixo custo. Os testes de campo bem-sucedidos mostraram o potencial do uso de componentes de baixo custo para o desenvolvimento de máquinas com aplicação à taxa variada para a agricultura de pequena escala.

² Este capítulo se refere a uma versão em português do artigo “*Development of a variable-rate controller for a low-cost precision planter*” publicado no periódico *Applied Engineering in Agriculture*, v. 36, n. 2, pp. 233-243, 2020.

Palavras-chave. Agricultura de pequena escala. Zonas de manejo. Agricultura de precisão. Computador de placa única.

3.2 Abstract

The use of machines for variable-rate applications is becoming popular in modern agriculture. However, the acquisition cost of these machines is high for smallholder farmers. Several studies have been carried out using low-cost components in the development of precision agriculture machines to facilitate their adoption by smallholder farmers. Thus, the objective of this work was to develop a variable-rate controller for a low-cost precision planter. The system was developed and installed on a 1-row manual planter with a horizontal perforated disk distributor. A direct-current electric motor was used to drive the seed metering device. The angular velocity of the electric motor was controlled by a BeagleBone Black single-board computer. A program was written in Python 3.6 language, and a graphical user interface was generated by using PyQt5. Field trials were performed with maize seeds using a 28-hole disk and a prescription seeding map with four management zones. The row spacing was 0.75 m, and the planter ground speed was close to 1.0 m s⁻¹. Field tests showed that the controller was effective at identifying the four management zones and controlling the angular velocity of the motor. By counting the number of plants germinated in the field test, it was verified that the variation in the angular velocity of the motor produced a change in the planting density. At each management zone, the planting density corresponded to the prescribed seeding map. The total cost of the parts used to assemble the controller was US\$337.97, characterizing it as low cost. Successful field tests showed the potential for using low-cost components to develop variable-rate machines for smallholder farmers.

Keywords. Smallholder farming. Management zones. Precision agriculture. Single-board computer.

3.3 Introdução

O manejo da produção agrícola utilizando a agricultura de precisão tornou-se popular em todo o mundo. A agricultura de precisão é adotada buscando aumentar a eficiência dos sistemas de produção agrícola, considerando as

variabilidades espaciais e temporais da cultura e do solo. Conceitualmente, a adoção da agricultura de precisão proporciona maior lucratividade ao agricultor e menores impactos ambientais na produção de alimentos.

Na operação de semeadura, a lucratividade é otimizada pela adoção da densidade de plantas adequada para cada região do talhão. Ou seja, locais com menor potencial produtivo recebem menor densidade de plantas, enquanto maior densidade de plantas é adotada em áreas com maior potencial de produção de alimentos (EHSANI et al., 2005). Ainda relacionado à semeadura, a desuniformidade de espaçamento entre plantas gera competição por luz, água e nutrientes, resultando em uma diminuição da produtividade. A competição pode ocorrer com plantas daninhas que se propagam nos espaçamentos vazios ou entre as plantas da cultura se estas estiverem muito próximas (CELIK et al., 2007; CARPES et al., 2017).

A utilização de controladores para semeadura à taxa variada dispensa a utilização da roda de sustentação como roda motora e os sistemas de transmissão mecânicos para o acionamento dos mecanismos dosadores de sementes. O benefício é o aumento na uniformidade de distribuição de sementes, visto que o deslizamento da roda motora e as vibrações nos mecanismo de transmissão ocasionam falhas no funcionamento do mecanismo dosador. Kamgar et al. (2015) e Li et al. (2015) desenvolveram sistemas eletrônicos para controlar a velocidade angular do mecanismo dosador de sementes em diferentes semeadoras. Um motor elétrico foi utilizado para substituir o sistema de transmissão mecânico responsável pelo acionamento dos mecanismos dosadores de sementes. Um microprocessador foi usado para controlar a velocidade angular do motor elétrico com base na densidade de plantas, no espaçamento entre linhas e na velocidade de deslocamento da semeadora. Os resultados dos testes utilizando as semeadoras com e sem o sistema de controle eletrônico indicaram que os sistemas desenvolvidos aumentaram a uniformidade de espaçamento entre plantas. Na semeadora original, a desuniformidade de espaçamento foi atribuída, principalmente, ao deslizamento da roda motora e às vibrações no sistema de transmissão.

Diversos modelos de semeadoras com controladores de semeadura à taxa variada estão disponíveis no mercado. Também existem conjuntos de conversão que permitem transformar semeadoras de distribuição a taxa fixa em semeadoras para distribuição à taxa variada. No entanto, essas semeadoras ou conjuntos de conversão são, geralmente, caros (BITELLA et al., 2014; MAIA et al., 2017). Os altos custos dos controladores para aplicação à taxa variada e a necessidade de profissionais capacitados para a sua operação e manutenção são barreiras para a sua adoção por agricultores de pequena escala (MAISIRI et al., 2005; VAN LOON et al., 2018). Esta classe de agricultores, normalmente, tem baixa capacidade de investimento em tecnologias para o seu sistema produtivo (MOWO et al., 2006). Centenas de milhões de agricultores de pequena escala fornecem os alimentos consumidos por um terço da população mundial. Porém, ao contrário dos grandes agricultores, eles quase não têm acesso às tecnologias de mecanização e agricultura de precisão (VAN LOON et al., 2018).

Os recentes avanços na eletrônica e a disponibilidade de componentes e programas de computador de código aberto vêm permitindo a redução nos preços de sensores, controladores e microcontroladores (FISHER; GOULD, 2012). A disponibilidade de componentes de código aberto elimina os obstáculos causados pela incompatibilidade dos componentes proprietários (MESAS-CARRASCOSA et al., 2015). Já a disponibilidade de programas de computador de código aberto elimina os custos associados aos pagamentos de licenças (RAYNA; STRIUKOVA, 2010). Esses benefícios vêm permitindo o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo direcionados aos agricultores com sistema produtivo em pequena escala (ALONSO-GARCIA et al., 2011; BITELLA et al., 2014; FISHER ; HUANG, 2017; QUEIROZ et al., 2017; CAY et al., 2018a, 2018b; COELHO et al., 2018; LOON ; SPERATTI, 2018).

As semeadoras com tecnologias de distribuição de sementes à taxa variada permitem variar a densidade de plantas e garantir a uniformidade do espaçamento entre plantas. A disponibilização de controladores de aplicação à taxa variada para os agricultores de pequena escala permite o aumento da eficiência do sistema produtivo, e conseqüentemente, os seus lucros. Portanto, um controlador de baixo custo contribui para desenvolvimento econômico dessa classe de agricultores.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver um controlador para semeadura à taxa variada com base em mapas. O pré-requisito considerado no desenvolvimento foi um equipamento de baixo custo e de código aberto que pudesse ser usado como um conjunto de conversão compatível com qualquer semeadora, especialmente as semeadoras tracionadas por humanos, animais ou tratores de pequeno porte. Além disso, o controlador deveria ter uma estrutura simples, ser de fácil operação e manutenção

3.4 Material e Métodos

O controlador para semeadura à taxa variada foi projetado para ser instalado na semeadora manual Knapik com roda de uma linha (Knapik Indústria Mecânica, Brasil). Esta semeadora é usada no plantio convencional, é tracionada por humanos e consiste de uma estrutura com uma roda de sustentação, um mecanismo dosador de sementes, um disco duplo para abertura de sulco e uma roda de fechamento do sulco (Figura 3.1). O mecanismo dosador de sementes da semeadora é baseado em um disco perfurado horizontal, com queda da semente por gravidade.

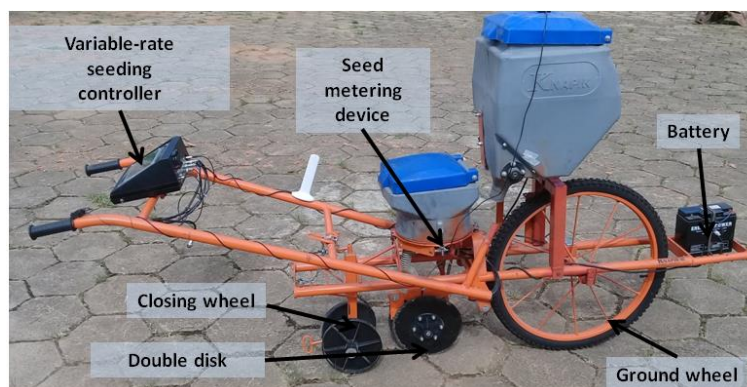


Figura 3.1. Semeadora manual Knapik utilizada no desenvolvimento do controlador para distribuição de sementes à taxa variada. Fonte: Coelho et al. (2020).

O sistema de acionamento do mecanismo dosador de sementes, que utilizava a roda de sustentação como roda motora e transmissão mecânica por corrente, foi removido e substituído por um motor elétrico de corrente contínua 12 V. Esse motor elétrico acionou um eixo secundário que foi conectado ao eixo do mecanismo de distribuição por um par de engrenagens com uma redução 1:

3.3. O computador de placa única BeagleBone Black (BBB) Revisão C foi usado no controlador. O BBB possui várias portas para comunicação com periféricos, incluindo HDMI, USB, leitor de cartão de memória e pinos de entrada e saída de uso geral. Um controlador de motor BTS7960 foi usado para controlar a velocidade angular do motor elétrico com base no sinal modulado por largura de pulso (Pulse Width Modulation - PWM) emitido pelo BBB.

Um Arduino ProMini, um módulo de sistema de satélite de navegação global (Global Navigation Satellite System - GNSS) u-blox NEO-6M e um uma tela LCD sensível ao toque também foram conectados ao BBB (Figura 3.2). A comunicação entre do módulo GNSS NEO-6M e do Arduino com o BBB foi implementada usando o protocolo de comunicação Receptor/Transmissor Universal Assíncrono (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter - UART). As portas HDMI e USB foram usadas para comunicação entre a tela LCD e o BBB. Uma bateria de 12 V foi usada para fornecer energia elétrica a todos os componentes. Os preços de aquisição, especificações e fabricantes dos componentes usados são mostrados na Tabela 3.1.

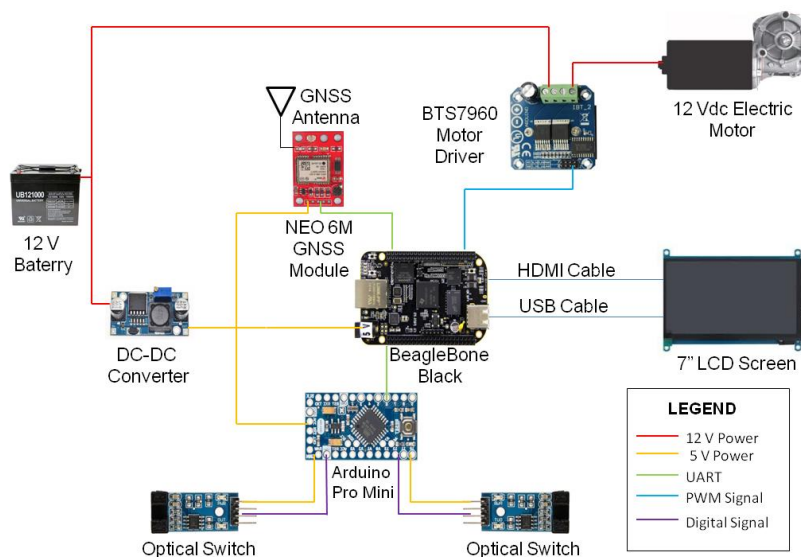


Figura 3.2. Componentes do controlador para sementeira à taxa variada. GNSS: sigla em inglês para sistema global de navegação por satélite. PWM: sigla em inglês para modulação por largura de pulso. UART: sigla em inglês para receptor / transmissor assíncrono universal. Fonte: Coelho et al. (2020).

Tabela 3.1. Componentes do controlador para sementeira à taxa variada, com suas quantidades, especificações e custos unitários. Fonte: Coelho et al. (2020).

Qtde.	Nome do	Especificações	Fabricante	Custo
-------	---------	----------------	------------	-------

Componente				Unitário (US\$) *
1	BeagleBone Black Revisão C	Processador Sitara AM3358 ARM Cortex-A8 1.0 GHz. 512 MB RAM e 96 pinos de uso geral	BeagleBoard.org Foundation, EUA	69,91
1	Tela LCD	Entrada HDMI, resolução 800 × 600 pixels, sensível ao toque	Waveshare Electronics, China	61,88
1	Controlador para motor BTS7960	Tensão de entrada 12 a 24 V, corrente elétrica máxima 43 A and tensão do sinal lógico 3.3 a 5 V	HiLetgo Technology Co, China	13,59
1	Motor elétrico	Tensão de entrada 12 V, velocidade angular máxima 5.2 rad s ⁻¹ e torque nominal 6 N m	Makermotor, EUA	69,00
2	Chave óptica	Tensão de entrada 3.3 a 5 V	Vishay Semiconductors, EUA	1,90
1	Arduino ProMini	Tensão de entrada 3.3 V e frequência de operação 8 Mhz	SparkFun Eletronics, EUA	3,33
1	Módulo GNSSNEO-6M	Frequência de recepção de dados 1 Hz e tensão de entrada 3.3.a 5 V	u-blox AG, Suíça	33,98
1	Bateria recarregável	Tensão 12 V e capacidade 18 Ah	Powerstar, Reino Unido	49,99
1	Caixa para montagem, regulador de tensão, cabos elétricos e conectores			32,49
Total (US\$)				337,97

* Preços obtidos na loja virtual <https://www.amazon.com/>, em 21 de janeiro de 2020.

A linguagem de programação Python, versão 3.6, foi usada para desenvolver o programa de computador para o controlador (fluxograma na Figura 3.3). A ferramenta PyQt5 (Riverbank Computing Limited, Reino Unido) foi usada para criar a interface gráfica do usuário para o programa de computador (Figura 3.4). O programa foi executado no BBB com um sistema operacional Debian 8.6, sendo a interface gráfica do usuário exibida na tela LCD.

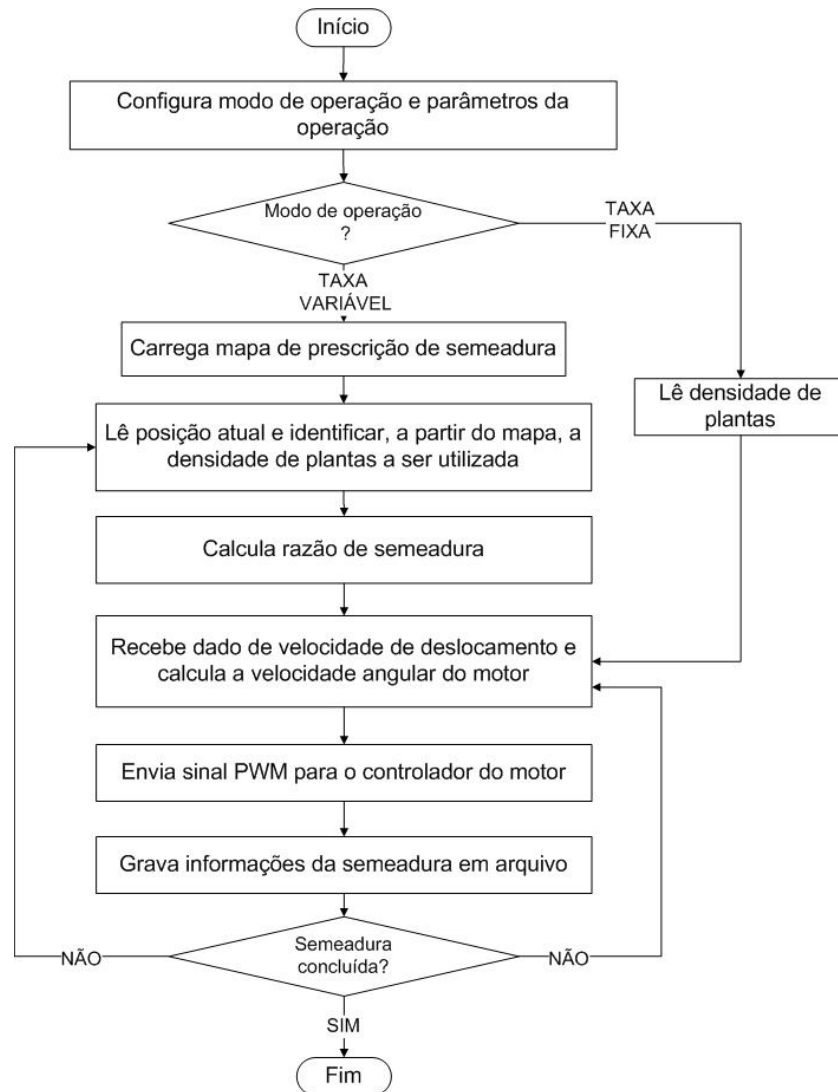
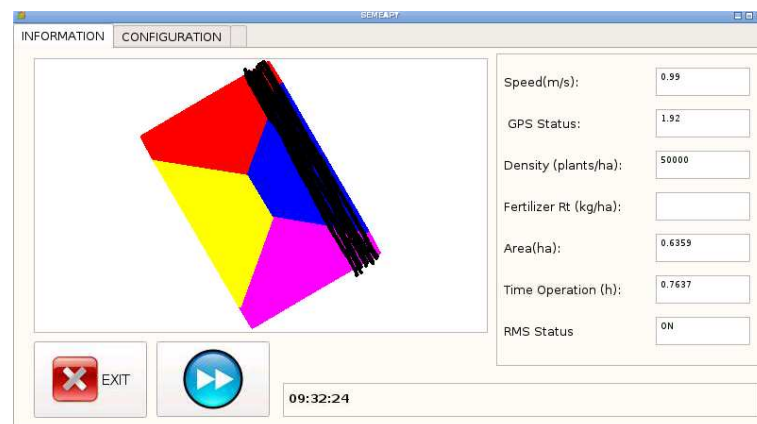
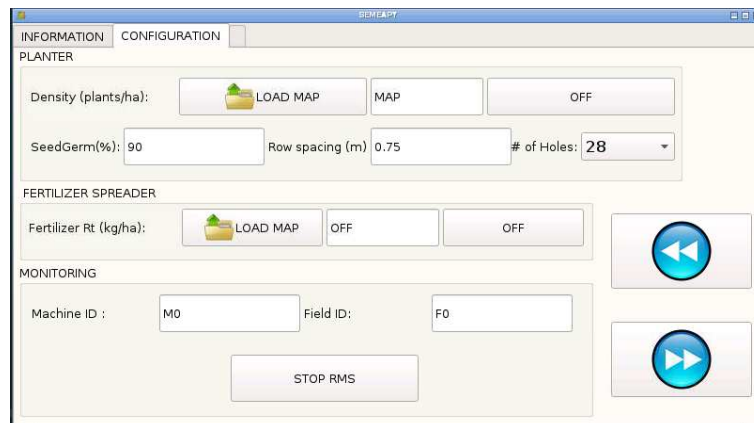


Figura 3.3. Fluxograma do programa de computador desenvolvido para o controlador de distribuição de sementes à taxa variada. Fonte: Adaptador de Coelho et al. (2020).



(a)



(b)

Figura 3.4. Interface gráfica do usuário do programa de computador desenvolvido: (a) tela de visualização de parâmetros com o mapa de semeadura e a trajetória da semeadora e (b) tela de configuração de parâmetros. Fonte: Coelho et al. (2020).

Dois modos de operação foram implementados no controlador: semeadura com distribuição de sementes à fixa e semeadura com distribuição de sementes à taxa variada. O modo de distribuição à taxa variada foi baseado em um mapa de prescrição de densidade de plantas. O programa de computador permitiu ao usuário selecionar um arquivo de mapa, carregado em um cartão de memória e inserido no leitor de cartão BBB. O arquivo de mapa, no formato *shapefile*, continha as densidades de planta para cada zona de manejo. A partir do mapa de semeadura e da posição da semeadora, o programa identificou a densidade de plantas prescrita para a zona de manejo na qual a semeadora estava localizada. O módulo GNSS u-blox NEO-6M GNSS foi usado para obter a posição da semeadora. Este módulo é um receptor GNSS que usa o sinal do sistema GPS (Global Position System) na frequência L1. O módulo NEO-6M GNSS enviou sentenças RMC e GSA do padrão NMEA (Marine Electronics Association) para o BBB a cada 1,0 s. No modo de distribuição a taxa fixa, o usuário inseriu a densidade de plantas desejada na interface gráfica do usuário. Nos dois modos, o programa permitiu definir o espaçamento entre linhas, o número de furos no disco perfurado horizontal e a taxa de germinação das sementes.

Um disco recortado e um interruptor óptico foram usados para medir a velocidade do deslocamento da semeadora. Esse disco foi acoplado ao eixo da roda de sustentação da semeadora e o interruptor óptico foi fixado à estrutura da semeadora (Figura 3.5). Quando a semeadora estava em movimento, o

interruptor óptico forneceu um sinal elétrico em forma de onda quadrada. Este sinal foi lido pela plataforma Arduino Pro Mini e usado para calcular a velocidade do deslocamento da semeadora, de acordo com a equação (3.1):

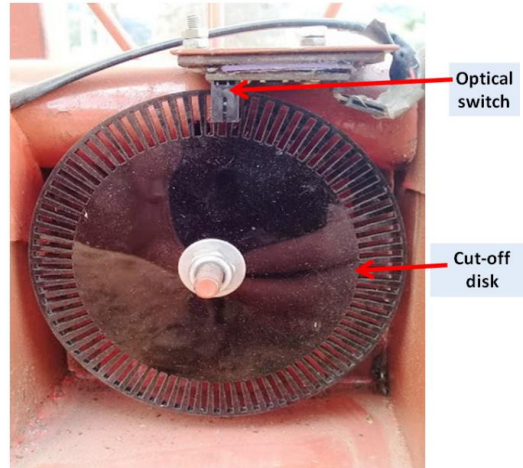


Figura 3.5. Disco recortado acoplado ao eixo da roda de sustentação da semeadora e interruptor óptico fixado à estrutura da semeadora, usados para medir a velocidade do deslocamento da semeadora. Fonte: Coelho et al. (2020).

$$v_s = \frac{2 p_s}{80 t} \quad (3.1)$$

onde v_s é a velocidade de deslocamento da semeadora (m s^{-1}), 2 é o perímetro da roda de terra (m), 80 é o número de pulsos gerados por rotação do disco, p_s é o número de pulsos contabilizados em um intervalo de tempo t (adotado 0,5 s).

Um segundo conjunto de disco recortado e interruptor óptico foi instalado no eixo do motor elétrico para medir a sua velocidade angular real, de acordo com a equação (3.2):

$$\omega_r = \frac{2 \pi p_m}{80 t} \quad (3.2)$$

onde ω_r é a velocidade angular real do motor elétrico (rad s^{-1}) e p_m é o número de pulsos contabilizados no intervalo de tempo t .

A velocidade de deslocamento da semeadora e a velocidade angular real do motor elétrico foram calculadas pelo Arduino ProMini e transmitidas ao BBB a cada 0,5 s. Usando a densidade de plantas, definida pelo usuário ou estabelecida no mapa de semeadura, o programa calculou a razão de semeadura usando a equação (3.3):

$$rs = \frac{P s}{100 g} \quad (3.3)$$

em que rs é a razão de semeadura (sementes m^{-1}), P é a densidade de plantas (plantas ha^{-1}), s é o espaçamento entre linhas (m), e g é a taxa de germinação das sementes (%). A velocidade angular do motor elétrico foi calculada usando a equação (3.4):

$$\omega_c = 2 \pi \frac{3,3 sr v_s}{N} \quad (3.4)$$

em que ω_c é a velocidade angular calculada ($rad s^{-1}$), N é o número de furos no disco horizontal instalado no mecanismo dosador, e 3,3 é a razão de velocidade das engrenagens usadas para transmitir potência do motor elétrico para o mecanismo dosador. No programa de computador desenvolvido, o método de controle em malha aberta foi adotado para controlar a velocidade angular do motor elétrico.

Determinação do fator de ciclo do sinal PWM em função da velocidade angular do motor

O ensaio foi realizado para determinar a relação entre o fator de ciclo do sinal PWM e a velocidade angular real do motor elétrico. O programa de computador foi modificado para permitir que o usuário alterasse o fator de ciclo usando a interface gráfica do usuário. O fator de ciclo foi alterado de 30 para 100%, com intervalos de 10%. O fator de ciclo mínimo adotado foi de 30% porque os valores menores resultaram em torque insuficiente para o acionamento do mecanismo dosador de sementes. Após a estabilização, a velocidade angular do motor elétrico foi registrada durante 6 s, coletando 12 dados de velocidade para cada fator de ciclo. Um modelo linear foi ajustado para descrever o fator de ciclo em função da velocidade angular do motor elétrico de acordo com a equação (3.5):

$$fc = b_0 + b_1 \omega_c \quad (3.5)$$

em que fc é fator de ciclo (%) e b_0 e b_1 são parâmetros do modelo linear.

Geração do mapa de semeadura e ensaio em campo

Uma área experimental com solo argiloso e topografia plana foi usada para realizar o ensaio de campo da semeadora com o controlador para

semeadura à taxa variada desenvolvido. Um retângulo 90 × 60 m foi delimitado na área, com as coordenadas dos vértices determinadas por um receptor GNSS topográfico Trimble Pathfinder ProXT (Trimble Inc., EUA) capaz de processar sinais de frequência L1. Correção diferencial pós-processada foi aplicada às coordenadas dos vértices usando dados de uma estação base. A estação base estava localizada a 3,3 km da área experimental e é controlada pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (RBMC / IBGE).

O mapa de semeadura foi criado dividindo a área em quatro zonas de manejo, atribuindo a densidades de 40000, 50000, 60000 e 70000 plantas ha^{-1} (Figura 3.6). A organização das zonas de manejo foi definida de forma a produzir duas alterações na densidade de plantas em cada linha de semeadura. Para elaborar o mapa semeadura, foi utilizado o programa de computador de código aberto QGIS versão 2.18 (QGIS Development Team, 2009), adotando o datum WGS 84. O mapa, em formato *shapefile* e com o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), foi salvo no cartão de memória e inserido na memória do controlador desenvolvido.



Figura 3.6. Mapa de semeadura com as quatro zonas de manejo, utilizado no ensaio em campo. As setas indicam a direção de deslocamento da semeadora sobre o talhão. Fonte: Coelho et al. (2020).

Para o ensaio de campo, foram utilizadas sementes de milho da cultivar CRV 3042 comercializada pela Crivus (Grupo Crivus, Brasil). A taxa de germinação e o vigor das sementes foram determinados em laboratório, usando

os procedimentos recomendados pela Regra de Análise de Sementes (MAPA, 2009). A contagem de plantas saudáveis em uma amostra de 200 sementes resultou em uma taxa de germinação de 97% e vigor de 93%.

Na área delimitada, o preparo do solo para semeadura foi realizado com duas operações de gradagem. A operação de semeadura foi realizada em 25 de maio de 2019, adotando profundidade de semeadura 5,0 cm. No mecanismo dosador de sementes, foi utilizado um disco perfurado com 28 orifícios oblongos 14,0 × 9,5 mm. No programa de computador do controlador, o espaçamento entre linhas configurado foi 0,75 m. O espaçamento entre linhas foi controlado manualmente pelo operador

Foram empregadas duas pessoas para a operação de semeadura: uma para guiar a semeadora e operar o controlador, e outra para auxiliar na tração (Figura 3.7). A velocidade de deslocamento da semeadora foi mantida próxima a $1,0 \text{ m s}^{-1}$. Um receptor Trimble ProXT foi transportado pelo operador, coletando dados de posição a cada 1,0 s. No campo, 80 linhas foram semeadas com comprimento 90 m cada. No final de cada linha, as manobras foram realizadas fora da área delimitada. O volume de sementes no reservatório foi mantido em 50% da capacidade durante toda a operação. Após a operação de semeadura, a área foi irrigada semanalmente usando microaspersores para permitir a germinação das sementes e o desenvolvimento das plantas.

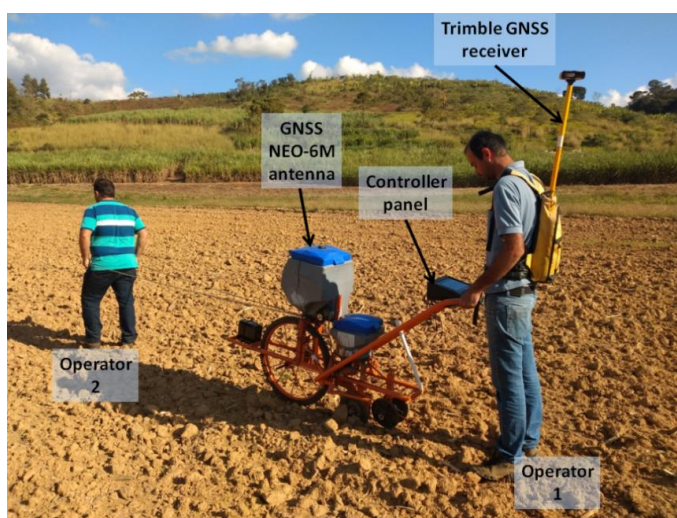


Figura 3.7. Ensaio de campo realizado com a semeadora de precisão manual usando o controlador desenvolvido para a distribuição de sementes à taxa variada. Fonte: Coelho et al. (2020).

Desvio do módulo GNSS de baixo custo utilizado na semeadora

Os dados de posição obtidos pelo módulo GNSS NEO-6M foram comparados com as posições obtidas pelo receptor Trimble ProXT. Correção diferencial pós-processada foi aplicada às posições coletadas pelo receptor Trimble ProXT usando dados da estação base da RBMC / IBGE. Na avaliação realizada, as posições do receptor Trimble foram adotadas como referência para calcular o desvio relativo das posições obtidas com o módulo GNSS NEO-6M. Baseado no procedimento proposto por Stombaugh et al. (2008), o desvio relativo das posições do módulo NEO-6M foi calculado a partir da distância perpendicular à trajetória ajustada a partir dos pontos do receptor Trimble ProXT. As coordenadas de ambos os receptores foram convertidas em coordenadas UTM, usando o datum WGS 84.

Para cada linha de semeadura, uma reta ($ax + by + c = 0$) foi ajustada para a trajetória da semeadora formado pelos pontos obtidos com o receptor Trimble ProXT. O desvio dos pontos obtidos pelo módulo NEO-6M em relação à linha ajustada foi calculado pela equação (3.6).

$$d_p = \frac{ax_i + by_i + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (3.6)$$

em que d_p é o desvio relativo da posição no módulo NEO-6M (m), a , b e c são coeficientes da linha ajustada para a trajetória da semeadora formado pelos pontos coletados com receptor Trimble ProXT, e x_i e y_i são as coordenadas de posição obtidos pelo módulo NEO-6M.

Uniformidade de espaçamento entre planta

Em 20 de junho de 2019 (26 dias após a operação de semeadura), o espaçamento entre duas plantas adjacentes foi medido com uma escala graduada. De todas as linhas de semeadura, 20 foram selecionadas aleatoriamente para realização das medições. No campo, não foi possível identificar o local exato em que o controlador realizou a mudança de densidade de plantas. Portanto, as plantas localizadas em regiões de mudança de zona manejo não foram utilizadas na análise de uniformidade de espaçamento. O comprimento das regiões de mudança de zona foi assumido como sendo o desvio relativo máximo no módulo GNSS NEO-6M, calculado usando a equação

(3.6). As plantas localizadas no início e no final de cada linha de semeadura também não foram usadas porque a velocidade de rotação da semeadora não era constante nessas regiões.

Para cada zona de manejo, os espaçamentos de um conjunto de 251 plantas foram medidos. Os índices qualidade da distribuição, de falha, de múltiplos e de precisão, conforme descrito por Kachman e Smith (1995), foram utilizados para analisar a uniformidade do espaçamento entre plantas. O índice de falhos (I_f) foi a porcentagem de espaçamentos maior que 1,5 vezes o espaçamento de referência (eq. 3.7). O índice de qualidade da distribuição (I_{qd}) foi a porcentagem de espaçamentos entre 0,5 e 1,5 vezes o espaçamento de referência (eq. 3.8). O índice múltiplo (I_m) foi a porcentagem de espaçamentos menor 0,5 vezes o espaçamento de referência (eq 3.9). O espaçamento da planta de referência (x_{ref}) foi calculado como o inverso da razão de semeadura (eq 3.3). O índice de precisão (I_p) foi calculado como sendo o coeficiente de variação dos espaçamentos entre plantas (eq 3.10).

$$I_f = 100 \frac{N_f}{N} \quad (3.7)$$

$$I_m = 100 \frac{N_m}{N} \quad (3.8)$$

$$I_{qd} = 100 - (I_f + I_m) \quad (3.9)$$

$$I_p = 100 \frac{\sigma}{\mu} \quad (3.10)$$

em que N_f é o número de espaçamentos classificados como falhos, N_m é o número de espaçamentos classificados como múltiplos, N é o número total de espaçamentos medidos (250 em cada conjunto); e μ e σ são a média e o desvio padrão dos espaçamentos das plantas, respectivamente.

A análise estatística foi realizada considerando quatro tratamentos, correspondentes às zonas de manejo com cinco repetições, resultando em 20 parcelas experimentais. Cada parcela correspondeu aos índices calculados utilizando espaçamentos de 251 plantas. Os quatro índices foram submetidos a análise de variância para avaliação da influência da densidade de plantas na uniformidade do espaçamento. Quando pertinente, as comparações entre as

médias de tratamento foram realizadas adotando-se o teste Tukey com 5% de significância.

Densidade de plantas

Em 3 de julho de 2019 (39 dias após a operação de semeadura), as plantas foram contabilizadas para determinar a densidade real de plantas em cada zona de manejo. Uma área de $3,0 \times 3,0 \text{ m}^2$ foi utilizada nesta avaliação. A análise estatística foi realizada adotando delineamento inteiramente casualizado com quatro tratamentos, correspondentes às zonas de manejo, e com 10 repetições cada, resultando em 40 parcelas experimentais. Em cada parcela, o número de plantas na área de $3,0 \times 3,0 \text{ m}^2$ foi convertido para número de plantas em um hectare. As posições das áreas foram selecionadas aleatoriamente dentro de cada zona de manejo. Para cada zona de manejo, a densidade de plantas medida foi comparada com a densidade de plantas prescrita no mapa de semeadura. A linguagem de programação R (R Core Team, 2014) foi utilizado para todas as análises estatísticas.

3.5 Resultados e discussão

Na determinação do fator de ciclo *do sinal PWM em função* da velocidade angular do motor, o valor médio da velocidade angular variou de 1,07 a 5,59 rad s^{-1} para fator de ciclo entre 30 e 100 %. Essa faixa de velocidade angular correspondeu a uma densidade entre 17.614 e 90.618 plantas ha^{-1} , com espaçamento entre linhas de 0,75 m, disco perfurado de 28 furos, velocidade de deslocamento próxima a $1,0 \text{ m s}^{-1}$ e taxa de germinação de sementes de 90%. O modelo linear ajustado, utilizado para expressar o fator de ciclo em função da velocidade angular do motor (Figura 3.8), foi significativo a 5% pelo teste F, com um coeficiente de determinação (R^2) de 0,99.

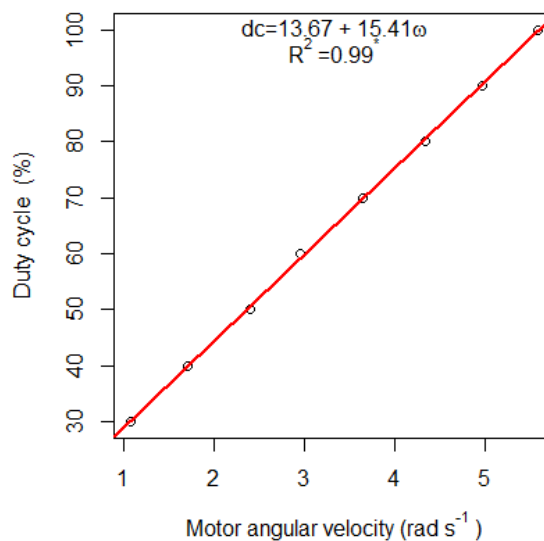
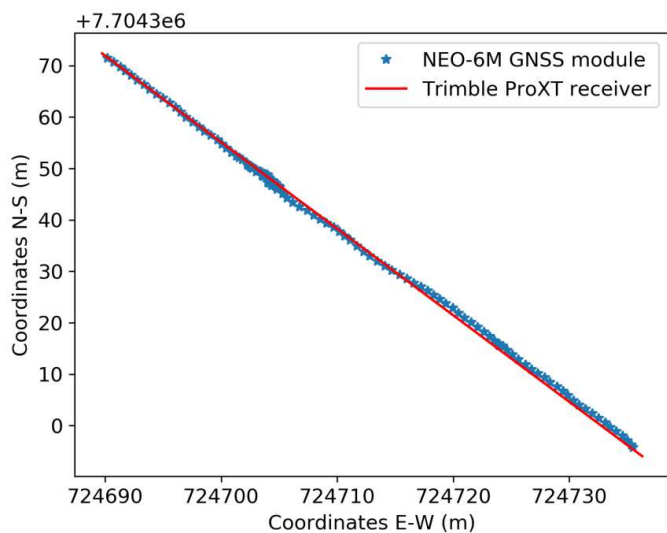
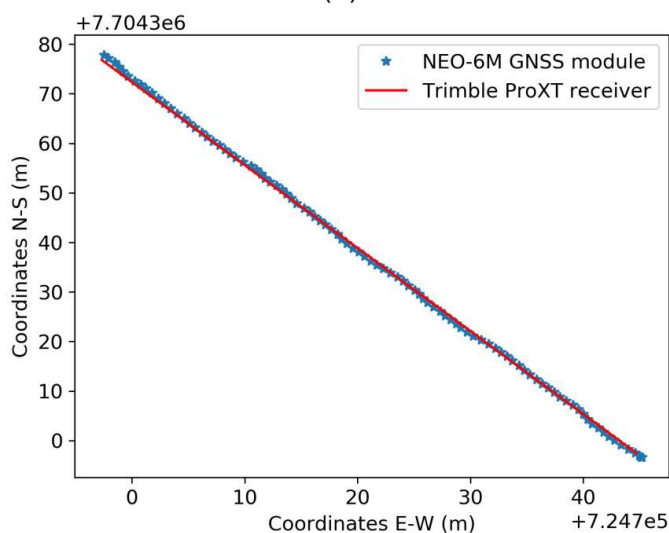


Figura 3.8. Modelo linear para determinar o fator de ciclo do sinal PWM (dc, em %) em função da velocidade angular do motor elétrico (ω , em rad s^{-1}). Fonte: Coelho et al. (2020)

Após a correção diferencial pós-processada das posições coletadas pelo receptor Trimble ProXT, 73,2% (4872) do total de posições (6693) foram corrigidas pelo código e 26,8% (1818) pela fase portadora. A precisão estimada da posição Trimble ProXT, obtida pelo programa de computador Trimble Pathfinder Office, foi inferior a 0,5 m para 91,1% dos pontos e entre 0,50 m e 1,00 m para 8,9% dos pontos. O PDOP (diluição da precisão da posição), informado pelo receptor Trimble ProXT, durante a operação de semeadura variou de 1,7 a 3,0. O coeficiente de determinação (R^2) para as linhas de trajetória ajustadas formadas pelos pontos Trimble foi superior a 0,99. Em todas as linhas de semeadura analisadas, o modelo ajustado foi significativo a 5% pelo teste F (Figura 3.9).



(a)



(b)

Figura 3.9. Linha ajustada para a trajetória da sementeira obtida pelo receptor Trimble ProXT e a trajetória da sementeira obtida pelo módulo u-blox NEO-6M GNSS, para duas linhas de sementeira escolhidas aleatoriamente (a e b). Fonte: Coelho et al. (2020).

Os desvios relativos de posição do módulo NEO-6M GNSS seguiram uma distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5%. A média, desvio padrão e desvio máximo de posição para o módulo GNSS NEO-6M foram de 0,30, 0,71 e 2,33 m, respectivamente (Figura 3.10). De acordo com u-blox AG (2011), o erro circular provável do módulo NEO-6M, obtido em um teste estático por 24 h, foi de 2,5 m. Usando um módulo GNSS de baixo custo semelhante, Silva et al. (2019) obtiveram um desvio máximo de 2,67 m, em um teste dinâmico com velocidade de $1,39 \text{ m s}^{-1}$.

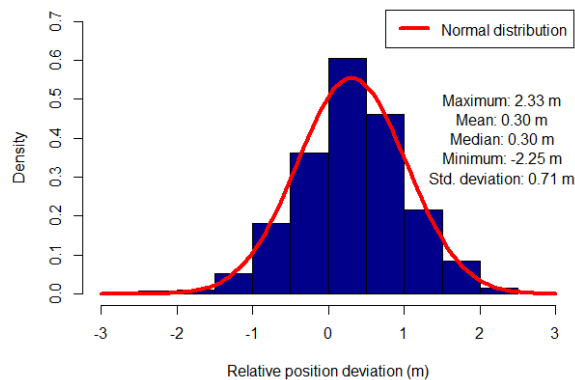


Figura 3.10. Histograma do desvio relativo de posição no módulo NEO-6M GNSS, adotando como referência as posições obtidas pelo receptor Trimble ProXT com correção diferencial pós-processada. Fonte: Coelho et al. (2020).

De acordo com Gomez-Gil et al. (2013), receptores GNSS sem correção diferencial podem ser utilizados em máquinas agrícolas, desde que a aplicação não demande precisão na determinação da posição. Para o controlador desenvolvido, a posição da semeadora foi usada para determinar em qual zona de manejo a máquina estava localizada. Portanto, os desvios na posição influenciavam na identificação do local em que a semeadora entrou ou saiu de uma zona de manejo.

O módulo NEO-6M GNSS utilizado não permitiu a correção diferencial e a posição não foi obtida na fase portadora. Receptores com a capacidade de receber e processar a fase portadora, como o Trimble ProXT, tendem a obter maior precisão de posição (DEY; RAO, 2014). No entanto, eles têm custos de aquisição mais altos. Apesar da menor precisão, o baixo custo de aquisição do módulo NEO-6M GNSS possibilitou o desenvolvimento de um controlador para semeadura à taxa variada acessível aos agricultores de pequena escala.

No ensaio para análise da qualidade de distribuição longitudinal, as plantas com distância inferior a 2,33 m dos limites de cada zona de manejo não foram usadas para a avaliação do espaçamento, devido ao desvio relativo da posição do módulo NEO-6M GNSS. Os espaçamentos de referência (x_{ref}), utilizados para classificar os espaçamentos medidos, foram 0,30; 0,24; 0,20 e 0,17 m para densidades de 40000, 50000, 60000 e 70000 plantas ha^{-1} , respectivamente. Os espaçamentos de referência foram calculados como sendo

o inverso da razão de semeadura (Eq. 3.3), adotando espaçamento entre linhas 0,90m e taxa de germinação de sementes 90%.

A análise de variância indicou que a densidade de plantas influenciou significativamente os índices de qualidade de distribuição, falha e precisão, com uma significância 95% pelo teste F. O efeito da densidade de planta no índice múltiplo não foi significativo. Para o índice de qualidade de distribuição, o valor do índice diminuiu à medida que a densidade de plantas aumentou. Conseqüentemente, foi observado um aumento no número de espaçamentos falhos. Não foi observada diferença significativa no índice de espaçamento múltiplo, com valores obtidos entre 5,92 e 8,8% (tabela 3.2).

Para o índice de precisão, observou-se um aumento de 46,04 para 54,12% nas zonas com 40000 a 70000 plantas ha⁻¹. Esses valores foram superiores a 29%, valor limite para uma boa distribuição, conforme a classificação proposta por Kachman e Smith (1995). O índice de precisão corresponde ao coeficiente de variação no espaçamento entre plantas. Portanto, um maior índice de precisão indicou maior variação no espaçamento entre plantas.

Tabela 3.2. Valores médios dos índices utilizados para avaliar o espaçamento entre plantas em cada zona de manejo. Fonte: Coelho et al. (2020).

Zona de manejo (plantas.ha ⁻¹)	Índice de qualidade de distribuição (%)	Índice de falhos (%)	Índice de múltiplos (%) ^{NS}	Índice de precisão (%)
40000	76,16 a	15,44 a	8,40	46,04 a
50000	71,92 b	21,44 b	6,64	48,72 a
60000	70,78 b	23,30 bc	5,92	47,42 a
70000	65,60 c	25,60 c	8,80	54,12 b

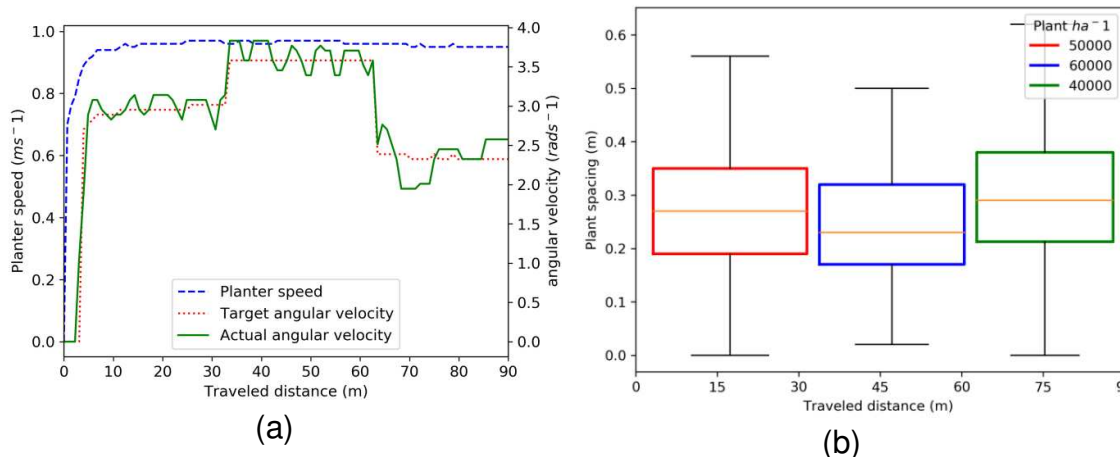
As médias seguidas de letras diferentes dentro de uma coluna são significativamente diferentes a 5% pelo teste Tukey. ns: não significativo a 5% pelo teste F.

O mecanismo dosador de sementes baseado em disco perfurado horizontal, utilizado na semeadora do presente trabalho, tem a característica de ser sensíveis à desuniformidade nas dimensões das sementes. Os furos do disco podem não ser corretamente preenchidos, caso a semente tenha dimensões maiores que os furos (REYNALDO et al., 2016). Nestes casos ocorrem a não distribuição da semente no solo, gerando os espaçamentos classificados como

falhos. Logo, este fator pode ter contribuído consideravelmente para os índices de falhos obtidos no presente trabalho.

A redução da qualidade do índice de distribuição, e o consequente aumento do índice de falhas, à medida que houve o aumento da densidade de plantas também foram obtidos em vários estudos. Estes estudos descreveram ensaios realizados para avaliar a qualidade da distribuição longitudinal, utilizando sementes de diferentes culturas, diferentes modelos de semeadoras com disco perfurado horizontal e diferentes parâmetros de operação (BOZDOĞAN, 2008; MAHL et al., 2008; SANTOS et al., 2011; ÖNAL et al., 2012; CARPES et al. 2017). A redução no índice de qualidade de distribuição é ocasionada por aumento na densidade de plantas ou na velocidade de deslocamento, exigindo que o mecanismo distribuidor de sementes opere em velocidades angulares maiores (FOROUZANMEHR; LOGHAVI, 2012). Maiores velocidades angulares, por sua vez, reduz o tempo disponível para preencher os furos do disco, resultando em maior número de falhas de preenchimento.

Em cada linha de semeadura, o controlador para semeadura à taxa variada foi capaz de identificar as quatro zonas de manejo, medir a velocidade de deslocamento da semeadora e controlar a velocidade angular do motor elétrico (Figura 3.11a, 3.11c, 3.11e e 3.11g). Em cada linha, a distância média percorrida até que o mecanismo dosador entrasse em operação foi de 2,15 m, com um desvio padrão de 0,75 m. Essa distância referiu-se ao tempo necessário para o controlador identificar a entrada na zona de manejo e enviar um sinal ao controlador do motor. Ou seja, a distância média percorrida estava relacionada à precisão na determinação da posição pelo módulo GNSS de baixo custo.



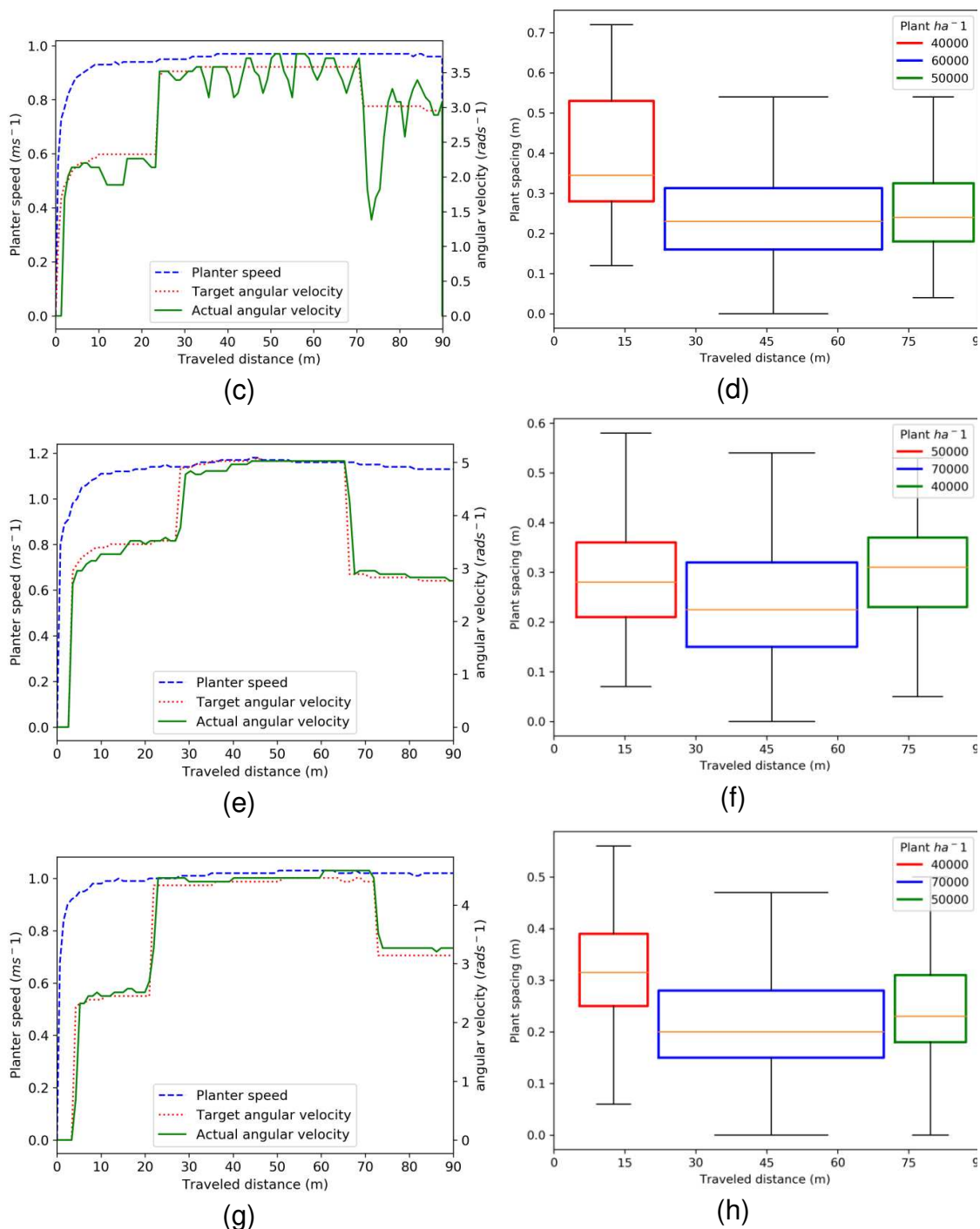


Figura 3.11. Velocidades de deslocamento da semeadora, velocidades angulares real e calculada do motor elétrico, e espaçamento entre planta em função da distância percorrida em quatro linhas de semeadura. (a) e (b) variação de 50000 para 60000 para 40000 plantas ha^{-1} , (c) e (d) variação de 40000 para 60000 para 50000 plantas ha^{-1} , (e) e (f) variação de 50000 para 70000 para 40000 plantas ha^{-1} e (g) e (h) variação de 40000 para 70000 para 50000 plantas ha^{-1} . Fonte: Coelho et al. (2020).

Nas linhas de semeadura em que as densidades de plantas prescritas foram 40000, 50000 e 60000 plantas ha^{-1} (Figura 3.11a e 3.11c), houve uma maior variação na velocidade angular real do motor, comparado à variação de

velocidade nas linhas com densidade 40000, 50000 e 70000 plantas ha^{-1} (Figura 3.11e e 3.11g). De acordo com o arranjo das zonas de manejo (Figura 3.5), essas linhas foram semeadas em momentos diferentes. As flutuações observadas tiveram um comportamento cíclico, cuja frequência é próxima da velocidade angular do disco perfurado. Portanto, uma hipótese é que houve um aumento significativo no torque exigido do motor elétrico em determinadas posições do disco perfurado. O aumento no torque pode estar relacionado a fragmentos de sementes alojados nas frestas do mecanismo dosador. Esta condição foi diferente daquela em que o modelo para o fator de ciclo em função da velocidade angular foi determinado. Nesse caso, controladores que utilizam malha aberta não são eficazes (YU et al., 2019).

Estando a semeadora com velocidade de deslocamento quase constante, o controlador alterou a velocidade angular do motor elétrico em cada zona de manejo, alterando o espaçamento entre plantas (Figura 3.11b, 3.11d, 3.11f, 3.11h). Mesmo nas linhas de semeadura em que não ocorreu flutuação angular da velocidade, foi observada uma desuniformidade no espaçamento. Ou seja, concluiu-se que a flutuação na velocidade angular do motor elétrico não influenciou negativamente a uniformidade de espaçamento.

A análise das densidades reais de plantas obtidas pela contagem de plantas indicou que ocorreu uma diferença nas densidades das quatro zonas de manejo. Essas diferenças foram significativas a 5% pelo teste Tukey. A variação na densidade de plantas foi resultado das alterações da velocidade angular do motor pelo controlador desenvolvido. Para as zonas de manejo com 40000, 60000 e 70000 plantas ha^{-1} , as densidades reais de plantas foram superiores às densidades prescritas no mapa de semeadura. Para a zona com 50000 plantas ha^{-1} , a densidade real de plantas foi menor (tabela 3.4).

Tabela 3.4. Comparação entre as densidades de plantio reais e prescritas nas quatro zonas de manejo. Fonte: Coelho et al. (2020).

Densidade de plantas prescrita no mapa (plantas ha ⁻¹)	Densidade de planta real (plantas ha ⁻¹)	
	Média	Desvio-padrão
40000	44333 a	2694
50000	48222 b	5398
60000	62889 c	3403
70000	71333 d	3948

As médias seguidas de letras diferentes dentro de uma coluna são significativamente diferentes a 5% pelo teste Tukey

Na operação de semeadura, a taxa de germinação de sementes inserida na no controlador foi de 90%. No entanto, o teste de germinação em laboratório, realizado após a operação de semeadura, indicou uma taxa de germinação de 97%. Portanto, para cada zona, o número de sementes com potencial de germinação foi maior que o número calculado pelo controlador. Isso pode explicar a ocorrência de densidades de plantas reais maiores que a densidade prescrita em três das quatro zonas.

O programa de computador desenvolvido para o controlador de semeadura à taxa variada foi nomeado como SemeaPy, e registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob número BR512019002803-1. A fim de possibilitar que o programa de computador se torne aberto ao público, para que seja utilizado e modificado, o seu código fonte foi disponibilizado em <https://github.com/LabDig/SemeaPy5>.

Com base no custo para aquisição dos componentes, que foi de US\$ 337,97, e no desempenho dos testes de campo, o controlador desenvolvido no presente trabalho tem o potencial de ser utilizado por agricultores de pequena escala. Além de semeadoras de manual com uma linha, como a utilizada no presente trabalho, o controlador desenvolvido pode ser utilizado em qualquer semeadora, inclusive aquelas tracionadas por trator. Caso a semeadora contenha duas ou mais linhas de semeadura e o usuário deseje o controle independente de cada linhas de semeadura, pequenas modificações nos circuitos eletrônicos e no programa de computador devem ser implementadas

3.6 Conclusões

- O módulo GNSS NEO-6M de baixo custo um desvio máximo de posição relativa de 2,33 m
- O controlador para semeadura à taxa variada foi eficaz no controle da velocidade angular do motor elétrico, a partir da identificação da densidade de plantas prescrita no mapa de semeadura e na velocidade de deslocamento da semeadora.
- A variação na velocidade angular do motor em cada zona de manejo resultou na variação no espaçamento entre plantas e nas densidades de plantas reais.

3.7 Referências

- ALONSO-GARCIA, S., GOMEZ-GIL, J., ARRIBAS, J. I. Evaluation of the use of low-cost GPS receivers in the autonomous guidance of agricultural tractors. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 9, n.2, p. 377–388, 2011
- BITELLA, G., ROSSI, R., BOCHICCHIO, R., PERNIOLA, M., AMATO, M. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, v. 14, n. 10, p. 19639–19659, 2014
- BOZDOĞAN, A. M. Seeding uniformity for vacuum precision seeders. **Scientia Agricola**, v, 65, n.3, p. 318–322, 2008
- CARPES, D. P., ALONÇO, A. dos S., ROSSATO, F. P., VEIT, A. A., SOUZA, L. B. de, FRANGETTO, T. R. Effect of different conductor tubes on the longitudinal distribution of maize seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n. 9, p. 657–662, 2017
- CAY, A., KOCABIYIK, H., MAY, S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed maize planters Part I: Design and laboratory simulation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.144, n. 2017, p. 71–79, 2018a
- CAY, A., KOCABIYIK, H., MAY, S. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed maize planters Part II: Field performance.

Computers and Electronics in Agriculture, v.145, n. 2017, p11–17, 2018b

CELIK, A., OZTURK, I., WAY, T. R. Effects of various planters on emergence and seed distribution uniformity of sunflower. **Applied Engineering in Agriculture**, v.23, n. 1, p. 57–61, 2007

COELHO, A. L. de F., de QUEIROZ, D. M., VALENTE, D. S. M., PINTO, F. de A. de C. An open-source spatial analysis system for embedded systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 154, n. 1, p. 289–295, 2018

COELHO, A.L.F., QUEIROZ, D.M., VALENTE, D.S.M., PINTO, F.A.C. Development of a variable-rate controller for a low-cost precision planter. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 36, n.2, p..233–243, 2020

DEY, A., RAO, V. M. Study and analysis of differential GNSS and precise point positioning. **Journal of Electrical and Electronics Engineering**, v. 9, n.2, p. 53–59, 2014

EHSANI, M.R., DURAIRAJ, C., WOODS, S.C., SULLIVAN, M. Potential Application of Electrical Conductivity (EC) Map for Variable Rate Seeding. **Agricultural Engineering International: the CIGR journal**. Manuscript IT 05 006. Vol. VII, 2005.

FISHER, D. K., GOULD, P. J. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. **Modern Instrumentation**, v. 1, n.2, p. 8–20, 2012

FISHER, D. K., HUANG, Y. Mobile open-source plant-canopy monitoring system. **Modern Instrumentation**, v. 6, n.1, p.1–13, 2017

FOROUZANMEHR, E., LOGHAVI, M. Design, development and field evaluation of a map-based variable rate granular fertilizer application control system. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v.14, n.4, p.255–261, 2012

GOMEZ-GIL, J., RUIZ-GONZALEZ, R., ALONSO-GARCIA, S., GOMEZ-GIL, F.J. A Kalman Filter Implementation for Precision Improvement in Low-Cost GPS

Positioning of Tractors. **Sensors**. v.13, n.11, p.15307-15323,2013

- KACHMAN, S. D., SMITH, J. A. Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. **Transactions of the ASABE**, v.38, n.2, p.379–387, 1995
- KAMGAR, S., NOEI-KHODABADI, F., SHAFAEI, S. M. Design, development and field assessment of a controlled seed metering unit to be used in grain drills for direct seeding of wheat. **Information Processing in Agriculture**, v.2, n.3–4, p.169–176. 2015
- LI, Y., HE, X. T., TAO, C., ZHANG, D. X., SONG, S., RUI, Z., MANTAO, W. Development of mechatronic driving system for seed meters equipped on conventional precision maize planter. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.8, n. 4, p.1–9, 2015
- LOON, J. VAN, SPERATTI, A. B. Precision for smallholder farmers: a small-scale-tailored variable rate fertilizer application kit. **Agriculture**, v.8, n.4, p.1–14, 2018
- MAHL, D., FURLANI, C. E. A., GAMERO, C. A. Efficiency of pneumatic and horizontal perforated disk meter mechanism in maize no-tillage seeders in soil with different mobilization reports. **Revista Engenharia Agricola**, v.28, n. 3, p. 535–542, 2008
- MAIA, R. F.; NETTO, I.; TRAN, A. L. H. Precision agriculture using remote monitoring systems in Brazil, **2017 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)**, San Jose, CA, 2017, pp. 1-6,
- MAISIRI, N., SENZANJE, A., ROCKSTROM, J., TWOMLOW, S. J. On farm evaluation of the effect of low-cost drip irrigation on water and crop productivity compared to conventional surface irrigation system. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.30, n. 11-16, p.783–791, 2005
- MESAS-CARRASCOSA, F. J., VERDÚ SANTANO, D., MEROÑO, J. E., SÁNCHEZ, M., GARCÍA-FERRER, A. Open source hardware to monitor environmental parameters in precision agriculture. **Biosystems Engineering**, n. 137, p.73–83,2015

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Regra de Análises de Sementes**. Brasília. 2009

MOWO, J.G., JANSSEN, B.H., OENEMA, O., GERMAN, L.A., MREMA, J.P., SHEMDOE, R.S. Soil fertility evaluation and management by smallholder farmer communities in northern Tanzania, **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.116, n. 1-2, p. 47-59, 2006.

ÖNAL, İ., DEĞİRMENCİOĞLU, A., YAZGI, A. An evaluation of seed spacing accuracy of a vacuum type precision metering unit based on theoretical considerations and experiment. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 36, n. 1, p. 133–144, 2012

QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. 2009. Disponível em: <http://qgis.org>

QUEIROZ, D. M.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K.; SANTOS, E. D. Development and test of a low-cost portable soil apparent electrical conductivity sensor using a BeagleBone Black. In: 2017 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017. p. 1.

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria. 2014, Disponível em: <http://www.r-project.org/>

RAYNA, T., STRIUKOVA, L. Large-scale open innovation: Open source vs. patent pools. **International Journal of Technology Management**, v.52, n. 3–4, p. 477–496, 2010

REYNALDO, ÉTORE F.; MACHADO, T. M.; TAUBINGER, L.; QUADROS, D. DE. Influência da velocidade de deslocamento na distribuição de sementes e produtividade de soja. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 24, n. 1, p. 63-67, 2016

SANTOS, A. J. M., GAMERO, C. A., OLIVEIRA, R. B., VILLEN, A. C. Spatial analysis of longitudinal distribution of maize seeds in a precision grain drill. **Bioscience Journal**, v.27, n. 1, p. 16–23, 2011.

- SILVA, T. M. D. A., MAYRINK, G. D. O., VALENTE, D. S. M., QUEIROZ, D. M. Integration of a low-cost global navigation satellite system to a single-board computer using Kalman filtering. **Engenharia Agricola**, v.39, n. 3, p. 323–330, 2019
- STOMBAUGH, T.S., SAMA, M.P., ZANDONADI, R.S., SHEARER, S.A., KOOSTRA, B.K. Standardized Evaluation of Dynamic GPS Performance. **ASABE Paper No. 084728**.: ASABE, 2008
- U-BLOX AG. (2011). **NEO-6 Data Sheet**. Thalwil, Switzerland: u-blox AG. 2011. Disponível em: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf
- VAN LOON, J., SPERATTI, A. B., GOVAERTS, B. Precision for smallholder Farmers: A Small-Scale-Tailored Variable Rate Fertilizer Application Kit. **Agriculture**, v.8, n. 4, p.1-14, 2018
- YU, H., DING, Y., LIU, Z., FU, X., DOU, X., YANG, C. Development and Evaluation of a Calibrating System for the Application Rate Control of a Seed-Fertilizer Drill Machine with Fluted Rollers. **Applied Sciences**, v.9, n.24, p. 5434-5449, 2019.

4 SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE CÓDIGO ABERTO PARA UMA SEMEADORA MANUAL DE PRECISÃO

4.1 Resumo

O monitoramento remoto das operações agrícolas é uma importante ferramenta para a gestão da fazenda. Com os dados obtidos, pode-se tomar decisões sobre o planejamento e a execução das operações agrícolas. Recentemente, essa ferramenta tem sido adotada apenas por agricultores de média e grande escala, principalmente, devido ao custo da infraestrutura de conectividade necessária. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema remoto de código aberto para monitoramento de operações de semeadura, destinado aos agricultores de pequena escala. Um módulo GSM (Sistema Global para Comunicação Móveis) de baixo custo foi acoplado a um computador de placa única utilizado no controlador de semeadura à taxa variada. O controlador com o sistema de monitoramento foi instalado em uma semeadora manual adaptada para semeadura à taxa variada. Os dados coletados pelo controlador foram enviados para um servidor, utilizando o serviço de internet móvel disponibilizado pela operadora de celular. Um ensaio para determinação do tempo de resposta do servidor foi realizado, com a semeadora manual de precisão estacionada em uma área com cobertura pela operadora de celular. Após o ensaio, o sistema de monitoramento remoto foi utilizado em uma operação de semeadura. O tempo de resposta médio do servidor foi 3,82 s. O monitoramento remoto possibilitou acompanhar a capacidade operacional instantânea, a posição atual da semeadora e a identificação de falhas durante a operação. O custo para integração do módulo GSM foi US\$ 8,99 e o custo final do controlador de aplicação à taxa variada com sistema de monitoramento remoto foi de US\$346,96.

Palavras-chave: Internet das coisas. Agricultura digital. Aplicação à taxa variada. Gerenciamento de máquinas agrícolas.

4.2 Abstract:

Remote monitoring of agricultural operations is an important tool for acquiring data of these operations. With the obtained data, it is possible to make decisions

regarding the planning and management of agricultural operations. Recently, this tool has been adopted only by medium and large-scale farmers, especially due to the cost of the connectivity infrastructure required. Thus, the present study aims to develop a low-cost remote monitoring system for monitoring variable-rate seeding, intended for smallholder farmers. A low-cost GSM (Global System for Mobile Communications) module was coupled to a single-board computer used in the controller. The controller with the monitoring system was installed in a manual seeder adapted for variable-rate seeding. Data collected by the controller were sent to a server, using the mobile internet service provided by the mobile phone operator. A test was conducted to determine the response time of the server, with the precision manual planter parked in an area covered by the mobile phone operator. After the test, the remote monitoring system was used in a seeding operation. The average response time of the server was 3.82 s. Remote monitoring made it possible to monitor instantaneous operational capacity, current position of the planter, and the occurrence of failures during operation. The cost for GSM module integration was US\$ 8.99 and the final cost of the controller for variable-rate application with remote monitoring system was US\$ 346.96.

Key words: Internet of things. Digital farming. Variable-rate application. Farm machinery management.

4.3 Introdução

De 2010 até o ano 2050, estima-se que a produção agrícola mundial precisará aumentar entre 70 e 110%, a fim de produzir alimento para toda a população e para a produção animal (WU et al., 2018). Além da quantidade, a qualidade dos alimentos produzidos e o uso racional de recursos, como terra, água, fertilizantes e combustíveis fósseis, devem ser considerados pelos agricultores durante o planejamento das operações. Ou seja, as operações devem ser planejadas e executadas de forma a garantir um sistema agrícola eficiente (NAVULUR et al., 2017).

O monitoramento remoto das operações agrícolas permite acompanhar a capacidade operacional, posição atual das máquinas, consumo de combustível,

existência de falhas nos sistemas da máquina, entre outros (TZOUNIS et al., 2017). Com os dados obtidos, o agricultor pode planejar a alocação de operadores e máquinas, planejar as operações futuras, instruir o operador a alterar parâmetros operacionais ou acionar os serviços suporte técnico (KALOXYLOS et al., 2012).

O monitoramento remoto permite obter informações de todo o sistema agrícola em tempo real, possibilitando aos agricultores e gestores a tomada de decisões rápidas e precisas (FOUNTAS et al., 2015; ELIJAH et al., 2018). Além da supervisão das máquinas agrícolas, outras aplicações dos sistemas de monitoramento remoto na agricultura estão relacionadas ao solo, plantas, clima em ambientes fechados e abertos e ao rastreamento dos alimentos (BITELLA et al., 2014; NIKOLIDAKIS et al., 2015; NISHINA, 2015; MUANGPRATHUB et al., 2019).

No monitoramento remoto, os dados coletados por meio dos sensores precisam ser transmitidos para um servidor. O servidor é responsável pelo armazenamento e a disponibilização dos dados em formato que facilite as análises e as tomadas de decisões, como gráficos, mapas e tabelas. Para a transmissão, têm sido utilizadas diversas tecnologias de comunicação sem fio, como Wifi (IEEE 802.11), ZigBee (IEEE 802.15.4), Bluetooth (IEEE 802.15.1), LoRaWAN (Long Range Wide Area Networking) e GSM (*Global System for Mobile Communications*) (OJHA et al., 2015; TZOUNIS et al., 2017). Dentre estas, a tecnologia GSM, baseada em telefones celulares, se destaca em relação às demais devido à cobertura de amplas áreas (CASTILLO-RUIZ et al., 2015).

Recentemente, diversas empresas vêm oferecendo serviços de monitoramento remoto, principalmente os fabricantes de máquinas agrícolas. Exemplos são o AgCommand® da AGCO®, o JDLink® da John Deere®, o Telematics® da Claas®, o Slingshot® da Raven®, o Connected Farm® da Trimble® e o ClimateView® e FieldView® da Climate Corporation® (OKSANEN et al., 2016). Contudo, os equipamentos e programas de computador utilizados nos sistemas de monitoramento remoto comerciais são proprietários. Isto é, são compatíveis apenas com as máquinas do próprio fabricante ou demandam recursos existentes somente em máquinas de grande porte, como os conectores

ISOBUS (padrão ISO 11783). Estes fatores, associados aos custos para utilização dos serviços, podem tornar os sistemas de monitoramento remoto comerciais inacessíveis aos agricultores de pequena escala.

A importância do monitoramento remoto das operações agrícolas tem motivado o desenvolvimento de sistemas, quando estes não estão acessíveis a um determinado grupo de produtores (CASTILLO-RUIZ et al., 2015). Assim, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de monitoramento de código aberto para um controlador de baixo custo, destinado à semeadura à taxa variada. O público alvo do controlador de aplicação à taxa variada com o sistema de monitoramento são os agricultores de pequena escala.

4.4 Material e métodos

O sistema de monitoramento remoto foi desenvolvido e integrado em um controlador, com código e componentes abertos, para a semeadura à taxa variada. O controlador foi instalado em uma semeadora manual Knapik (Knapik Industrial Mecânica, Brasil). Esta semeadora foi modificada para aplicação à taxa variada, utilizando-se motores elétricos para o acionamento dos mecanismos distribuidores de sementes. O sistema de monitoramento foi desenvolvido contendo três componentes: semeadora com controlador, servidor e aplicativo (Figura 4.1). O controlador foi responsável por coletar e enviar os dados da semeadora para o servidor. O servidor foi responsável por armazenar os dados. O aplicativo tinha a função de apresentar os dados armazenados ao usuário, em formato de mapas e formulários.

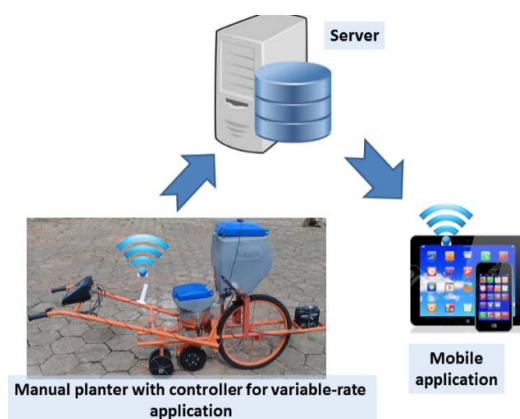


Figura 4.1 - Visão geral do sistema de monitoramento remoto, contendo três componentes: semeadora com controlador, servidor e aplicativo.

O controlador para sementeira à taxa variada foi composto por computador de placa única Beaglebone Black (BeagleBoard.org Foundation, EUA), uma bateria 12 V, dois reguladores de tensão, um motor elétrico 12 V com controlador BTS7960, um módulo GNSS (sistema de navegação global por satélites) de baixo custo U-Blox NEO-6M (U-Blox AG, Suíça), uma tela sensível ao toque, duas chaves ópticas e um Arduino ProMini (Figura 4.2). Para o envio de dados para o servidor, um módulo GSM SIM800L (SIM Com Wirelles Solution Ltda, China) foi adicionado ao controlador, sendo este conectado ao Beaglebone Black (BBB).

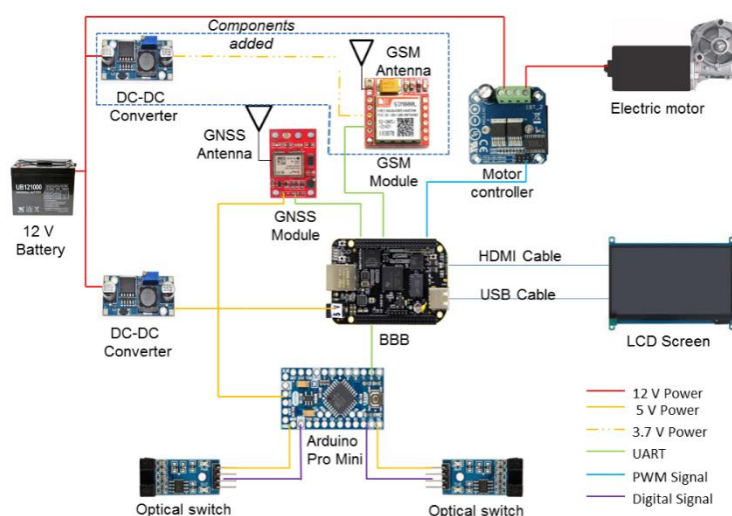


Figura 4.2 – Componentes do controlador para distribuição de sementes à taxa variada com a inclusão do módulo GSM. GSM: Global Service Mobile. GNSS: Global Navigation Satellite System. BBB: Beaglebone Black. UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. PWM: Pulse Width Modulation.

A bateria 12 V foi utilizada para fornecer energia elétrica aos componentes. O motor elétrico foi utilizado para acionar o mecanismo distribuidor de sementes. A velocidade angular deste motor foi ajustada pelo controlador BTS7960 (HiLetgo Technology Co, China) a partir de sinal PWM (Modulação pela Largura de Pulso) emitido pelo BBB. O módulo GNSS ublox NEO-6M foi utilizado para determinar a posição da sementeira, permitindo a aplicação à taxa variada com base em mapa. A tela sensível ao toque foi utilizada para mostrar a interface gráfica de operação do controlador. As chaves ópticas, acopladas ao Arduino ProMini, foram utilizadas para medir a velocidade de deslocamento da sementeira e a velocidade angular real do distribuidor de sementes.

O módulo GSM, contendo um cartão SIM (*Subscriber Identity Module*) permitiu enviar dados da operação de semeadura utilizando o serviço de Internet móvel com tecnologia GSM. Para a comunicação entre o módulo GSM e o BBB utilizou-se o protocolo de comunicação UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*). O programa de computador desenvolvido para o controlador, usando linguagem Python 3.6, foi modificado (fluxograma na Figura 4.3). Linhas de código foram adicionadas para as funções relacionadas ao sistema de monitoramento remoto, como configurar o serviço de internet móvel do módulo GSM e enviar os dados coletados para o servidor em intervalos pré-definidos.

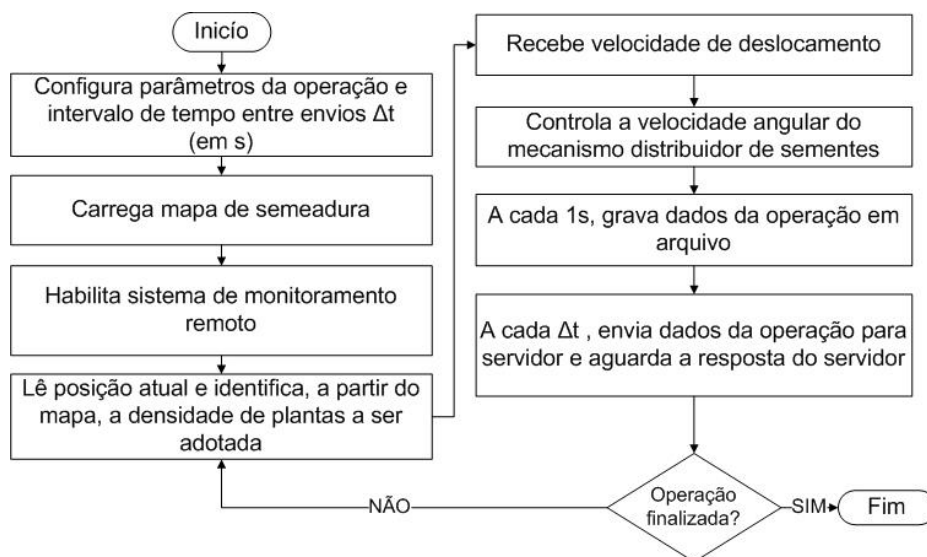


Figura 4.3 – Fluxograma do programa de computador desenvolvido para o controlador de aplicação à taxa variada, com as funções adicionadas para sistema de monitoramento remoto.

Os dados foram enviados ao servidor na forma de endereço web, utilizando o método GET (FIELDING; RESCHKE, 2014) e o protocolo TCP (*Transmission Control Protocol*). O conjunto de dados enviados ao servidor foi composto pelas variáveis: número identificador, data e hora, nome da máquina e do talhão, coordenadas geodésicas, em graus, coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), em m, velocidade de deslocamento da máquina, em $m\ s^{-1}$, tempo de operação para o talhão, em h, área semeada, em ha, capacidade operacional média, em $ha\ h^{-1}$, a densidade de plantas adotado na semeadura, em plantas ha^{-1} e a velocidade angular do motor de acionamento do distribuidor de sementes, em $rad\ s^{-1}$. A mensagem HTTP Status Code (FIELDING; RESCHKE,

2014) eram recebidos pelo módulo GSM a cada envio do conjunto de dados. A análise do HTTP Status Code permitiu identificar o sucesso ou a falha no armazenamento dos dados no servidor.

O programa de computador foi desenvolvido para enviar dados em intervalos de tempo regulares de acordo com a configuração estabelecida pelo usuário. Contudo, atrasos no recebimento da resposta do servidor podiam ocorrer, causando irregularidades no intervalo de tempo entre os envios. Para armazenamento dos dados utilizou-se um banco de dados com tecnologia SQL (*Structured Query Language*), hospedado em um servidor.

Para a visualização dos dados armazenados no servidor, um aplicativo para dispositivos móveis com sistema operacional Android foi desenvolvido. Para o desenvolvimento utilizou-se a plataforma *MIT App Inventor* (Massachusetts Institute of Technology, Estados Unidos). A leitura dos dados armazenados no banco de dados foi realizada por intermédio de programa em linguagem PHP (Hypertext Preprocessor). Esse programa foi inserido no mesmo servidor do banco de dados, sendo executado sempre que o aplicativo solicitava uma requisição.

No aplicativo, os dados das variáveis velocidade de deslocamento, da densidade de plantas e da velocidade angular do mecanismo distribuidor de sementes foram apresentados por meio de mapas (Figura 4.4). Estes mapas foram gerados utilizando a API (Application Programming Interface) Bing Maps (Microsoft Corporation, Estados Unidos). Para cada variável, os seus valores e as respectivas coordenadas geodésicas foram representados como um ponto, inserido sobre a imagem de satélite disponibilizada pela API.

Ao acessar o aplicativo, o usuário pode selecionar o talhão e a variável a ser monitorado e/ou analisado. Caso duas ou mais máquinas fossem usadas em um mesmo talhão, as informações de cada semeadora podiam ser apresentadas separadas ou em conjunto. Além dos mapas de velocidade de deslocamento, densidade de plantas e velocidade angular do motor de acionamento do mecanismo distribuidor de sementes, um marcador foi apresentado indicou a posição atual da(s) máquina(s) com as seguintes informações : nome, a

velocidade instantânea, capacidade operacional média, o tempo de operação para o talhão e a área semeada.

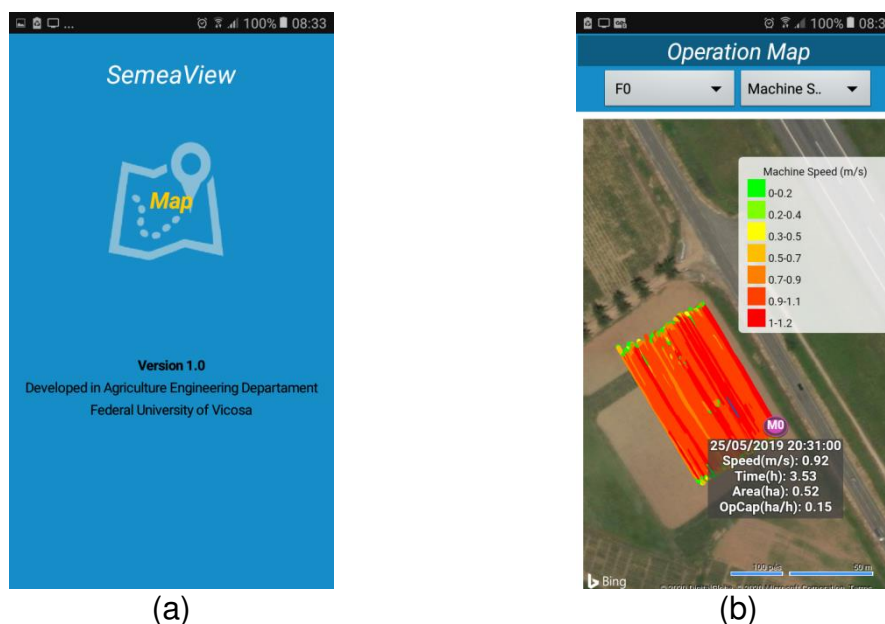


Figura 4.4 – Telas do aplicativo desenvolvido para monitoramento remoto da semeadora. (a) tela inicial (b) tela de apresentação dos mapas

Ensaio para determinação do tempo de resposta do servidor

O ensaio para determinação do tempo de resposta do servidor foi realizado para identificar o intervalo de tempo entre o envio do dado e o recebido do HTTP Status Code. Para o ensaio, a semeadora foi mantida estacionada em uma área aberta, a aproximadamente 2,5 km das torres de telefonia celular. O ensaio consistiu em enviar 2300 conjuntos de dados, compostos pelas variáveis monitoradas. O ensaio foi repetido em cinco dias consecutivos. A cada envio registrou-se o HTTP Status Code e o tempo de resposta. Imediatamente após o recebimento da resposta do servidor um novo conjunto de dados era enviado. O HTTP Status Code foi utilizado para determinar o percentual de falhas no armazenamento, calculado pela razão entre o número de falhas no envio e o número total de conjuntos envios. A análise dos tempos de resposta foi utilizada para a seleção do intervalo de tempo entre envios, garantindo a regularidade entre os instantes de envio de dados.

Ensaio em campo

O sistema de monitoramento remoto foi utilizado para monitorar a operação de semeadura de milho, em uma área de 0,52 ha. No controlador da semeadora, foi inserido um mapa de semeadura com quatro zonas de manejos e densidades 40.000, 50.000, 60.000 e 70.000 plantas ha⁻¹. A área era localizada próxima à cidade, distante aproximadamente 2,0 km das torres de telefonia celular. Durante a semeadura os parâmetros da operação foram armazenados na memória do BBB, a cada 1,0 s. O intervalo de tempo entre envio dos dados utilizado foi àquele selecionado no ensaio.

A cada envio registrou-se o HTTP Status Code, utilizado para classificar os envios em sucesso ou com falha, e o tempo de resposta do servidor. Os envios com sucesso foram aqueles em que se constatou o armazenamento do dado no servidor. Os envios classificados como falhos foram aqueles em que o HTTP Status Code indicou falha no envio ou armazenamento dos dados. A partir da frequência de envios com sucesso e falhos os respectivos índices foram calculados, utilizando as equações (4.1) e (4.2).

$$p_s = 100 \cdot \frac{n_s}{n} \quad (4.1)$$

$$p_f = 100 \cdot \frac{n_f}{n} \quad (4.2)$$

em que p_s e p_f são os percentuais de envio com sucesso e falhos, em %, respectivamente, n_s e n_f são o número de envios classificados como sucesso e falhos, respectivamente, e n é o número total de envios.

Após a operação de semeadura, os mapas de velocidade de deslocamento e os dados apresentados pelo aplicativo foram utilizados para analisar a eficiência da operação, comparando-se a capacidade operacional efetiva e a teórica. Após a germinação das sementes, imagens aéreas foram capturadas utilizando uma câmera sensível ao espectro eletromagnético do visível com resolução 16 MP acoplada a um veículo aéreo não-tripulado (VANT) DJI Phantom3. As imagens foram capturadas mantendo-se o VANT à aproximadamente 30 m do solo. As imagens aéreas, o mapa de densidade de plantas e de velocidade angular do mecanismo distribuidor de sementes foram utilizados para avaliar falhas no mecanismo durante a operação.

4.5 Resultados e discussão

No ensaio para determinação do tempo de resposta, o percentual médio de falha no armazenamento foi 0,08%, com valores entre 0,0 e 0,28%. O tempo de resposta médio foi 3,82 s (Tabela 4.1). Observou-se que ao adotar intervalo de tempo entre envios superior a 3,99 s, correspondente ao terceiro quartil, a regularidade entre os instantes de tempo entre dois envios consecutivos estaria presente em, pelo menos, 75% dos dados armazenados no servidor.

Tabela 4.1– Estatística descritiva dos tempos de resposta do servidor, utilizando o sistema de monitoramento remoto.

Tempos resposta	Valor (s)
Mínimo	1,77
Primeiro Quartil	2,82
Mediana	3,24
Média	3,82
Terceiro Quartil	3,99
Máximo	111,51

Ao utilizar o protocolo TCP, foi necessário o recebimento da resposta do servidor antes que uma nova solicitação de envio fosse executada (LEE et al., 2010). No sistema de monitoramento remoto, tempo de resposta superior ao intervalo entre envios estabelecido implicaram na indisponibilidade do módulo SIM800L para enviar um novo conjunto de dado. Segundo Hunaiti et al. (2005), um dos fatores que afetam o tempo de resposta é a velocidade de transmissão de dados, que por sua vez, está relacionada com número de usuários conectados à rede GSM. Isto é, uma rede com maior número de usuários tende a apresentar maiores tempos de resposta.

Para o módulo GSM SIM800L, Simcom (2015) reportou tempo de resposta de aproximadamente 5 s. Este valor pode variar em função da velocidade de transferência de dados do serviço de Internet e do tamanho da página acessada. Oksanen et al. (2016) relataram que os intervalos entre envios de dados típicos para sistemas de monitoramento de máquinas agrícolas são 10 a 15 s. Ao desenvolver um sistema de monitoramento para colhedoras de oliva, CASTILLO-RUIZ et al. (2015) utilizaram um módulo GSM para transmitir dados a cada 4 s. Assim, observou-se que o módulo GSM SIM800L, operando com

envios de dados a cada 4s, é aplicável no desenvolvimento de sistemas de monitoramento remoto de operações agrícolas.

No ensaio em campo, o controlador da semeadora permaneceu em operação durante 3,53 h, resultando no armazenamento de 12835 dados na memória interna do BBB. Utilizando o sistema de monitoramento remoto, os dados foram enviados ao servidor a cada 4 s, sendo constatado o armazenamento de 3075 dados. Os tempos de resposta do servidor mínimo, médio, mediano e máximo foram 2,05; 3,65; 3,33 e 111,52, respectivamente.

A análise do HTTP Status Code indicou que houve 3093 tentativas de envio de dado, resultando em 3075 (99,4%) envios com sucesso e 18 (0,6%) falhas de envio. Durante a operação de semeadura, quando o tempo de resposta do servidor foi superior a 4 s ocorreu a indisponibilidade do módulo GSM para o envio do dado seguinte. A fração de dados perdidos foi considerada aceitável, visto que não impossibilitaram a geração dos mapas de operação e a sua análise.

Considerando velocidade de deslocamento $1,0 \text{ m s}^{-1}$ e espaçamento entre linhas 0,75 m, a capacidade operacional teórica da operação de semeadura seria $0,27 \text{ ha h}^{-1}$. A capacidade operacional efetiva foi $0,15 \text{ ha h}^{-1}$, resultando em uma eficiência de campo de 54,5%. Este valor é próximo ao limite inferior da faixa de referência (50 a 75%) e inferior ao valor típico (65%) apresentado em ASABE (2011). A baixa eficiência da operação foi devido às pausas durante as manobras, e variações na velocidade de deslocamento durante a operação (Figura 4.5). As pausas estão relacionadas ao elevado esforço físico demandado pela semeadora, já que a máquina utilizou tração humana.

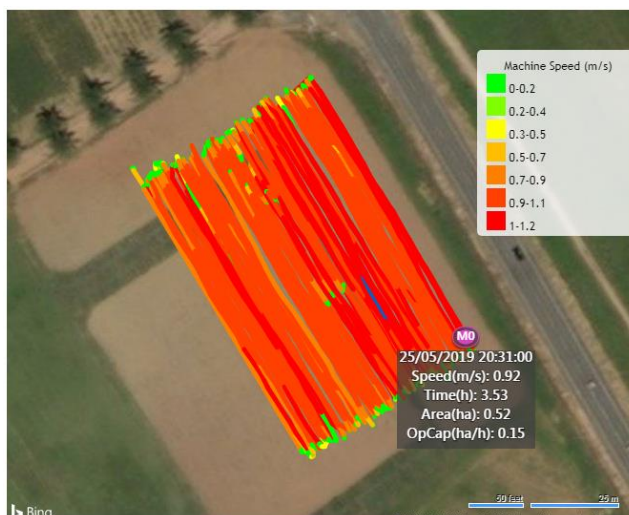
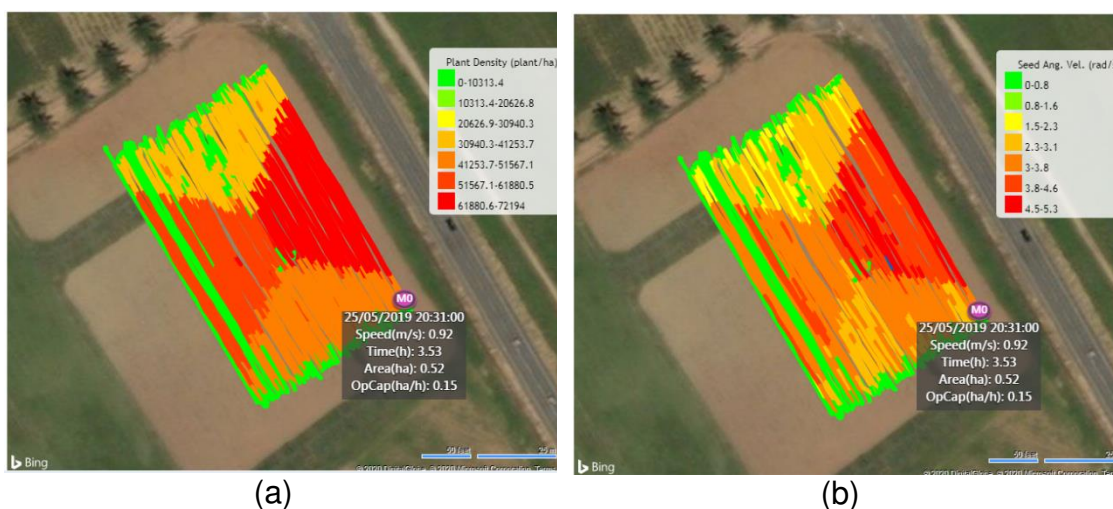


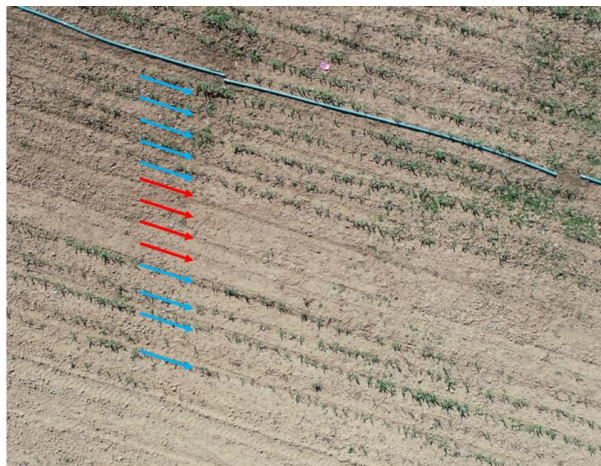
Figura 4.5. Mapa de velocidade de deslocamento da semeadura apresentado pelo aplicativo, com informações instantâneas da operação.

No mapa de densidade de plantas observou-se falhas na semeadura, representadas por linhas de semeadura com densidade de plantas entre 0 e 10313 plantas ha^{-1} , situadas à esquerda do mapa (Figura 4.6a). Analisando o mapa de velocidade angular do mecanismo distribuidor (Figura 4.6b), observou-se que estas falhas foram ocasionadas pelo não funcionamento do mecanismo distribuidor de sementes. Nesta região, observou-se velocidades angulares entre 0 e 0,8 rad s^{-1} , sendo que, durante o funcionamento normal, as velocidades angulares foram superiores à 1,5 rad s^{-1} . As imagens aéreas capturadas após a germinação das sementes comprovaram a ausência de plantas na referida região do talhão (Figura 4.6c).



(a)

(b)



(c)

Figura 4.6. Análise da operação de semeadura utilizando o controlador com o sistema de monitoramento (a) mapa de densidade de plantas. (b) mapa de velocidade angular do mecanismo distribuidor. (c) imagem aérea capturada após a germinação das sementes, indicando linhas com semeadura normal (azul) e linhas com falhas (vermelho).

Em ambas as análises, da capacidade operacional e na identificação de falhas do mecanismo distribuidor de sementes, observou-se a aplicabilidade do sistema de monitoramento remoto para a supervisão das operações agrícolas. Os dados disponibilizados no aplicativo permitiram ao agricultor supervisionar, remotamente e em tempo real, o operador e a máquina alocada para a operações (OKSANEN et al., 2016).

A partir desta supervisão, foi possível a detecção de falhas, a avaliação de desempenho da máquina agrícola e do operador, bem como o acompanhamento da posição da máquina no talhão. Para o agricultor, a identificação precoce de falhas e o acompanhamento da capacidade operacional dos operadores e das máquinas permitem aumentar a qualidade das operações e reduzir os custos de produção (KALOXYLOS et al., 2012).

O sistema de monitoramento foi desenvolvido com custo total US\$ 346.96, sendo US\$ 337.97 referente aos componentes do controlador para semeadura à taxa variada e US\$ 8,99 referente ao módulo SIM800L. O aplicativo, nomeado como SemeaView, e os códigos desenvolvidos para serem executados no servidor foram registrados no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob número BR512019002804-0. Para garantir que o sistema remoto

desenvolvido se torne público e livre para utilização e modificação, os códigos fonte foram disponibilizados em <https://github.com/LabDig/SemeaView>.

O baixo custo do controlador e do sistema de monitoramento remoto bem como a disponibilização dos código fonte possibilita que tais equipamentos sejam empregados nas semeadoras utilizadas por agricultores de pequena escala. A partir aumento da eficiência das operações de semeadura possibilita-se a otimização do sistema produtivo. Conseqüentemente, tem-se o desenvolvimento econômico destas classes de produtores, devido a possibilidade de aumento dos seus lucros.

4.6 Conclusões

- O tempo médio de envio e recebimento da resposta do servidor foi 3,82 s.
- A análise dos dados disponibilizados pelo aplicativo permitiu identificar baixa eficiência de campo e falha no mecanismo distribuidor de sementes.

4.7 Referências

- ASABE Standards. ASABE D497.7 Agricultural machinery management data. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, 2011.
- BITELLA, G.; ROSSI, R.; BOCHICCHIO, R.; PERNIOLA, M.; AMATO, M. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, v. 14, n. 10, p. 19639–19659, 2014.
- CASTILLO-RUIZ, F. J.; PÉREZ-RUIZ, M.; BLANCO-ROLDÁN, G. L.; GIL-RIBES, J. A.; AGÜERA, J. Development of a telemetry and Yield-Mapping system of olive harvester. **Sensors**, v. 15, n. 2, p. 4001–4018, 2015.
- ELIJAH, O., RAHMAN, T. A., ORIKUMHI, I., LEOW, C. Y., HINDIA, M. N. An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges, **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 5, p.

3758-3773, 2018

FIELDING, R. E.; RESCHKE, J. E. **Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Semantics and Content**, 2014.

FOUNTAS, S.; SORENSEN, C. G.; TSIROPOULOS, Z.; CAVALARIS, C.; LIAKOS, V.; GEMTOS, T. Farm machinery management information system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 110, p. 131–138, 2015.

HUNAITI, Z.; GARAJ, V.; BALACHANDRAN, W.; CECELJA, F. An assessment of 3G link in a navigation system for visually impaired pedestrians. **Proceedings - 15th International Conference on Electronics, Communications and Computers, CONIELECOMP 2005**, v. 2005, p. 7–9, 2005.

KALOXYLOS, A.; EIGENMANN, R.; TEYE, F.; POLITOPOULOU, Z.; WOLFERT, S.; SHRANK, C.; DILLINGER, M.; LAMPROPOULOU, I.; ANTONIOU, E.; PESONEN, L.; NICOLE, H.; THOMAS, F.; ALONISTIOTI, N.; KORMENTZAS, G. Farm management systems and the Future Internet era. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 89, p. 130–144, 2012.

LEE, D. J.; CARPENTER, B. E.; BROWNLEE, N. Observations of UDP to TCP ratio and port numbers. **5th International Conference on Internet Monitoring and Protection, ICIMP 2010**, p. 99–104, 2010.

MUANGPRATHUB, J.; BOONNAM, N.; KAJORNKASIRAT, S.; LEKBANGPONG, N.; WANICHSOMBAT, A.; NILLAOR, P. IoT and agriculture data analysis for smart farm. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 156, p. 467–474, 2019.

NAVULUR, S.; NAVULUR, S.; AS, C. S. S.; MN, G. P. Agricultural Management through Wireless Sensors and Internet of Things. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, v. 7, n. 6, p. 3492, 2017.

NIKOLIDAKIS, S. A.; KANDRIS, D.; VERGADOS, D. D.; DOULIGERIS, C.

Energy efficient automated control of irrigation in agriculture by using wireless sensor networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.113, p.154-163, 2015.

NISHINA, H. Development of Speaking Plant Approach Technique for Intelligent Greenhouse. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 3, p. 9–13, 2015.

OJHA, T.; MISRA, S.; RAGHUWANSHI, N. S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 66–84, 2015.

OKSANEN, T.; LINKOLEHTO, R.; SEILONEN, I. Adapting an industrial automation protocol to remote monitoring of mobile agricultural machinery: a combine harvester with IoT. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 16, p. 127–131, 2016.

SIMCOM. **SIM800 Series AT Command Manual** **SIM800 Series AT Command Manual**. Disponível em: http://www.adafruit.com/datasheets/sim800_series_at_command_manual_v1.01.pdf.

TZOUNIS, A.; KATSOULAS, N.; BARTZANAS, T.; KITTAS, C. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems Engineering**, v. 164, p. 31–48, 2017.

WU, W., YU, Q., YOU, L., CHEN, K., TANG, H., LIU, J. Global cropping intensity gaps: Increasing food production without cropland expansion. **Land Use Policy**, v. 76, n.1, p.515–525, 2018

5 CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho resultou em três sistemas de código aberto e de baixo custo para auxiliar no manejo das lavouras utilizando a agricultura de precisão. A partir da disponibilização dos códigos fontes para uso e modificação, torna-se possível que os usuários interessados desenvolvam os seus próprios sistemas para agricultura de precisão. Assim, o presente trabalho contribui para que estes sistemas se tornem mais acessíveis aos agricultores, especialmente os agricultores de pequena escala.

No segundo capítulo, foi apresentado o desenvolvimento de um sistema embarcado com programa de computador capaz de realizar filtragem, geração de mapa interpolado e geração de mapa de classes, ainda em campo, a partir de dados adquiridos com sensores. No estudo de caso, foi utilizado dados de produtividade de um talhão de soja. Diferenças foram encontradas nos mapas interpolados, mapa de desvio padrão do erro de interpolação e mapa de classes gerado com dados brutos e filtrados. Tais diferenças confirmaram a importância da limpeza de dados antes da sua utilização em tomadas de decisão relacionados ao manejo das lavouras.

No terceiro capítulo foi desenvolvido um controlador de aplicação à taxa variada para uma semeadora de precisão. O computador de placa única Beaglebone Black executando um programa desenvolvido em linguagem Python foi utilizado. As funções executadas pelo programa foram ler o mapa de semeadura, obter a informação da posição atual da semeadora, determinar a velocidade de deslocamento da semeadora e controlar a velocidade angular do motor elétrico que acionou o mecanismo distribuidor de sementes. Um módulo GNSS de baixo custo foi usado para obter a posição atual da semeadora. A variação na velocidade angular do motor em cada zona de manejo resultou em mudanças da densidade de plantas real, conforme estabelecido no mapa de semeadura.

Referente ao controlador para semeadura a taxa variada, trabalho futuro pode ser desenvolvido com o objetivo de substituir o módulo GNSS ublox NEO-6M por módulo GNSS de baixo custo que permite correção diferencial em tempo

real (do inglês *Real-time Kinematic*, RTK) de baixo custo. Essa substituição tem objetivo de aumentar a precisão na determinação da posição da semeadora. O desenvolvimento e incorporação de um sensor de detecção de sementes para alerta de falhas também é uma proposta de trabalho futuro e que permitirá melhorar o desempenho do controlador.

Por fim, no quarto capítulo foi desenvolvido um sistema de monitoramento remoto para um semeador manual com controlador para aplicação à taxa variada. Um módulo GSM de baixo custo foi acoplado ao controlador desenvolvido no terceiro capítulo. Este módulo permitiu o envio dos dados da operação para o servidor utilizando serviço de internet disponibilizado pela operadora de telefonia celular. O sistema desenvolvido permitiu supervisionar, remotamente e em tempo real, uma operação de semeadura. A análise dos dados disponibilizados pelo aplicativo permitiu identificar a baixa eficiência de campo e uma falha que ocorreu no mecanismo distribuidor de sementes durante a semeadura.