UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Desenvolvimento de um mecanismo dosador de fertilizante granulado para aplicação em taxa variável

Raieni Rafaela da Cunha
Magister Scientiae

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026

RAIENI RAFAELA DA CUNHA

Desenvolvimento de um mecanismo dosador de fertilizante granulado para aplicação em taxa variável

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

Orientador: Francisco de A. de C. Pinto

Coorientadores: Andre L. de F. Coelho
Nerilson Terra Santos

VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026

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

T

C972d
2026

Cunha, Raieni Rafaela da, 1998-

Desenvolvimento de um mecanismo dosador de fertilizante granulado para aplicação a taxa variável / Raieni Rafaela da Cunha. – Viçosa, MG, 2026.

1 dissertação eletrônica (65 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2026.

Referências bibliográficas: f. 46-52.

DOI: https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.588

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Agricultura de precisão. 2. Adubos e fertilizantes. I. Pinto, Francisco de Assis de Carvalho, 1964-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.3

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

RAIENI RAFAELA DA CUNHA

Desenvolvimento de um mecanismo dosador de fertilizante granulado para aplicação em taxa variável

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

APROVADA: 24 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

_____

Raieni Rafaela da Cunha
Autora

_____

Francisco de Assis de Carvalho Pinto
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 15/10/2026 às 11:25:55 e pelo orientador em 15/10/2026 às 12:30:34. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse https://siadoc.ufv.br/validar-documento. No campo 'Código de registro', informe o código **AWBX.GWE6.KACN** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais Alcinéia e Antônio, aos meus familiares, amigos e professores pelo incentivo, parceria e oportunidades durante a minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Alcinéia Santana e Antônio Carlos da Cunha, pelo apoio incondicional, pela confiança e por nunca medirem esforços para que eu pudesse seguir e concretizar meus objetivos. O incentivo constante e a presença de vocês foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus irmãos, Miryani, Igor, Gabriel, Pedro e Maria Eduarda, agradeço pelo acolhimento, apoio e compreensão ao longo dessa trajetória, contribuindo de forma significativa para meu equilíbrio e motivação. À minha avó Jacinta, que partiu durante o período do meu mestrado, registro minha gratidão pelos ensinamentos e pelo apoio que contribuíram para minha formação pessoal e acadêmica. Às minhas sobrinhas, Lívia e Ísis, agradeço pela leveza e alegria proporcionadas ao longo deste percurso.

Ao Kaio, agradeço pelo incentivo, pela paciência e pelo apoio constante durante esses anos, tornando essa jornada mais equilibrada e possível.

Aos meus amigos Wellerson, Gabriel e Iago, agradeço pelo companheirismo, pelos momentos compartilhados e pela colaboração nos experimentos do mestrado, que tornaram o processo mais leve e produtivo. Aos colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola, agradeço pela convivência, pelos conselhos e pelas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Francisco de Assis de Carvalho Pinto, agradeço pelo suporte e pela orientação, essenciais para a condução e conclusão desta pesquisa. Aos meus coorientadores, André Luiz de Freitas Coelho e Nerilson Terra Santos, agradeço pelo apoio, confiança, dedicação e orientações ao longo de todas as etapas do trabalho. Em especial, agradeço ao André Luiz de Freitas Coelho pelo apoio desde o processo seletivo do mestrado até a finalização desta jornada, bem como pela contribuição direta na condução dos experimentos e no desenvolvimento da pesquisa.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, agradeço pela oportunidade de realização da pós-graduação.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para tornar esse percurso mais leve.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Meu muito obrigada.

RESUMO

CUNHA, Raieni Rafaela da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Desenvolvimento de um mecanismo dosador de fertilizante granulado para aplicação em taxa variável**. Orientador: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Coorientadores: Andre Luiz de Freitas Coelho e Nerilson Terra Santos.

A cafeicultura de montanha impõe restrições à mecanização convencional, especialmente na aplicação de fertilizantes, em função da topografia acidentada, da limitação ao uso de máquinas de grande porte e da elevada participação dos insumos nos custos de produção. Nessas condições, a adoção da Agricultura de Precisão, particularmente da adubação à taxa variável, ainda é limitada entre pequenos produtores, principalmente pela ausência de equipamentos portáteis, adaptados e de menor custo. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar um mecanismo dosador de fertilizantes granulados para aplicação pontual em taxa fixa e variável. O protótipo foi composto por um mecanismo dosador volumétrico do tipo rotor acanelado, acionado por motor elétrico de corrente contínua e instalado em uma plataforma de aplicação previamente existente, composta por um reservatório de fertilizante comercial e uma Unidade de Controle Eletrônica (UCE). A avaliação experimental foi realizada por meio de ensaios laboratoriais e avaliação em campo. Em laboratório, realizaram-se ensaios de caracterização física dos fertilizantes, calibração da dosagem em função do ângulo de revolução do mecanismo e investigação dos efeitos da inclinação transversal, do nível de enchimento do reservatório e da dose prescrita, em esquema fatorial 3 × 3 × 5. Foram ainda determinados os indicadores de precisão e exatidão da massa aplicada. Posteriormente, o desempenho do sistema foi avaliado em campo, em células georreferenciadas com doses diferenciadas, analisando-se a coerência entre valores prescritos e aplicados, bem como a capacidade operacional efetiva. Os resultados laboratoriais indicaram relação linear entre o ângulo de revolução e a massa dosada para os fertilizantes avaliados, além de efeito significativo da inclinação transversal, do nível de enchimento e da dose prescrita sobre a massa aplicada. O mecanismo apresentou elevada precisão (coeficiente de variação inferior a 2%) e elevada exatidão (desvio percentual inferior a 1%) em condições controladas. Em campo, o sistema embarcado realizou a variação automática das doses entre células, mantendo proximidade entre as doses prescritas e aplicadas na maioria dos tratamentos. Conclui-se que o mecanismo dosador desenvolvido apresenta desempenho técnico satisfatório para aplicação localizada de fertilizantes granulados em taxa fixa e variável, demonstrando potencial

de uso em sistemas produtivos com restrições à mecanização convencional, como a cafeicultura em regiões montanhosas.

Palavras-chave: agricultura de Precisão; adubação à taxa variável; adubadora costal; fertilizantes granulados; dosagem volumétrica.

ABSTRACT

CUNHA, Raieni Rafaela da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Development of a granular fertilizer dosing mechanism for variable rate application**. Adviser: Francisco de Assis de Carvalho Pinto. Co-advisers: Andre Luiz de Freitas Coelho and Nerilson Terra Santos.

Mountain coffee farming imposes constraints on conventional mechanization, particularly for fertilizer application, due to rugged topography, limitations on the use of large-scale machinery, and the significant share of fertilizers in production costs. Under these conditions, the adoption of Precision Agriculture, especially variable-rate fertilization, remains limited among smallholders, mainly because of the lack of portable, adapted, and cost-effective equipment. In this context, the present study aimed to develop and evaluate a metering mechanism for the spot application at fixed and variable rates. The prototype consisted of a fluted-roller volumetric metering mechanism driven by a direct-current electric motor and installed on an existing backpack fertilizer spreader platform composed of a commercial fertilizer hopper and an Electronic Control Unit (ECU). The experimental evaluation comprised laboratory and field trials. Laboratory tests included physical characterization of the fertilizers, calibration of the applied mass as a function of the mechanism's rotation angle, and investigation of the effects of transverse inclination, hopper fill level, and prescribed rate under a 3 × 3 × 5 factorial design. Precision and accuracy indicators of the applied mass were also determined. Subsequently, system performance was assessed under field conditions in georeferenced cells with differentiated application rates, analyzing the consistency between prescribed and applied values as well as the effective field capacity. Laboratory results showed a linear relationship between rotation angle and applied mass for the evaluated fertilizers, as well as significant effects of transverse inclination, hopper fill level, and prescribed rate on the applied mass. The mechanism demonstrated high precision (coefficient of variation below 2%) and high accuracy (relative error below 1%) under controlled conditions. In the field, the onboard system successfully performed automatic rate variation between cells, maintaining close agreement between prescribed and applied doses in most treatments. It is concluded that the developed mechanism presents satisfactory technical performance for the localized application of granular fertilizers at fixed and variable rates, demonstrating potential for use in production systems with restrictions on conventional mechanization, such as mountain coffee farming.

Keywords: precision agriculture; variable-rate fertilization; volumetric metering mechanism; backpack fertilizer applicator; granular fertilizers

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de mecanismo dosador helicoidal (rosca sem-fim) utilizado na aplicação de fertilizantes granulados. Fonte: Autor (2026). 18

Figura 2 – Esquema de mecanismo dosador do tipo rotor acanelado, operando por dosagem volumétrica por meio de ranhuras longitudinais. Fonte: Autor (2026). 18

Figura 3 – Esquema de mecanismo dosador do tipo rotor com pinos, operando por dosagem volumétrica em função da rotação do rotor. Fonte: Autor (2026). 19

Figura 4 – Vista explodida do mecanismo dosador de fertilizante. Fonte: Autor (2025). 24

Figura 5 – Adubadora costal para aplicação pontual de fertilizantes granulados. Fonte: Autor (2025). 26

Figura 6 – Dispositivo utilizado para medição de ângulo de repouso dos fertilizantes. Fonte: Autor (2025). 28

Figura 7 – Peneirador mecânico utilizado no experimento. Fonte: Autor (2025). 29

Figura 8 – Mapa de aplicação. Fonte: Autor (2025). 33

Figura 9 – Localização das bandejas coletoras. Fonte: Autor (2025). 33

Figura 10 – Gráficos de dispersão dos fertilizantes ureia, KCl e NPK 06-36-0. Fonte: Autor (2025). 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de decisão para seleção do princípio de dosagem. Fonte: Autor (2025).....23

Tabela 2 – Classificação dos fertilizantes sólidos. Fonte: Brasil (2020).....30

Tabela 3 – Classificação físicas dos fertilizantes utilizados no experimento. Fonte: Autor (2025). 34

Tabela 4 – Ângulos de revolução programados no ensaio de dosagem. Fonte: Autor (2025). 37

Tabela 5 – Resumo da ANOVA para a massa dosada (efeitos principais e interações). Fonte: Autor (2025). 39

Tabela 6 – Médias marginais estimadas da massa dosada (g) em função da dose e da inclinação transversal. Fonte: Autor (2025). 40

Tabela 7 – Médias marginais estimadas da massa dosada (g) em função da inclinação transversal e do nível de enchimento do reservatório. Fonte: Autor (2025). 41

Tabela 8 – Precisão e exatidão da massa dosada (KCl; dose prescrita = 75 g; n = 10). Fonte: autor (2025). 42

Tabela 9 – Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação das massas coletadas. Fonte: Autor (2025). 43

Tabela 10 – Capacidade operacional correspondentes a cada célula. Fonte: Autor (2025). 44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVOS 15
2.1. Objetivo geral 15
3. REVISÃO DE LITERATURA 15
3.1. Agricultura de Precisão e Adubação à Taxa Variável 15
3.2. Uso de Fertilizantes e a Necessidade de Racionalização 16
3.3. Mecanismos Dosadores em Adubadoras 17
3.4. Tecnologias Embarcadas para Controle de Dosagem 20
3.5. Critérios de Avaliação de Adubadoras Costais 21
4. MATERIAL E MÉTODOS 21
4.1. Etapas de concepção e definição do mecanismo dosador 22
4.2. Construção do protótipo e integração à plataforma de aplicação 23
4.3. Integração ao sistema de aplicação 25
4.4. Caracterização dos fertilizantes 26
4.5. Calibração da dosagem de fertilizante em função do ângulo de revolução do mecanismo dosador 30
4.6. Investigação dos fatores que influenciam a massa de fertilizante dosada 31
4.7. Avaliação da precisão e exatidão do mecanismo dosador em laboratório 31
4.8. Desempenho da adubadora costal em campo 32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 34
5.1. Caracterização dos fertilizantes 34
5.2. Calibração da dosagem de fertilizante em função do ângulo de revolução do mecanismo dosador 36
5.3. Investigação dos fatores que influenciam a massa de fertilizante dosada 38
5.4. Avaliação da precisão e exatidão do mecanismo dosador em laboratório 41
5.5. Desempenho da adubadora costal em campo 42
6. CONCLUSÕES 45
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 46
APÊNDICE A – RESULTADOS DETALHADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS FERTILIZANTES 53
APÊNDICE B – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA DOSAGEM DE FERTILIZANTE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE REVOLUÇÃO DO MECANISMO DOSADOR 56
APÊNDICE C – RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A MASSA DE FERTILIZANTE DOSADA 57

APÊNDICE D – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E EXATIDÃO DO MECANISMO DOSADOR EM LABORATÓRIO.....59
APÊNDICE E – MASSA COLETADA EM CADA BANDEJA E INFORMAÇÕES ARMAZENADAS NA UCE.....60

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os produtores têm investido de forma crescente em tecnologias voltadas ao aumento da eficiência dos sistemas produtivos. Contudo, a adoção dessas soluções pode ser limitada pela restrição na capacidade de investimento de agricultores de pequena escala e/ou pelas dificuldades inerentes à mecanização agrícola em áreas de montanha (Margherita et al., 2023; Troiano et al., 2023). Segundo Peñuelas et al. (2023), a demanda por tecnologias para que não haja desperdícios ou aplicações insuficientes de insumos, especialmente os fertilizantes, vem crescendo nos últimos anos. A falta de mão-de-obra e a rotatividade dos trabalhadores são outros fatores que intensificam a necessidade de mecanização e/ou automação nessas áreas.

De acordo com dados da United States Department of Agriculture – Foreign Agricultural Service (USDA-FAS, 2024), o Brasil é o maior produtor mundial de café, sendo responsável por aproximadamente 38 % da produção global. No contexto nacional, a cafeicultura ocupa cerca de 1,85 milhão de hectares em 2025, englobando as espécies Coffea arabica e Coffea canephora (robusta/conilon), conforme estimativas da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025a).

A atividade apresenta forte concentração regional, com a Região Sudeste respondendo por aproximadamente 86,7 % da produção brasileira (CONAB, 2025b). Essa predominância territorial evidencia a relevância de estados caracterizados por relevo ondulado a montanhoso e altitudes mais elevadas, condições frequentemente associadas ao cultivo do café arábica. Entre as unidades federativas, Minas Gerais destaca-se como o principal polo produtor do país, liderando a produção de *Coffea arabica* e desempenhando papel determinante no desempenho da cafeicultura brasileira (CONAB, 2025a).

Além da expressiva participação em volume, a cafeicultura brasileira também se destaca pela qualidade do produto, particularmente em regiões de maior altitude, como as Matas de Minas, onde há correlação entre altitude e potencial para produção de cafés com bebida de alta qualidade (Williams, 2022). As características dessas regiões, como a inclinação do terreno, que facilita a drenagem e a circulação de ar, e temperaturas amenas com variações entre dia e noite, favorecem o amadurecimento uniforme dos frutos (Zambolim et al. 2002; Carvalho & Chalfoun, 2010). Contudo, a topografia íngreme e irregular nessas áreas representa um desafio para a mecanização agrícola, evidenciando a necessidade de tecnologias adaptadas a essas condições.

Outro ponto a se destacar é que, apesar dos fertilizantes serem amplamente usados e cruciais para os altos níveis de produtividade do agronegócio brasileiro, o país depende de importações para atender à demanda, já que a produção interna é insuficiente (Thiago et al., 2023). No caso específico da cafeicultura, essa dependência assume relevância ainda maior, uma vez que os fertilizantes representam parcela expressiva do custo operacional da atividade, estimada em cerca de 24% do custo total de produção do café no Brasil (CONAB, 2023).

Esse elevado volume de importações, combinado com a valorização do dólar em relação ao real, eleva os custos de produção e diminui a competitividade dos produtos brasileiros no mercado internacional (Moreira, 2023). Por isso, é importante adotar uma aplicação mais racional de fertilizantes, baseada em análises de solo que permitem recomendações mais precisas de adubação.

Diante das limitações impostas pela topografia acidentada, da restrição de capital de pequenos produtores, da escassez de mão de obra e da necessidade de uso mais racional de fertilizantes, o sistema semimecanizado apresenta-se como alternativa viável. Essa abordagem integra o trabalho manual ao uso de máquinas para a realização de tarefas agrícolas (Bhatt et al., 2020). Na cafeicultura, entre os equipamentos mais comuns utilizados estão as roçadoras, derriçadoras portáteis, semeadoras manuais, pulverizadores, carrinhos adubadores e adubadoras costais. A adubadora costal, em particular, é uma ferramenta versátil, eficiente e de baixo valor agregado que é projetada para facilitar a distribuição de fertilizantes no campo. Quando dotado de um sistema embarcado para distribuição em taxa variável, torna-se uma solução tecnológica para a adoção da Agricultura de Precisão (AP) em terrenos montanhosos e/ou para agricultores de baixa capacidade de investimentos (Liu et al., 2022).

Analisando o mercado de máquinas agrícolas, nota-se que as adubadoras com tecnologia de distribuição de fertilizantes à taxa variável existentes no mercado não são voltadas para a agricultura de montanha e possuem um alto valor agregado. Desta forma, destaca-se a necessidade de soluções inovadoras que atendam à demanda da pequena produção por mecanização agrícola e agricultura de precisão. Entre os principais desafios para a adoção de equipamentos costais para aplicação de fertilizantes à taxa variável em regiões montanhosas estão a escolha do mecanismo dosador e sua calibração, fatores essenciais para garantir a exatidão da dose aplicada durante o deslocamento em campo.

Diante da demanda, Coelho et al. (2021) desenvolveram um protótipo de adubadora costal equipado com mecanismo dosador do tipo rosca helicoidal, voltado à aplicação localizada de fertilizantes granulados. Em continuidade a esse trabalho, Quintão (2025)

implementou uma Unidade de Controle Eletrônica (UCE) ao equipamento, possibilitando a aplicação em taxa fixa e variável, além de realizar avaliações laboratoriais e em campo para validação do sistema. Apesar dos avanços obtidos com a automação e o controle da taxa de aplicação, o conjunto apresentava uma limitação construtiva: o mecanismo dosador era conduzido manualmente pelo operador durante a aplicação. Essa configuração tornava o desempenho sensível à posição de transporte, podendo provocar variações na dose aplicada e restringindo o funcionamento adequado a determinadas faixas de inclinação.

Como alternativa para diminuir essas imprecisões, propõe-se o desenvolvimento de uma nova configuração construtiva na qual o mecanismo dosador seja estruturalmente acoplado ao reservatório de fertilizante. A integração dos componentes tende a reduzir a influência dos movimentos do operador sobre o sistema, favorecendo maior estabilidade operacional, melhor uniformidade na deposição dos insumos e ampliação da aplicabilidade do equipamento em áreas com diferentes declividades.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Desenvolver um mecanismo dosador de fertilizante granulado para aplicação em taxa variável.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Agricultura de Precisão e Adubação à Taxa Variável

A Agricultura de Precisão (AP) é caracterizada como um sistema de gestão agrícola baseado no reconhecimento da variabilidade espacial e temporal dos atributos que influenciam a produção, com o objetivo de otimizar o uso de insumos por meio do manejo localizado. Diferentemente do manejo convencional, que considera as lavouras como áreas homogêneas, a AP fundamenta-se na coleta, análise e utilização de informações georreferenciadas, associadas a tecnologias de sensoriamento e posicionamento (Molin, 1997; Sousa, 2023).

O ciclo operacional da AP envolve, de forma integrada, a identificação da variabilidade, a análise das informações para a tomada de decisão e a intervenção em campo, sendo viabilizado pelo uso de tecnologias como sistemas globais de navegação por satélite (GNSS),

Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sensores proximais ou remotos (Molin, 1997; Umezu, 2006; Coelho et al., 2018). Nesse contexto, a Adubação à Taxa Variável (ATV) configura-se como uma das principais aplicações práticas da AP, permitindo a aplicação diferenciada de fertilizantes conforme a necessidade específica de cada ponto da lavoura (Sudduth, 1999; Umezu, 2006).

O objetivo central da ATV é ajustar a quantidade de fertilizante aplicada à variabilidade nutricional do solo, evitando tanto a subdosagem quanto a superdosagem ao longo da área cultivada. A implementação dessa técnica pode ocorrer por meio de mapas de prescrição previamente elaborados (off-line) ou por sistemas baseados em sensores (on-line), nos quais a dosagem é ajustada em tempo real durante a operação de campo (Sudduth, 1999; Franck et al., 2015).

No Brasil, os mecanismos dosadores do tipo helicoidal são amplamente utilizados em máquinas de aplicação de fertilizantes sólidos. Entretanto, a precisão desses dispositivos pode ser influenciada por fatores operacionais, como inclinação do terreno, velocidade de deslocamento e características físicas do fertilizante (Ferreira et al., 2010; Reynaldo et al., 2015; Spagnolo et al., 2021). Avanços recentes em sistemas de controle têm possibilitado maior estabilidade e fidelidade da taxa aplicada em relação à prescrição, com destaque para o uso de microcontroladores e técnicas de controle por modulação por largura de pulso (PWM) no acionamento dos mecanismos dosadores (Garcia, 20014; Alameen et al., 2019; Quintão, 2025).

3.2. Uso de Fertilizantes e a Necessidade de Racionalização

O crescimento e o desenvolvimento das culturas vegetais dependem da absorção equilibrada de nutrientes, o que pressupõe adequada disponibilidade natural no solo e, quando necessário, suplementação por meio da aplicação de fertilizantes (Becker et al., 2021). Em escala global, o aumento da demanda por alimentos tem intensificado a necessidade de maior eficiência no uso dos recursos produtivos. Nesse contexto, estima-se que o consumo de fertilizantes continue a crescer nas próximas décadas (Bueno-Delgado et al., 2016).

Paralelamente, a redução das reservas de matérias-primas e a elevada dependência de insumos importados têm contribuído para o aumento dos custos desses produtos. Como consequência, a fertilização passou a assumir um papel estratégico no planejamento agrícola, especialmente em sistemas intensivos de produção (Becker et al., 2021). No Brasil, essa condição é ainda mais sensível, uma vez que os fertilizantes podem representar parcela

expressiva do custo total de produção, alcançando valores superiores a 40% em determinadas culturas (Villar et al., 2004).

A eficiência da adubação fundamenta-se em princípios clássicos da nutrição mineral, como a Lei do Mínimo, segundo a qual a produtividade das culturas é limitada pelo nutriente disponível em menor quantidade, mesmo quando os demais se encontram em níveis adequados (Garcia, 2014). Entretanto, práticas tradicionais de recomendação de adubação, baseadas em valores médios da área cultivada, desconsideram a variabilidade espacial natural dos atributos físicos e químicos do solo, o que pode resultar em desequilíbrios nutricionais ao longo da lavoura (Martins, 1999; Umezu, 2006; Sousa, 2015).

O manejo inadequado de fertilizantes acarreta impactos agronômicos, econômicos e ambientais. A aplicação excessiva de nutrientes pode intensificar processos de degradação ambiental, como acidificação do solo, contaminação de recursos hídricos por lixiviação de nitratos e acúmulo de elementos potencialmente tóxicos (Beard et al., 2018; Wiggenhauser et al., 2019). Por outro lado, a subdosagem compromete o desenvolvimento das culturas, reduz o potencial produtivo e limita o retorno econômico do sistema agrícola, afetando a eficiência global da produção (Mialhe, 1996; Umezu, 2006).

Na cafeicultura, especialmente em regiões de montanha, a racionalização do uso de fertilizantes torna-se ainda mais relevante, uma vez que o manejo nutricional representa um dos principais custos variáveis do sistema produtivo e exerce influência direta tanto sobre a produtividade quanto sobre a qualidade final do café. Além disso, as características do relevo acidentado dificultam a mecanização convencional e restringem o uso de máquinas de grande porte, frequentemente inviáveis para pequenos produtores em função do elevado custo de aquisição e operação (Quintão, 2025; Coelho, 2016).

3.3. Mecanismos Dosadores em Adubadoras

O mecanismo dosador é o elemento central dos sistemas de aplicação de fertilizantes, pois controla a taxa de descarga e a regularidade do fluxo, influenciando diretamente a uniformidade de aplicação e a eficiência agronômica do insumo (Mendonça et al., 2023). Em aplicações com fertilizantes granulados, os sistemas de dosagem são predominantemente volumétricos, de modo que seu desempenho depende do projeto do mecanismo, das condições operacionais e das propriedades físicas do material aplicado.

Entre os mecanismos mais utilizados destacam-se os dosadores helicoidais (Figura 1) e os rotores acanelados (Figura 2), em razão da simplicidade construtiva e da ampla

aplicabilidade em diferentes configurações de máquinas (Mendonça et al., 2023). Os mecanismos helicoidais são amplamente empregados por apresentarem robustez, baixo custo e facilidade de fabricação; entretanto, sua estabilidade de descarga pode ser afetada por condições como inclinação de trabalho e regime de enchimento, resultando em variações de fluxo quando não há compensação adequada (Dun et al., 2024). Os rotores acanelados, por sua vez, apresentam boa repetibilidade em faixas intermediárias de operação, embora sua uniformidade possa variar em função do regime de rotação e da configuração do conjunto de distribuição (Mendonça et al., 2023).

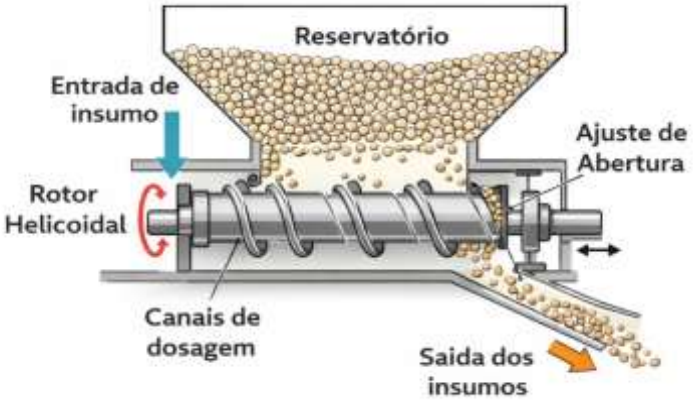

Figura 1 – Esquema de mecanismo dosador helicoidal (rosca sem-fim) utilizado na aplicação de fertilizantes granulados. Fonte: Autor (2026).

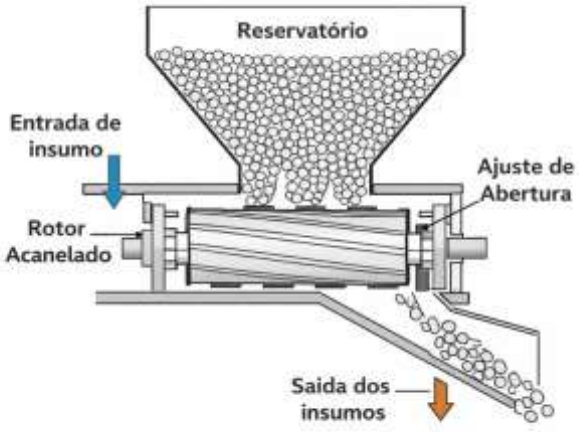

Figura 2 – Esquema de mecanismo dosador do tipo rotor acanelado, operando por dosagem volumétrica por meio de ranhuras longitudinais. Fonte: Autor (2026).

Mais recentemente, mecanismos do tipo rotor com pinos (pin-roller) (Figura 3) têm sido investigados por apresentarem maior potencial de uniformidade de descarga, especialmente em aplicações que demandam estabilidade em baixas vazões. Estudos experimentais e numéricos indicam que a geometria dos pinos influencia diretamente o enchimento e a regularidade do fluxo, podendo reduzir compactação e zonas passivas no interior do mecanismo (Sugirbay et al., 2020; Adilet et al., 2023).

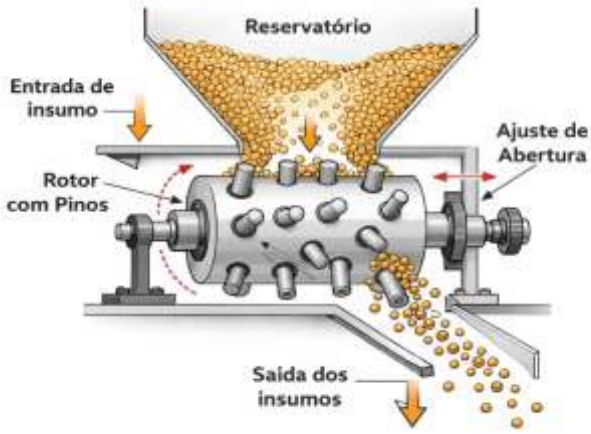

Figura 3 – Esquema de mecanismo dosador do tipo rotor com pinos, operando por dosagem volumétrica em função da rotação do rotor. Fonte: Autor (2026).

Além do tipo de mecanismo, o desempenho do dosador é fortemente condicionado às propriedades físicas do fertilizante. Variações na massa específica, granulometria e escoabilidade afetam o preenchimento do compartimento de dosagem e a taxa de aplicação, exigindo calibração específica para cada produto (Mendonça et al., 2023). Fatores operacionais, como velocidade de deslocamento e estado de enchimento do reservatório, também influenciam a exatidão da dosagem, tornando necessária a avaliação do desempenho em condições representativas de uso.

A integração de mecanismos dosadores a sistemas eletrônicos embarcados tem ampliado a precisão da aplicação, permitindo o ajuste automático da rotação e a redução de desvios entre a vazão ajustada e a vazão efetiva. Estudos recentes indicam que a combinação entre controle eletrônico e otimização geométrica do mecanismo pode aumentar a estabilidade da descarga em diferentes condições operacionais (Dun et al., 2023; Dun et al., 2024).

3.4. Tecnologias Embarcadas para Controle de Dosagem

A incorporação de eletrônica embarcada aos sistemas de aplicação de fertilizantes tem ampliado a capacidade de controle da taxa de dosagem, permitindo substituir ajustes puramente mecânicos por soluções eletromecânicas com maior precisão e flexibilidade operacional. Nesses sistemas, a automação viabiliza o ajuste contínuo da vazão de descarga em função das condições de operação e das exigências agronômicas, contribuindo para maior estabilidade da aplicação (Al-Gaadi, 2023; Pawase et al., 2023).

O microcontrolador constitui o núcleo do sistema embarcado, sendo responsável pela execução das rotinas de controle e pelo comando do mecanismo dosador em tempo real. Em aplicações com fertilizantes sólidos, o controle da taxa é comumente realizado por meio da variação da rotação de motores elétricos acoplados ao dosador, tornando a rotação a principal variável manipulada para ajuste da vazão (Dun et al., 2024). Essa abordagem permite reduzir desvios entre a taxa aplicada e a taxa de referência, aumentando a repetibilidade do sistema sob diferentes regimes operacionais.

Em sistemas de adubação à taxa variável, a integração do controle eletrônico com informações de posicionamento é considerada fundamental, especialmente em abordagens baseadas em mapas de prescrição. Nesses casos, a taxa aplicada passa a ser função da posição espacial da máquina no campo, possibilitando ajustes dinâmicos ao longo da área cultivada e reduzindo erros associados ao manejo uniforme em áreas heterogêneas (Al-Gaadi, 2023).

Resultados recentes indicam que sistemas de dosagem eletronicamente controlados podem apresentar elevada precisão operacional e resposta adequada a variações de demanda, mesmo em soluções compactas e de menor custo. Dun et al. (2024), por exemplo, observaram desvio médio de apenas 3,12% entre a taxa aplicada e a taxa de referência em um dosador eletronicamente controlado, evidenciando a capacidade do sistema em realizar ajustes precisos de vazão. De forma semelhante, Mirzakhaninafchi et al. (2021) reportaram coeficientes de variação entre 2,34% e 5,1% na descarga de fertilizantes em aplicações à taxa variável. A associação entre controle eletrônico e validação experimental tem se mostrado eficaz para melhorar a estabilidade da aplicação e ampliar o potencial de uso dessas tecnologias na racionalização do emprego de fertilizantes.

3.5. Critérios de Avaliação de Adubadoras Costais

A avaliação do desempenho de adubadoras costais baseia-se em metodologias experimentais consolidadas, voltadas à quantificação da qualidade da dosagem e da uniformidade de aplicação do fertilizante em condições controladas. Entre os critérios mais utilizados destacam-se a exatidão, definida pela proximidade entre a dose aplicada e a dose de referência, e a precisão, associada à variabilidade do processo de aplicação (Al-Gaadi, 2023).

A uniformidade de dosagem é comumente quantificada por meio do coeficiente de variação (CV), amplamente adotado na literatura por permitir a comparação objetiva do desempenho entre equipamentos, regulagens e fertilizantes distintos (Mendonça et al., 2023). Werner et al. (2007), avaliando aplicações de fertilizantes à taxa variável, observaram coeficientes de variação inferiores a 15% na distribuição transversal e valores entre 8,78% e 12,48% na distribuição longitudinal, indicando adequada uniformidade operacional do sistema avaliado. De acordo com Ortiz-Cañavate (2003), coeficientes de variação inferiores a 15% são considerados satisfatórios em aplicações de fertilizantes granulados, enquanto valores abaixo de 10% indicam boa uniformidade de distribuição. Embora classificações tradicionais de CV sejam frequentemente utilizadas como referência, sua interpretação deve considerar o tipo de equipamento, as condições operacionais e o objetivo do ensaio (Mohallem et al., 2008).

Os ensaios de desempenho são, em geral, conduzidos em ambiente controlado, com o uso de bancadas de teste que possibilitam padronizar variáveis experimentais e garantir elevada repetibilidade. Esses procedimentos permitem estimar a vazão média e a variabilidade da dosagem sob diferentes condições de operação, sendo amplamente empregados na avaliação de mecanismos dosadores de fertilizantes granulados (Zimmermann et al., 2020; Mendonça et al., 2023).

Além dos parâmetros de exatidão e uniformidade, a capacidade operacional constitui indicador complementar para análise do desempenho, especialmente em equipamentos costais, nos quais fatores operacionais e limitações ergonômicas podem influenciar o rendimento da aplicação em condições reais de uso (Al-Gaadi, 2023).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do mecanismo dosador de fertilizante granulado foi conduzido em quatro etapas distintas: (i) definição conceitual e dimensionamento preliminar do sistema, (ii)

construção do protótipo (iii) integração ao sistema de aplicação e (iv) realização de ensaios laboratoriais e de campo para avaliação do desempenho operacional.

4.1. Etapas de concepção e definição do mecanismo dosador

Inicialmente, foram definidos os requisitos funcionais, construtivos e as restrições de projeto do mecanismo dosador. Como requisitos funcionais, estabeleceu-se que o sistema deveria operar com fertilizantes granulados comerciais, permitir controle pontual da taxa de aplicação em regime fixo e variável, possibilitar acionamento elétrico com controle de rotação e manter desempenho estável sob diferentes condições de inclinação, considerando sua aplicação em áreas declivosas.

Quanto aos requisitos construtivos, considerou-se a compatibilidade dimensional com a plataforma costal existente, a integração com motor elétrico de corrente contínua alimentado a 12 V e a viabilidade de fabricação por manufatura aditiva (FDM), visando simplicidade de prototipagem e redução de custos (Van Loon et al., 2018; JESTR, 2018).

Como restrições de projeto, foram adotadas alimentação elétrica limitada a 12 V, dimensões compactas, baixo peso e custo reduzido de implementação, em consonância com a proposta de aplicação manual em agricultura de montanha.

A partir desses requisitos, foram analisados diferentes princípios de dosagem volumétrica aplicáveis a materiais granulares, incluindo: rosca helicoidal (sem-fim), disco alveolado (válvula rotativa de células) e rotor acanelado (grooved roller). A seleção do princípio de dosagem baseou-se em critérios técnicos relacionados às limitações mecânicas, energéticas e dimensionais do sistema portátil.

Foram considerados os seguintes critérios de avaliação: complexidade construtiva, exigência de torque, facilidade de vedação, compatibilidade com manufatura aditiva (FDM), integração com motor CC 12 V e adequação à operação em sistema costal. A análise foi conduzida de forma qualitativa, fundamentada nos princípios de transporte de materiais granulares e nos requisitos de projeto (Galvão et al., 2018; Zimmermann et al., 2022; CEMA, 2007; Powder & Bulk Solids, 2026). A comparação entre os conceitos avaliados está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de decisão para seleção do princípio de dosagem. Fonte: Autor (2025)

Critério	Rosca helicoidal	Disco alveolado	Rotor acanelado
Complexidade construtiva	Alta	Média	Baixa
Exigência de torque	Alta	Média	Baixa
Facilidade de vedação	Média	Média	Alta
Compatibilidade com FDM	Média	Alta	Alta
Integração com motor DC 12 V	Média	Alta	Alta
Adequação à aplicação costal	Média	Média	Alta

Com base na análise comparativa apresentada na Tabela 1, o rotor volumétrico acanelado foi selecionado por apresentar maior aderência aos requisitos estabelecidos, destacando-se pela simplicidade construtiva, menor exigência de torque e maior compatibilidade com sistema portátil de baixa potência. Além disso, sua geometria favorece vedação lateral simples e fabricação por prototipagem rápida, características alinhadas às restrições dimensionais e energéticas do projeto (Van Loon et al., 2018; JESTR, 2018).

4.2. Construção do protótipo e integração à plataforma de aplicação

O conjunto mecânico desenvolvido consistiu em um motor elétrico de corrente contínua, um acoplamento de eixo, um flange de acoplamento, o corpo do mecanismo dosador, o rotor dosador, o eixo principal, um mancal com rolamento e um encoder rotativo, dispostos em sequência axial. A Figura 5 apresenta a vista explodida do mecanismo dosador.

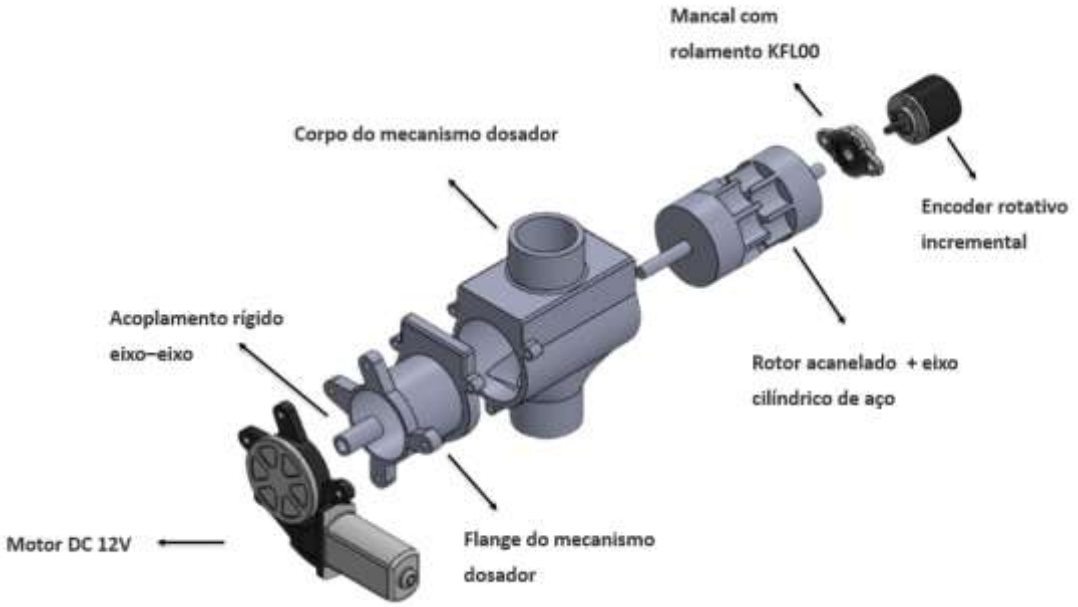

Figura 4 – Vista explodida do mecanismo dosador de fertilizante. Fonte: Autor (2025).

O acionamento do sistema foi realizado por um motor elétrico de vidro elétrico automotivo, modelo Mabuchi, de corrente contínua, alimentado a 12 V e com redução interna, selecionado em função do elevado torque disponível em baixas rotações, característica adequada ao acionamento de mecanismos volumétricos de dosagem de fertilizantes sólidos. A transmissão do movimento ocorreu por meio de um acoplamento rígido eixo–eixo, com diâmetros nominais de 8 mm no lado do motor e 10 mm no lado do eixo do dosador.

A ligação estrutural entre o motor e o corpo do dosador foi realizada por meio de um flange de acoplamento, responsável pelo alinhamento axial e pela fixação do conjunto. O corpo do mecanismo dosador foi projetado para o alojamento do rotor e para o escoamento controlado do fertilizante, apresentando abertura superior para alimentação do material e saída inferior acoplada a um tubo condutor. A inclinação mínima adotada para o tubo condutor foi de 50°, de modo a assegurar o escoamento contínuo do material granulado por ação da gravidade.

O elemento dosador consistiu em um rotor volumétrico com 8 canelas alternadas, com comprimento axial de 25 mm e raio externo de 10 mm. O raio das canelas foi definido a partir da caracterização física dos fertilizantes granulados utilizados, considerando as dimensões médias das partículas e visando maximizar o preenchimento volumétrico das cavidades. Ressalta-se que canelas de menor raio proporcionam maior resolução na dosagem, em razão da redução do volume transportado por revolução. Contudo, a redução excessiva desse parâmetro poderia comprometer o enchimento adequado das cavidades, especialmente devido à

irregularidade geométrica dos grânulos, resultando em instabilidade no escoamento e possível subdosagem. O rotor foi montado sobre eixo cilíndrico de aço com diâmetro nominal de 10 mm.

O apoio do eixo foi realizado por um mancal radial tipo KFL00, com um rolamento de esferas radiais interno, instalado em uma das extremidades do eixo. Na extremidade oposta, o próprio acoplamento rígido exerceu a função de apoio do eixo, dispensando a utilização de um segundo mancal, em função das dimensões reduzidas do conjunto.

O monitoramento do movimento rotacional foi realizado por meio de um encoder rotativo incremental LPD3806-ABZ com resolução de 1000 pulsos por revolução acoplado ao eixo, empregado na medição do ângulo de rotação do rotor e no controle da dosagem em operações à taxa fixa e à taxa variável, por intermédio da Unidade de Controle Eletrônica.

As peças estruturais do mecanismo — corpo, rotor e flange de acoplamento — foram fabricadas por impressão 3D pelo processo *Fused Deposition Modeling* (FDM), utilizando filamento de ácido polilático (PLA). O material foi selecionado em função de sua estabilidade dimensional, resistência mecânica compatível com solicitações moderadas e resistência química adequada ao contato com fertilizantes granulados sólidos, os quais não apresentam elevada agressividade química em condições normais de uso (Farah et al., 2016; Żenkiewicz, 2016). Os componentes comerciais — motor, eixo, mancal, rolamento, acoplamento e encoder — foram adquiridos no mercado.

4.3. Integração ao sistema de aplicação

Para a realização dos ensaios laboratoriais e de campo, o mecanismo desenvolvido foi instalado em uma plataforma de aplicação previamente existente, composta pelo reservatório de um Aplicador Costal de Granulados (ACG) de capacidade 25 L, fabricado pela empresa Guarany Indústria e Comércio e uma Unidade de Controle Eletrônica (UCE) desenvolvida por Quintão et al. (2025), sendo empregada sem modificações estruturais.

A UCE utilizada permitiu a aplicação pontual em taxa fixa ou variável, conforme definição do operador ou a partir de um mapa de adubação previamente inserido no sistema. A unidade foi implementada com base na placa de desenvolvimento ESP32 (Espressif Systems, China) e integrada a um módulo GNSS, destinado à obtenção da posição da adubadora na lavoura.

Na saída do mecanismo dosador foi acoplado um tubo flexível corrugado, fixado por abraçadeira metálica, responsável pela condução inicial do fertilizante após a dosagem. Na

extremidade do conjunto foi instalado um suporte ergonômico contendo o botão de acionamento do sistema, seguido de tubo rígido reto para direcionamento do material ao ponto de deposição no solo. A configuração final do sistema integrado, contemplando o mecanismo dosador, a UCE e a plataforma costal de aplicação, é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Adubadora costal para aplicação pontual de fertilizantes granulados. Fonte: Autor (2025).

4.4. Caracterização dos fertilizantes

Na etapa de avaliação do protótipo, foram utilizados três fertilizantes granulados: ureia, cloreto de potássio e NPK 06-36-0, demonstrados na Figura 5. Antes da execução dos ensaios de desempenho, foram determinadas as características físicas desses fertilizantes, incluindo massa específica, teor de água, ângulo de repouso e granulometria.

A massa específica foi obtida conforme a Equação 1, a partir de amostragens em triplicata, utilizando proveta volumétrica e balança de precisão.

$$\bar{\mu} = \frac{m_i}{V_i} \quad (1)$$

em que, $\bar{\mu}$ é a média da massa específica (kg/m^3), m_i é a massa das amostras em cada repetição (g) e V_i é o volume das amostras em cada repetição (m^3).

O teor de água foi determinado por secagem em estufa, a massa de cada amostra foi determinada, utilizando balança de precisão com resolução de ± 0,01, antes e após a secagem em estufa a 105°C por 24 horas (Alcarde, 1992). Com essas massas, a umidade da amostra em base seca foi calculada segundo a Equação 2.

$$\overline{U} = \left(\frac{m_i - m_f}{m_f}\right) \times 100 \quad (2)$$

em que, $\overline{U}$ é a média do teor de água do fertilizante em base seca (%), m_i é a massa inicial das amostras em cada repetição (g) e m_f é a média da massa final (seca) das amostras em cada repetição (g).

O ângulo de repouso foi determinado utilizando um dispositivo composto por um reservatório cilíndrico de acrílico com orifício central e régua graduada fixada externamente ao recipiente para mensuração da altura do cone formado (Figura 6). Inicialmente, o orifício permaneceu fechado para o preenchimento do reservatório, e a altura do fertilizante foi medida por meio de régua graduada fixada ao dispositivo.

Figura 6 – Dispositivo utilizado para medição de ângulo de repouso dos fertilizantes. Fonte: Autor (2025).

Após o nivelamento do material, o orifício foi gradualmente aberto, permitindo o escoamento do fertilizante até o estabelecimento do repouso. A altura final foi registrada juntamente com a distância entre a parede do reservatório e a abertura de descarga. O procedimento foi repetido três vezes para cada fertilizante, e o ângulo de repouso foi calculado conforme a Equação 3.

$$\bar{\theta} = \left(\frac{h_i}{d}\right) \tag{3}$$

em que, $\bar{\theta}$ é a média do ângulo de repouso do fertilizante (°), h_i é a altura de cada repetição (cm) e d é a distância da parede do reservatório até a abertura de descarga (cm).

A granulometria foi determinada seguindo o protocolo descrito na Instrução Normativa nº 61 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2020), utilizando um agitador mecânico de peneiras (Figura 7) com amplitude de 4 mm durante 10 minutos.

Figura 7 – Peneirador mecânico utilizado no experimento. Fonte: Autor (2025).

A caracterização física do fertilizante foi realizada por meio da análise granulométrica, fundamentada na quantificação da massa retida em cada peneira da série experimental. A partir desses valores brutos, determinou-se a fração percentual de cada estrato em relação à massa total da amostra, permitindo a construção do perfil de distribuição de partículas. Subsequentemente, os dados obtidos foram confrontados com os parâmetros normativos descritos na Tabela 2, procedendo-se à classificação do produto quanto à sua natureza física e conformidade com os padrões estabelecidos.

Tabela 2 – Classificação dos fertilizantes sólidos. Fonte: Brasil (2020)

Especificação de natureza física	**Garantia granulométrica**	
	Peneira	**Partículas passantes**
Granulado e Mistura de Grânulos	4,8 mm (ABNT 4)	90%
	2 mm (ABNT 10)	40% máximo
	1 mm (ABNT 18)	5% máximo
Pó	2 mm (ABNT 10)	100%
	0,84 MM (ABNT 20)	70% mínimo
	0,3 (ABNT nº 50)	50% mínimo
Farelado	4,8 mm (ABNT 4)	95% mínimo
	2,83 mm (ABNT 7)	80% mínimo
	0,50 mm (ABNT 35)	30% máximo

4.5. Calibração da dosagem de fertilizante em função do ângulo de revolução do mecanismo dosador

Foi conduzido, em laboratório, um primeiro experimento com o objetivo de determinar a massa de fertilizante dosada em função do ângulo de revolução do mecanismo dosador, para ureia, cloreto de potássio e NPK 06-36-0. Durante esse ensaio, o reservatório foi mantido com 50% de sua capacidade, com o mecanismo dosador em condição estática e sem inclinação lateral ou longitudinal. Por programação da UCE, o dosador executou ângulos de revolução de 22°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°, 360°, 480°, 720°, 900° e 1080°. Para cada fertilizante e cada ângulo de revolução, a massa dosada foi coletada e determinada em balança de precisão com resolução de ± 0,01, com três repetições. Posteriormente, para cada um dos fertilizantes, foram ajustados modelos de regressão lineares para avaliar o efeito do ângulo de revolução na massa de cada fertilizante dosada.

4.6. Investigação dos fatores que influenciam a massa de fertilizante dosada

Foi realizado, em laboratório, um segundo experimento com o objetivo de avaliar os efeitos da altura da coluna de fertilizante, do ângulo de operação e da dose prescrita sobre a massa dosada pelo mecanismo. O experimento foi conduzido em esquema fatorial 3 × 3 × 5, em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, utilizando o fertilizante cloreto de potássio e o modelo de regressão previamente ajustado, uma vez que esse material apresentou características físicas intermediárias quando comparado à ureia e ao NPK 06-36-0 nos ensaios anteriores. Os fatores avaliados foram: níveis de capacidade do reservatório (75%, 50% e 25%), inclinações transversais de operação (0°, 15° e 30°) e cinco doses definidas com base na faixa operacional do mecanismo dosador.

Os valores observados da massa de fertilizante dosada foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com o objetivo de avaliar os efeitos dos fatores dose prescrita, inclinação transversal e nível de enchimento do reservatório, bem como suas interações. Quando identificadas diferenças estatisticamente significativas, procedeu-se à comparação múltipla das médias pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5%.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Jamovi versão 2.6 (The jamovi project, 2024), baseado na linguagem R (R Core Team, 2024), com auxílio do pacote emmeans para obtenção das médias marginais estimadas e comparações múltiplas.

4.7. Avaliação da precisão e exatidão do mecanismo dosador em laboratório

Em laboratório, foi realizado um terceiro experimento com o objetivo de avaliar a precisão e a exatidão da massa depositada pelo mecanismo dosador do protótipo. A precisão foi quantificada a partir do coeficiente de variação (CV) das massas aplicadas, enquanto a exatidão foi determinada pelo desvio da massa aplicada em relação à prescrição.

Durante esse ensaio, a adubadora foi mantida em condição estática, sem inclinação lateral ou longitudinal, e com o reservatório entre 60% e 80% de sua capacidade. Foi utilizado o fertilizante cloreto de potássio previamente calibrado, sendo o mecanismo previamente calibrado para esse material. Definiu-se uma dosagem de 70 g, correspondente a um valor intermediário dentro da faixa de doses avaliadas no estudo. A massa coletada em recipiente plástico foi determinada em balança de precisão. O procedimento foi repetido 10 vezes, sendo posteriormente calculados a massa média, o coeficiente de variação e o desvio percentual conforme as Equações 4, 5 e 6.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} \tag{4}$$

$$CV = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \text{ x } 100\% \tag{5}$$

$$d = \frac{\bar{x} - m_c}{m_c} \text{ x } 100\% \tag{6}$$

em que, $\bar{x}$ é a média da massa de fertilizante depositada em cada recipiente (g), n é o número de repetições do teste, x_i é a massa medida em cada repetição (g), CV é o coeficiente de variação (%), d é o desvio de distribuição (%) e m_c é a massa determinada (g).

4.8. Desempenho da adubadora costal em campo

A avaliação em campo foi conduzida em Vale da Agronomia da Universidade Federal de Viçosa – UFV, com 0,3382 ha e inclinação de 20° a 30°. A área foi dividida em cinco células georreferenciadas, nas quais foi simulado um mapa de aplicação contendo doses diferenciadas por célula (80 g, 110 g, 20 g, 50 g e 140 g) e inserido na UCE do protótipo, conforme a Figura 9. As áreas correspondentes às células de 80 g, 110 g, 20 g, 50 g e 140 g foram, respectivamente, de 998 m², 847 m², 468 m², 387 m² e 682 m².

Figura 8 – Mapa de aplicação. Fonte: Autor (2025).

De forma semelhante ao ensaio laboratorial, o reservatório foi mantido entre 60% e 80% e foi utilizado o fertilizante cloreto de potássio. Para a coleta do fertilizante aplicado, foram distribuídas 120 bandejas coletoras com espaçamento de um metro entre elas. As coordenadas de posicionamento de cada bandeja foram determinadas por meio de um receptor GNSS topográfico, com correção diferencial em pós-processamento. A massa de fertilizante coletada em cada bandeja foi quantificada utilizando uma balança de precisão. A Figura 10 apresenta a localização das bandejas no interior das células experimentais.

Figura 9 – Localização das bandejas coletoras. Fonte: Autor (2025).

A mudança automática de dose promovida pelo sistema embarcado foi avaliada por meio da análise das massas coletadas nas bandejas em cada célula, com cálculo da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação para as doses aplicadas, conforme Equações 4, 5 e 6. Além disso, foram extraídos os dados armazenados pela UCE, incluindo número de

identificação do equipamento, data, horário, dose prescrita, número de pulsos (setup) e coordenadas geográficas dos pontos de aplicação. Com base nesses registros, foi determinado o tempo médio entre acionamentos, permitindo estimar a capacidade operacional efetiva por célula conforme a Equação 7.

$$C_{ei} = \frac{A_i}{(n-1) * \overline{t_i}} \tag{7}$$

em que C_{ei} é a capacidade operacional efetiva em cada célula (ha.h^{-1}), A_i é a área de cada célula (ha), n é o número de acionamentos do sistema dentro da célula, $\overline{t_i}$ é o tempo médio de aplicação em cada célula (h) e i é o número da célula.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização dos fertilizantes

A caracterização física dos fertilizantes avaliados foi realizada por meio da determinação da massa específica, teor de água, ângulo de repouso e granulometria. Os resultados obtidos para ureia, cloreto de potássio e NPK 06-36-0 estão apresentados na Tabela 3, enquanto os dados detalhados das determinações experimentais podem ser consultados no Apêndice I**.**

Tabela 3 – Classificação físicas dos fertilizantes utilizados no experimento. Fonte: Autor (2025).

Fertilizante	Massa específica (kg/m³)	Teor de água (%)	Ângulo de repouso (graus)	Classificação Granulométrica
Cloreto de Potássio	1020, 07	0,61	40,70	Granulado
Ureia	775,28	0,79	39,00	Granulado
NPK 06-36-00	1160,31	1,20	41,50	Granulado

Os valores obtidos para massa específica e ângulo de repouso situam-se dentro das faixas reportadas na literatura para fertilizantes granulados comerciais (Mendonça et al., 2023; Mohallem et al., 2008), indicando que os materiais avaliados apresentam comportamento físico compatível com aplicações volumétricas. Essa similaridade reforça a representatividade dos ensaios conduzidos.

Observou-se variação da massa específica entre os fertilizantes avaliados. O NPK 06-36-0 apresentou o maior valor (1160,31 kg m^{-3}), seguido do cloreto de potássio (KCl) (1020,07 kg m^{-3}), enquanto a ureia apresentou a menor massa específica (775,28 kg m^{-3}). Essas diferenças indicam variações no empacotamento e a densidade aparente das partículas, sendo relevantes para o desempenho de mecanismos volumétricos, uma vez que, para um mesmo volume deslocado pelo dosador, fertilizantes com maior massa específica tendem a resultar em maior massa aplicada.

Quanto ao teor de água, os fertilizantes apresentaram valores entre 0,61% (KCl) e 1,20% (NPK 06-36-0), enquanto a ureia apresentou valor intermediário (0,79%). Embora a variação entre os materiais tenha sido pequena, o teor de água constitui parâmetro relevante para o comportamento de escoamento, uma vez que o aumento da umidade intensifica forças de coesão entre partículas por formação de pontes capilares, reduzindo a fluidez e favorecendo a formação de aglomerados. Além disso, fertilizantes com maior higroscopicidade, como a ureia, apresentam maior sensibilidade à umidade ambiental, podendo absorver água mesmo em condições de baixa umidade relativa, o que potencializa fenômenos de caking e alterações no comportamento de fluxo.

Em relação ao ângulo de repouso, os fertilizantes apresentaram valores próximos, porém com diferenças perceptíveis: a ureia apresentou 39,0°, o KCl 40,7° e o NPK 06-36-0 41,5°. Valores mais elevados estão associados a menor fluidez e maior tendência de estabilidade do material em pilha, o que pode dificultar o escoamento por gravidade e aumentar o risco de formação de zonas de menor mobilidade no reservatório. Considerando que o mecanismo desenvolvido depende do enchimento gravitacional das canelas do rotor, a manutenção de ângulos de repouso dentro de faixas típicas para fertilizantes granulados contribui para a regularidade do processo de dosagem.

Por fim, quanto à classificação granulométrica, observou-se que ureia, KCl e NPK 06-36-0 foram classificados como fertilizantes granulados, apresentando predominância de partículas em faixa típica para esse tipo de produto. Esse resultado indica que os materiais apresentaram predominância de partículas em faixa compatível com fertilizantes granulados, o

que é relevante para sistemas de dosagem, pois afeta a fluidez e a regularidade de alimentação do mecanismo.

5.2. Calibração da dosagem de fertilizante em função do ângulo de revolução do mecanismo dosador

A Tabela 4 apresenta a massa média dosada, desvio-padrão e o coeficiente de variação em função do ângulo de revolução, obtida a partir das três repetições, e os valores detalhados de cada repetição podem ser consultados no Apêndice II**.**

A calibração do mecanismo dosador evidenciou que a massa de fertilizante aplicada aumentou com o incremento do ângulo de revolução para os três materiais avaliados (ureia, cloreto de potássio (KCl) e NPK 06-36-0, confirmando a capacidade do protótipo em responder ao comando de rotação dentro da faixa experimental analisada.

Embora a tendência de aumento tenha sido comum aos três fertilizantes, verificou-se que a massa dosada para um mesmo ângulo foi distinta entre os materiais, indicando influência direta das propriedades físicas no desempenho do dosador. No maior ângulo avaliado (1080°), as massas médias coletadas foram aproximadamente 141 g para o KCl, 107 g para a ureia e 158 g para o NPK 06-36-0, com maior taxa de dosagem observada para o NPK, seguido do KCl, enquanto a ureia apresentou os menores valores.

Essa diferença está diretamente associada à variação da massa específica entre os fertilizantes, uma vez que, em sistemas volumétricos, a massa aplicada é função do volume deslocado pelo rotor e da massa específica do material. Assim, para um mesmo deslocamento angular, fertilizantes com maior massa específica tendem a resultar em maior massa aplicada, como observado para o NPK 06-36-0. Tal comportamento reforça a necessidade de calibração específica para cada produto, conforme destacado na literatura para mecanismos de dosagem de fertilizantes sólidos (Mendonça et al., 2023).

Além disso, a resposta progressiva e consistente do sistema ao aumento do ângulo de revolução indica boa previsibilidade do mecanismo, característica fundamental para aplicações em taxa variável, nas quais a dose aplicada depende diretamente da precisão do controle angular. Esse padrão de proporcionalidade entre deslocamento angular e massa dosada também foi observado por Quintão (2025) em mecanismo helicoidal elétrico, sugerindo que a linearidade é uma característica comum a sistemas volumétricos acionados eletricamente quando adequadamente calibrados.

Em relação à variabilidade experimental, a repetibilidade foi avaliada por meio da dispersão dos dados entre repetições, utilizando-se indicadores como desvio-padrão e coeficiente de variação (CV) (Montgomery, 2017). Observou-se baixa variabilidade relativa ao longo da maior parte dos ângulos avaliados, evidenciada por desvios-padrão reduzidos e valores de CV compatíveis com estabilidade operacional em sistemas de dosagem volumétrica.

Nos menores ângulos, entretanto, verificaram-se oscilações relativamente mais perceptíveis, atribuídas ao menor volume total aplicado nessas condições. Como a massa dosada é inferior, pequenas variações absolutas tornam-se proporcionalmente mais representativas, elevando a variabilidade relativa dos resultados. Esse comportamento é esperado quando o sistema opera próximo aos limites inferiores da faixa de aplicação, onde a influência de pequenas flutuações no enchimento volumétrico tende a ser ampliada.

Tabela 4 – Ângulos de revolução programados no ensaio de dosagem. Fonte: Autor (2025).

Ângulo (°)	KCl			Ureia			NPK 06-36-0		
	Média (g)	Desvio-padrão (g)	CV (%)	Média (g)	Desvio-padrão (g)	CV (%)	Média (g)	Desvio-padrão (g)	CV (%)
22	4,66	0,4	8,63	2,51	0,18	7,06	3,63	0,07	1,93
45	7,09	0,28	3,92	5,52	0,57	10,3	7,52	0,35	4,68
90	13,03	0,43	3,29	9,59	0,65	6,78	14,97	0,94	6,29
135	20	0,73	3,65	14,32	0,24	1,65	21,57	2,03	9,42
180	24,99	0,6	2,4	18,52	0,19	1,03	27,88	1,14	4,09
225	31,64	0,9	2,84	22,97	1,24	5,39	34,77	1,02	2,94
270	36,8	0,38	1,04	27,07	0,17	0,63	41,24	0,42	1,03
315	41,63	0,78	1,87	33,21	1,08	3,25	47,5	1,29	2,72
360	48,6	0,48	0,98	37,07	0,42	1,13	55,3	1,2	2,18
480	63,12	0,79	1,26	48,36	0,63	1,3	72,53	0,99	1,37
720	96,22	1,66	1,72	72,85	0,23	0,32	106,51	0,5	0,47
900	119,52	0,54	0,45	91,37	1,05	1,15	137,24	0,13	0,09
1080	141,2	0,93	0,66	107,27	0,9	0,84	158,47	2,19	1,38

Para obtenção das curvas de calibração, ajustaram-se modelos de regressão linear relacionando a massa dosada ao ângulo de revolução, considerando o conjunto completo de dados experimentais. Os resultados evidenciaram comportamento linear consistente dentro da faixa operacional avaliada, indicando proporcionalidade direta entre deslocamento angular do rotor e massa aplicada, característica esperada em mecanismos de dosagem volumétrica.

Os elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 0,99$) demonstram que a variação da massa dosada é predominantemente explicada pelo ângulo de revolução, com baixa influência de fatores aleatórios nas condições laboratoriais. Esse desempenho confirma a estabilidade do sistema e a previsibilidade da resposta do mecanismo, permitindo a utilização das equações ajustadas como ferramentas confiáveis de calibração e controle da dose aplicada (Figura 10).

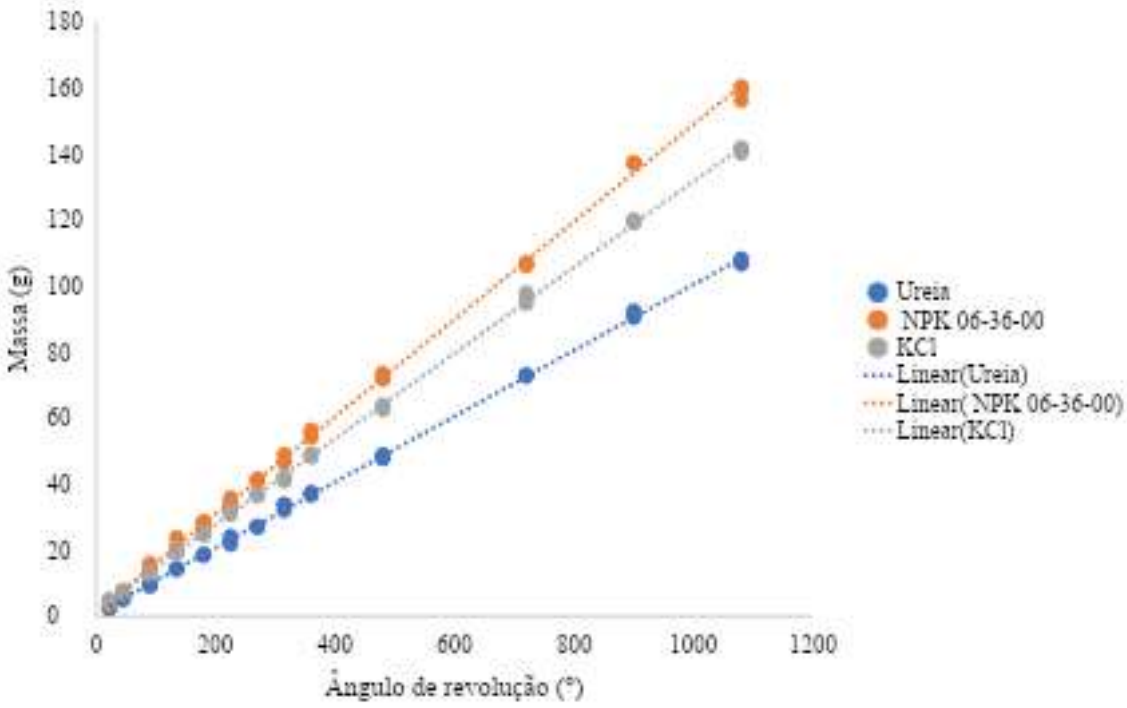

Figura 10 – Gráficos de dispersão dos fertilizantes ureia, KCl e NPK 06-36-0. Fonte: Autor (2025).

5.3. Investigação dos fatores que influenciam a massa de fertilizante dosada

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para a massa dosada de KCl, considerando os fatores dose prescrita, inclinação transversal e nível de enchimento do reservatório, estão apresentados na Tabela 5, enquanto os dados detalhados do experimento encontram-se no Apêndice III**.**

Tabela 5 – Resumo da ANOVA para a massa dosada (efeitos principais e interações). Fonte: Autor (2025).

	Soma de Quadrados	GL	Quadrado médio	F calculado	p
Dose	285279.6	4	71319.90		
Inclinacao	796.7	2	398.34		
Enchimento	75.4	2	37.70		
Dose ✻ Inclinacao	379.1	8	47.38	9.290	<.001
Dose ✻ Enchimento	60.3	8	7.54	1.478	0.176
Inclinacao ✻ Enchimento	89.3	4	22.33	4.378	0.003
Dose ✻ Inclinacao ✻ Enchimento	57.8	16	3.61	0.708	0.779
Resíduos	459.1	90	5.10		

Inicialmente, avaliou-se a interação tripla (Dose × Inclinação × Enchimento), a qual não apresentou efeito significativo (p = 0,779). Esse resultado indica ausência de dependência hierárquica entre as interações de segunda ordem, ou seja, os efeitos das interações duplas mantêm comportamento consistente entre os níveis do terceiro fator. Dessa forma, a interpretação dos resultados pode ser conduzida com base nas interações de segunda ordem, sem necessidade de desdobramento da interação tripla.

Na sequência, foram examinadas as interações duplas. Observou-se efeito significativo para Dose × Inclinação (p < 0,001) e para Inclinação × Enchimento (p = 0,003), enquanto a interação Dose × Enchimento não foi significativa (p = 0,176). Esse resultado indica que o efeito da dose prescrita não varia em função do nível de enchimento do reservatório, mantendo comportamento semelhante entre os diferentes volumes de fertilizante avaliados.

A significância da interação Dose × Inclinação evidencia que a resposta do mecanismo às diferentes doses depende da condição de inclinação transversal do equipamento. Assim, o incremento da dose prescrita não resulta em aumento uniforme da massa aplicada sob todas as inclinações avaliadas.

O desdobramento da interação Dose × Inclinação, por meio das médias marginais estimadas (Tabela 6), mostrou que houve aumento progressivo da massa dosada com o incremento da dose prescrita em todas as inclinações, evidenciando comportamento consistente

do mecanismo ao longo da faixa operacional. Entretanto, a partir da dose de 75 g, a inclinação de 30° promoveu redução significativa da massa aplicada em comparação às inclinações de 0° e 15°, as quais não diferiram entre si na maioria das doses.

Tabela 6 – Médias marginais estimadas da massa dosada (g) em função da dose e da inclinação transversal. Fonte: Autor (2025).

Dose (g)	0°	15°	30°
5	5,58 a	5,62 a	5,03 a
40	38,83 a	38,36 a	36,34 a
75	73,38 a	71,93 a	66,62 b
110	106,35 a	104,08 a	99,49 b
145	140,38 a	136,92 a	128,31 b

Médias seguidas por pelo menos uma mesma letra minúscula numa mesma linha não difere entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Esse comportamento indica que o mecanismo manteve estabilidade operacional sob inclinações moderadas, até 15°, não havendo comprometimento significativo da massa aplicada. Em contraste, na inclinação de 30°, observa-se redução da eficiência de dosagem, especialmente nas maiores doses, quando a demanda volumétrica do sistema é mais elevada. Sob o ponto de vista físico, esse efeito pode estar associado à redistribuição do fertilizante no interior do reservatório, alterando o padrão de alimentação do rotor e reduzindo o enchimento efetivo das cavidades em condição de maior desvio angular.

Além da interação Dose × Inclinação, verificou-se também efeito significativo para Inclinação × Enchimento ($p = 0,003$). As médias marginais estimadas (Tabela 7) indicaram que a inclinação de 30° resultou em uma tendência na redução da massa aplicada em todos os níveis de enchimento avaliados. Por outro lado, as inclinações de 0° e 15° não diferiram entre si, independentemente da altura da coluna de fertilizante no reservatório.

Tabela 7 – Médias marginais estimadas da massa dosada (g) em função da inclinação transversal e do nível de enchimento do reservatório. Fonte: Autor (2025).

Enchimento (%)	0°	15°	30°
25	72,7 a	70,3 a	68,5 b
50	72,6 a	71,1 a	64,9 b
75	73,4 a	72,7 a	68,1 b

Médias seguidas por pelo menos uma mesma letra minúscula numa mesma linha não difere entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Esse resultado demonstra que, embora o nível de enchimento influencie a dinâmica interna do material granular, o efeito da inclinação torna-se relevante apenas em condição angular mais acentuada. Até 15°, a pressão exercida pela coluna de material mostrou-se suficiente para manter o enchimento adequado das cavidades do mecanismo, mesmo sob diferentes níveis de reservatório. Em 30°, a redistribuição lateral do leito granular pode reduzir a alimentação simétrica do rotor, comprometendo parcialmente a regularidade da dosagem.

Em termos operacionais, ainda que a inclinação de 30° tenha apresentado efeito estatisticamente significativo, trata-se de condição angular limite, pouco frequente durante a aplicação manual em campo, mesmo em áreas montanhosas. Assim, os resultados indicam que o mecanismo apresenta desempenho satisfatório nas condições normalmente encontradas na agricultura de montanha, reforçando sua viabilidade para aplicação manual de fertilizantes granulados.

5.4. Avaliação da precisão e exatidão do mecanismo dosador em laboratório

O terceiro experimento teve como objetivo avaliar a precisão e a exatidão da massa depositada pelo mecanismo dosador do protótipo em condições controladas de laboratório. A precisão foi quantificada por meio do coeficiente de variação (CV) das massas aplicadas em repetições sucessivas, enquanto a exatidão foi determinada pelo desvio percentual (d) entre a massa média aplicada e a massa prescrita.

Os dados referentes às 10 repetições do ensaio encontram-se no Apêndice IV, e os indicadores calculados são apresentados de forma resumida na Tabela 6. Observou-se massa média depositada de 75,63 g, com desvio-padrão de 0,96 g e coeficiente de variação de 1,27%, indicando baixa dispersão entre as aplicações e, portanto, boa repetibilidade do mecanismo. De

acordo com Mohallem et al. (2008), valores de CV inferiores a 10% são indicativos de boa uniformidade em sistemas de aplicação de fertilizantes sólidos. Assim, o valor obtido neste estudo (1,27%) situa-se em faixa considerada de alta precisão, evidenciando estabilidade operacional do mecanismo nas condições avaliadas.

Quanto à exatidão, o erro percentual em relação à massa prescrita (75 g) foi de +0,84%, indicando elevada proximidade entre a dose programada e a efetivamente aplicada, com discreta tendência à superdosagem. Esse valor situa-se em faixa reduzida quando comparado à variabilidade normalmente observada em aplicações manuais convencionais, evidenciando desempenho consistente do mecanismo em condições controladas. A leve tendência à superdosagem pode estar associada não apenas a pequenas variações no enchimento das cavidades do rotor, mas também à dinâmica de resposta do sistema eletromecânico, uma vez que o comando de interrupção do motor é realizado com base na leitura do encoder. Nesse processo, pode ocorrer pequeno retardo entre a detecção do ângulo programado e a desaceleração efetiva do rotor, em função da inércia mecânica do conjunto.

De modo geral, os resultados demonstram que o mecanismo dosador apresenta elevada precisão e exatidão em condições controladas, atendendo aos requisitos para aplicação localizada de fertilizantes à taxa fixa e variável, constituindo base confiável para operação em campo.

Tabela 8 – Precisão e exatidão da massa dosada (KCl; dose prescrita = 75 g; n = 10). Fonte: autor (2025).

Variável	Valor
Dose prescrita (g)	75,00
Massa média aplicada (g)	75,63
Desvio-padrão (g)	0,96
CV (%)	1,27
Erro percentual, e (%)	+0,84

5.5. Desempenho da adubadora costal em campo

A Tabela 7 apresenta os valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação das massas coletadas para cada dose avaliada em campo. Os dados completos do experimento de campo, registrados pela unidade de controle eletrônico, bem como as massas de fertilizante coletadas em cada bandeja, encontram-se apresentados no Apêndice V.

Os resultados do ensaio de campo indicam que o protótipo apresentou desempenho consistente na aplicação localizada de fertilizante com variação automática de dose entre células georreferenciadas. As massas médias coletadas nas bandejas foram próximas às doses prescritas para a maioria dos tratamentos.

Tabela 9 – Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação das massas coletadas. Fonte: Autor (2025).

Dose prescrita (g)	Massa média (g)	Desvio padrão (g)	Coeficiente de variação (%)
80	79,74	2,21	2,77
110	109,94	2,15	1,96
20	21,60	9,75	45,15
50	51,22	2,57	5,02
140	141,76	3,30	2,32

Para as doses de 80 g, 110 g, 50 g e 140 g, as médias obtidas foram 79,74 g, 109,94 g, 51,22 g e 141,76 g, correspondendo a erros relativos de −0,32%, −0,05%, 2,44% e 1,25%, respectivamente. Os coeficientes de variação foram inferiores a 6%, indicando boa uniformidade de aplicação e estabilidade do mecanismo dosador em condições de campo, mesmo em relevo montanhoso.

A dose de 20 g apresentou maior variabilidade, com média de 21,60 g, erro relativo de 7,98% e coeficiente de variação de 45,15%. Essa maior dispersão está associada à baixa massa aplicada por acionamento, condição na qual pequenas variações absolutas no fluxo do fertilizante ou no tempo de resposta do sistema resultam em elevado impacto percentual sobre a massa final coletada. Em aplicações de baixo volume, o coeficiente de variação tende a ser amplificado estatisticamente, não necessariamente indicando instabilidade estrutural do mecanismo, mas maior sensibilidade proporcional do indicador.

A análise espacial das doses aplicadas mostrou que a transição automática entre células ocorreu de forma adequada, sem evidências de atraso significativo ou sobreposição entre prescrições distintas. Os registros da unidade de controle eletrônico indicaram consistência entre dose prescrita, número de pulsos e posição geográfica, confirmando a confiabilidade do sistema embarcado.

Além da avaliação da precisão de dosagem, a capacidade operacional efetiva do protótipo foi estimada a partir do tempo médio entre acionamentos registrado pela unidade de controle eletrônico e das áreas correspondentes a cada célula (Tabela 8).

Tabela 10 – Capacidade operacional correspondentes a cada célula. Fonte: Autor (2025).

Dose (g)	**Área (m²)**	**Tempo médio entre acionamentos (ms)**	**Capacidade Operacional (ha/h)**
80	998	4643,55	3,36
110	847	5108,30	2,60
20	468	3569,88	2,05
50	387	3804,92	1,59
140	682	5813,85	1,84

A maior capacidade ocorreu na célula de 80 g (3,36 ha·h^{-1}), associada à maior área (998 m²) combinada a um intervalo médio entre acionamentos relativamente baixo (≈4,64 s), resultando em maior área coberta por unidade de tempo. Em contrapartida, as menores capacidades foram observadas nas doses de 50 g (1,59 ha·h^{-1}) e 140 g (1,84 ha·h^{-1}), condições em que a razão $A_i/\underline{t_i}$ foi reduzida — seja por área reduzida (387 m² no caso de 50 g) e/ou por maior tempo médio entre acionamentos (≈5,81 s no caso de 140 g).

Do ponto de vista operacional, esses resultados indicam que a capacidade do conjunto em campo é fortemente condicionada pela dinâmica de deslocamento e pela configuração espacial das células/pontos, além de fatores de operação (trajetória, necessidade de ajuste de posicionamento e eventuais obstáculos), e não por uma relação direta com a dose prescrita. Em termos práticos, a faixa obtida é compatível com aplicação pontual guiada e sugere que o sistema embarcado consegue manter cadência de acionamento e cobertura mesmo com mudança automática de doses, com variações atribuídas majoritariamente ao tempo de deslocamento entre pontos e à geometria/área efetiva de cada célula.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do mecanismo dosador de fertilizante proposto neste trabalho demonstrou a viabilidade técnica de uma solução compacta para aplicação de fertilizantes granulados à taxa fixa e variável, voltada a sistemas produtivos com restrições à mecanização convencional. A configuração adotada, com mecanismo dosador volumétrico acoplado ao reservatório e acionamento eletrônico, mostrou-se funcional e adequada ao controle da dosagem em condições controladas.

Os resultados obtidos evidenciaram que variáveis operacionais, como a altura da coluna de fertilizante e a inclinação de operação, influenciam a massa dosada, reforçando a importância do controle desses fatores em sistemas de aplicação volumétrica. Ainda assim, o desempenho observado indica que o equipamento apresenta potencial para aplicações localizadas de fertilizantes em equipamentos costais.

Como perspectiva de continuidade, recomenda-se o desenvolvimento de estratégias de compensação baseadas em sensores e algoritmos de correção, bem como a realização de ensaios em condições de campo, visando ampliar a robustez e a aplicabilidade do sistema em situações reais de uso.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADILET, S. et al. Investigation of the pin-roller metering device and tube effect for wheat seeds and granular fertilizers based on DEM. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 16, n. 2, 2023. DOI: 10.25165/j.ijabe.20231602.7721. Disponível em: https://www.ijabe.net.

ADILET, S. et al. Investigation of the pin-roller metering device and tube effect for wheat seeds and granular fertilizers based on DEM. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 16, n. 2, 2023. DOI: 10.25165/j.ijabe.20231602.7721. Disponível em: https://www.ijabe.net/cn/article/pdf/preview/10.25165/j.ijabe.20231602.7721.pdf.

ALAMEEN, A. A. et al. Development and performance evaluation of a control system for variable rate granular fertilizer application. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 160, p. 31–39, 2019.

ALCARDE, J. C. et al. Avaliação da higroscopicidade de fertilizantes e corretivos. *Scientia Agricola*, v. 49, n. 1, p. 137–144, 1992.

AL-GAADI, K. A. Control and monitoring systems used in variable rate application of solid fertilizers: a review. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 2023. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/s1018364723000368.

BEARD, R. J. et al. Soil acidification resulting from the over-application of N fertilizers. *Soil Science Society of America Journal*, v. 82, n. 2, 2018.

BECKER, R. S. et al. Influência das características físicas de fertilizantes sólidos sobre a taxa de aplicação em dosador helicoidal. *Energia na Agricultura*, v. 36, n. 2, p. 183–192, 2021.

BHATT, A. et al. Changes in physiological parameters of bullocks during agricultural field operations and their field efficiency in mountain agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v. 9, n. 4, p. 3001–3005, 2020. DOI: 10.20546/ijcmas.2020.904.351.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa nº 61, de 8 de julho de 2020. Brasília, DF: MAPA, 2020.

BUENO-DELGADO, M. V. et al. Ecofert: an Android application for the optimization of fertilizer cost in fertigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 121, p. 32–42, 2016.

CARVALHO, V. L. et al. Manejo de doenças do cafeeiro. In: REBELES, P. R.; CUNHA, R. L. (org.). *Café arábica – do plantio à colheita*. Lavras: Epamig, 2010. p. 689–756.

CONVEYOR EQUIPMENT MANUFACTURERS ASSOCIATION (CEMA). Engineering Standard 351-1: Screw Feeders. Naples: CEMA, 2007.

COELHO, A. L. F. et al. Adubadora costal à taxa variável e método de controle. Depositante: Universidade Federal de Viçosa. Patente BR 102021010413-9 A2. Depósito: 28 maio 2021. Publicação: 13 dez. 2022. Disponível em: https://busca.inpi.gov.br.

COELHO, A. L. F. et al. An open-source spatial analysis system for embedded systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 154, p. 289–295, 2018. DOI: 10.1016/j.compag.2018.09.030.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB); *Agro-in-Data/Insper*. Dependência de importações e custos com fertilizantes na agricultura brasileira: participação dos fertilizantes nos custos de produção do café (2023). Agro-in-Data – Insper, 2025. Dados da Companhia Nacional de Abastecimento e análise sobre custos.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Safra dos Cafés do Brasil – Região Sudeste responde por 86,72 % da produção nacional em 2025. Brasília, 29 jan. 2025a. Disponível em: https://www.gov.br/conab. Acesso em: 26 fev. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Com maior safra de conilon, produção de café é estimada em 56,5 milhões de sacas em 2025. Brasília, 04 dez. 2025b. Disponível em: https://www.gov.br/conab. Acesso em: 26 fev. 2026.

DUN, G. et al. Design and experiment of an electric control spiral-pushing feed mechanism for field fertilizer applicator. *Applied Sciences*, v. 13, n. 23, 12628, 2023. DOI: 10.3390/app132312628. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/13/23/12628.

DUN, G. et al. Optimal design and experiment of electronically controlled inclined spiral fertilizer discharger based on EDEM simulation. *Agriculture*, v. 14, n. 7, 1131, 2024. DOI: 10.3390/agriculture14071131. Disponível em: https://www.mdpi.com/2077-0472/14/7/1131.

FARAH, S. et al. Physical and mechanical properties of PLA and their functions in widespread applications — A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, v. 107, p. 367–392, 2016.

FERREIRA, M. F. P. et al. Uniformidade de vazão de fertilizantes por dosadores helicoidais em função do nivelamento longitudinal. *Engenharia na Agricultura*, v. 18, n. 4, p. 297–304, 2010.

FRANCK, C. J. et al. Modelos estatísticos para seleção de dosadores helicoidais com diferentes dispositivos de descarga de fertilizante. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 5, p. 512–518, 2015.

GALVÃO, C. B. et al. Fertilizer metering mechanism with helical conic cylindrical thread for family agriculture. Engenharia Agrícola, v. 38, n. 6, p. 934-940, 2018.

GARCIA, A. P. et al. Electrically driven fertilizer applicator controlled by fuzzy logic. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 3, p. 510–522, 2014.

JESTR – Journal of Engineering Science and Technology Review. Design and performance of grooved-wheel feeders for granular materials. v. 11, n. 6, p. 1-10, 2018. Disponível em: https://www.jestr.org. Acesso em: 01 mar. 2026.

MARTINS, M. M. Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

MENDONÇA, W. S. et al. A method for verifying the uniformity in fertilizer dispenser flow. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 44, n. 3, p. 1067–1076, 2023. DOI: 10.5433/1679-0359.2023v44n3p1067. Disponível em: https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/47708.

MIALHE, L. G. Máquinas agrícolas: ensaios & certificação. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996.

MIRZAKHANINAFCHI, H. et al. Design and development of a variable rate applicator for real-time application of fertilizer. *Sustainability*, Basel, v. 13, n. 16, p. 8694, 2021. DOI: 10.3390/su13168694. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/13/16/8694.

MOHALLEM, D. F. et al. Avaliação do coeficiente de variação como medida da precisão em experimentos. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/j/abmvz/a/mpgdfysyvhbkw4q7fkr4rwr/.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte II: diagnóstico, aplicação localizada e considerações econômicas. *Engenharia Agrícola*, v. 17, n. 2, p. 108–121, 1997.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments.* 9th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2017.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. *Las máquinas agrícolas y su aplicación*. 6. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2003.

PAWASE, P. P. et al. Variable rate fertilizer application technology for nutrient management in precision agriculture: a review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 16, n. 4, 2023. Disponível em: https://www.ijabe.net/cn/article/pdf/preview/10.25165/j.ijabe.20231604.7671.pdf.

POWDER & BULK SOLIDS. Rotary airlock valve principles and rotor design. Disponível em: https://www.powderbulksolids.com/valves-gates-airlocks/rotary-airlock-valve-principles-and-rotor-design. Acesso em: 25 fev. 2026.

QUINTÃO, I. R. et al. Portable machine with embedded system for applying granulated fertilizers at variable rate. *Agriculture*, v. 15, 361, 2025. DOI: 10.3390/agriculture15040361.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Version 4.4. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: https://cran.r-project.org. Acesso em: 10 nov. 2025.

REYNALDO, É. F. et al. Avaliação de mecanismos dosadores de fertilizantes helicoidais em ângulos de nivelamento longitudinal e transversal. *Energia na Agricultura*, v. 30, n. 2, p. 125–136, 2015.

ROMERO, J. C. P. Café de montanha perfaz cerca de 40 % da produção brasileira. *Visão Agrícola*, ESALQ-USP, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va12-ambiente-e-producao03.pdf.

SOUSA, E. D. T. S. Estabilidade espaço-temporal de atributos físicos e químicos do solo em área cultivada com café para definição de classes de manejo. 2015. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

SOUSA, E. D. T. S. et al. Development of a portable multisensor platform for soil mapping. *Revista Ciência Agronômica*, v. 54, 2023. DOI: 10.5935/1806-6690.20230008.

SPAGNOLO, R. T. et al. Models for predicting the performance of fertilizer metering in seed cum fertilizer drill. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, n. 1, p. 51–57, 2021.

SUDDUTH, K. A. Engineering technologies for precision farming. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON AGRICULTURAL MECHANIZATION TECHNOLOGY FOR PRECISION FARMING, 1999, Suwon. Anais [...]. Suwon, 1999.

SUGIRBAY, A. M. et al. Determination of pin-roller parameters and evaluation of the uniformity of granular fertilizer application metering devices in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 179, 105835, 2020. Disponível em: https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020ceagr.17905835s/abstract.

THE JAMOVI PROJECT. Jamovi (Version 2.6) [Computer software]. Sydney: The jamovi project, 2024. Disponível em: https://www.jamovi.org. Acesso em: 10 nov. 2025.

THIAGO, J. A. de O. et al. A dependência do agronegócio brasileiro em relação aos fertilizantes importados. *Informe Gepec*, v. 27, n. 1, p. 363–383, 2023.

TROIANO, S. et al. Better richer than environmentally friendly? Describing preferences toward and factors affecting precision agriculture adoption in Italy. *Agricultural and Food Economics*, v. 11, n. 1, 2023.

UMEZU, C. K et al. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de controle para compensar a variação na rotação de acionamento dos dosadores de fertilizantes sólidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, 2006.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Foreign Agricultural Service. *Coffee: World Markets and Trade*. Washington, DC: USDA, 2024. Disponível em: https://www.fas.usda.gov.

VAN LOON, J. et al. Precision for smallholder farmers: a small-scale tailored variable rate fertilizer application kit. Agriculture (MDPI), v. 8, n. 4, 48, 2018.

VILLAR, P. M. D. et al. Fatores de eficiência das culturas agrícolas no Brasil: uma comparação com os Estados Unidos e França nos casos de soja, milho e arroz. Informações Econômicas, São Paulo, v. 34, n. 11, p. 22-35, nov. 2004.

WERNER, V. et al. Aplicação de fertilizantes à taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 293–304, 2007.

WIGGENHAUSER, M. et al. Using isotopes to trace freshly applied cadmium through mineral phosphorus fertilization. Science of The Total Environment, v. 648, p. 779-786, 2019.

WILLIAMS, P. et al. Mapping the mountainous climate in the Matas de Minas region, Brazil which influences the top-quality coffee beverages. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 12, 2022.

ZAMBOLIM, L. et al. Epidemiologia e controle integrado da ferrugem do cafeeiro. In: ZAMBOLIM, L. (org.). *O estado da arte de tecnologias na produção de café*. Viçosa: UFV, 2002. p. 369–450.

ŻENKIEWICZ, M. Methods of degradation of plastics and evaluation of the degree of degradation. *Polymer Degradation and Stability*, v. 122, p. 177–189, 2016.

ZIMMERMANN, G. G. et al. Distribution of granulated fertilizers in dispensers mounted with single and double helicoidal. *Ciência Rural*, 2024. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/zsfzcrjb7w7dmzjk9sp68xh/.

ZIMMERMANN, G. G. et al. Fertilizer deposition as a function of angular velocity and inclination of the helical dosing mechanism. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 26, n. 3, p. 226-235, 2022.

APÊNDICE A – RESULTADOS DETALHADOS DA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS FERTILIZANTES

- **Massa Específica**

	Cloreto de Potássio	Ureia	NPK 06-36-00
A1 (g)	502,08	386,43	563,74
Massa específica 1 (kg/m^3)	1004,16	772,86	1127,48
A2 (g)	514,96	391,07	603,46
Massa específica 2 (kg/m^3)	1029,92	782,14	1206,92
A3 (g)	513,07	385,42	573,26
Massa específica 3 (kg/m^3)	1026,14	770,84	1146,52
Média: Massa específica (kg/m^3)	1020,07	775,28	1160,31

*A1, A2 e A3 representam a massa do fertilizante em 500ml.

- **Teor de Água**

	Cloreto de Potássio	Ureia	NPK 06-36-00
A1 (g) - Inicial	107,9	86,43	104,80
A2 (g) - Inicial	110,5	88,94	108,60
A3 (g) - Inicial	115,39	91,84	106,30
Média: Massa inicial	111,26	89,07	106,57
A1 (g) – Após 24h	107,25	85,76	103,54
A2 (g) - Após 24h	109,89	88,15	107,30
A3 (g) - Após 24h	114,63	91,21	105,02
Média: Massa após 24h	110,59	88,37	105,29
Umidade (%)	0,61	0,78	1,20

- **Ângulo de repouso**

	Cloreto de Potássio	**Ureia**	**NPK 06-36-00**
Altura inicial (cm)	12,2	12,2	12,2
Altura final 1 (cm)	10,5	11	9,5
Ângulo de Repouso 1 (°)	40,72	42,04	37,91
Altura final 2 (cm)	11	9,5	12
Ângulo de Repouso 2 (°)	42,04	37,91	44,53
Altura final 3 (cm)	10	9,2	11
Ângulo de Repouso 3 (°)	39,34	37,02	42,04
Média: Ângulo de Repouso (°)	40,70	38,99	41,50

- **Granulometria**

Peneiras para classificação de material granulado

	A1 (g)				A2 (g)				A3 (g)			
Peneira (mm)	**4,8**	**2**	**1**	**fundo**	**4,8**	**2**	**1**	**fundo**	**4,8**	**2**	**1**	**fundo**
Cloreto de Potássio	0,22	112,87	6,21	5,7	0	112,99	7,19	4,82	0	108,4	7,41	9,19
Ureia	0,35	115,76	6,68	2,21	0,63	117,11	5,98	1,28	0,19	107,87	10,74	6,2
NPK 06-36-00	0,6	104,2	17,1	3,1	0,4	106,8	15,6	2,2	0,7	102,9	18,5	2,9

*Cada amostra foi de 125g, conforme IN n°61 do MAPA.

	Média (g)				Média Retido (g)				Média Passante			
Peneira (mm)	**4,8**	**2**	**1**	**fundo**	**4,8**	**2**	**1**	**fundo**	**4,8**	**2**	**1**	**fundo**
Cloreto de Potássio	0,07	111,42	6,94	6,57	0,06	89,14	5,55	5,26	99,94	10,8	5,25	0
Ureia	0,39	113,58	7,8	3,23	0,31	90,86	6,24	2,58	99,69	8,83	2,59	0
NPK 06-36-00	0,57	104,63	17,07	2,73	0,46	83,7	13,66	2,19	99,54	15,84	2,18	0

Tolerâncias de material passante para classificação de granulado

4,8 mm	Min, 95%	2 unidades para menos
2 mm	Máx, 40%	5 unidades para mais
1 mm	Máx, 5%	1 unidade para mais

APÊNDICE B – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA DOSAGEM DE FERTILIZANTE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE REVOLUÇÃO DO MECANISMO DOSADOR

- **Massa dosada em cada ângulo**

Ângulo (°)	Repetição 1			Repetição 2			Repetição 3		
	KCl	Ureia	NPK 06-36-0	KCl	Ureia	NPK 06-36-0	KCl	Ureia	NPK 06-36-0
22	4,45	2,38	3,61	5,12	2,43	3,71	4,40	2,72	3,57
45	7,41	5,99	7,65	6,94	4,89	7,78	6,91	5,69	7,12
90	12,53	10,33	14,27	13,32	9,28	16,04	13,24	9,15	14,60
135	19,23	14,26	23,79	20,09	14,58	19,82	20,69	14,12	21,10
180	25,66	18,74	28,42	24,79	18,46	28,66	24,52	18,37	26,57
225	30,68	22,97	35,92	32,47	21,73	33,97	31,77	24,21	34,42
270	36,40	27,27	41,44	37,16	26,99	40,75	36,85	26,96	41,52
315	40,85	33,92	46,58	42,40	31,97	48,98	41,63	33,73	46,94
360	48,47	36,59	54,05	49,14	37,35	56,44	48,20	37,26	55,42
480	62,48	47,66	73,60	64,00	48,87	71,64	62,88	48,54	72,35
720	94,58	73,08	106,07	96,19	72,62	107,05	97,90	72,85	106,42
900	120,06	91,33	137,37	119,50	90,35	137,23	118,99	92,44	137,11
1080	141,80	106,65	160,43	140,13	108,31	156,10	141,66	106,86	158,88

APÊNDICE C – RESULTADOS DA INVESTIGAÇÃO DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A MASSA DE FERTILIZANTE DOSADA

- **Inclinação 0°:**

Repetição 1					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	4.58	39.86	68.40	107.42	141.25
50%	5.87	39.99	73.44	108.06	141.20
25%	06.05	39.10	69.93	106.07	141.16
Repetição 2					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	4.94	40.27	74.75	108.35	141.47
50%	4.67	36.84	74.04	105.27	138.77
25%	6.30	40.26	74.28	108.06	138.04
Repetição 3					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	6.43	35.81	78.40	107.41	141.85
50%	5.63	39.73	73.40	103.08	139.30
25%	5.79	37.63	73.74	103.39	140.38

- **Inclinação 15°:**

Repetição 1					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	6.48	38.75	71.95	106.93	138.28
50%	4.97	39.15	71.18	104.23	137.59
25%	05.07	38.68	73.10	104.34	131.03
Repetição 2					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	6.10	38.94	71.85	104.41	140.64
50%	5.81	36.51	72.02	103.86	133.16
25%	4.76	38.57	70.92	101.43	136.78
Repetição 3					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	5.18	38.33	72.45	107.56	142.14
50%	7.36	38.02	73.09	104.20	136.02
25%	05.03	38.31	70.79	99.77	136.64

- **Inclinação 30°:**

Repetição 1					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	4.81	36,74	67.74	98.85	129.45
50%	4.36	35.49	68.92	95.18	130.25
25%	4.69	36.95	70.33	102.40	133.63
Repetição 2					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	6.12	38,36	67.04	100.89	132.45
50%	4.89	30.60	64.93	94.80	129.60
25%	5.26	37.98	70.48	100.14	128.73
Repetição 3					
Enchimento	Dose (g)				
	5	40	75	110	145
75%	5.46	38,15	64.00	102.66	128.49
50%	4.35	34,04	56.18	98,82	120.96
25%	5.44	38.79	70	101.71	121.21

APÊNDICE D – RESULTADOS DA AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E EXATIDÃO DO MECANISMO DOSADOR EM LABORATÓRIO

Repetições	Massa dosada (g)
1	74,4
2	74,9
3	75,9
4	75,4
5	74,8
6	76,9
7	77,3
8	75,9
9	76,2
10	74,7

APÊNDICE E – MASSA COLETADA EM CADA BANDEJA E INFORMAÇÕES ARMAZENADAS NA UCE.

- **Massa coletada em cada bandeja:**

Badeja	1 (80g)	2 (110g)	3 (20g)	4 (50g)	5 (140g)
1	78,1	108,4	18,43	49,46	138,6
2	77,03	112,07	20,24	52,62	143,96
3	82,42	109,98	19,02	51,25	143,07
4	81,22	108,87	23,5	49,5	143,53
5	80,38	107,2	19,49	50,62	144,9
6	80,24	111,8	19	52,04	142,42
7	78,75	111,06	66	49,73	138,1
8	81,03	109,3	18,44	49,36	143,1
9	78,68	110,05	20,62	52,02	144,1
10	78,04	108,56	19,26	51,27	143,56
11	79,07	108,62	10,27	50,53	138,8
12	79,8	111,25	19,8	48,52	141,2
13	84,49	112,41	19,1	51,84	137,73
14	77,16	114,3	18,65	49,96	143
15	77,35	111,95	23,96	50,92	144,03
16	75,41	106,55	21,27	51,88	137,05
17	75,8	106,3	21,16	50,12	144,73
18	80,94	106,28	29,16	51,08	143,5
19	82,62	112,72	19,75	50,28	144,61
20	80,72	110,26	18,92	49,4	137,71
21	82,33	111,37	18,45	51,36	143,07
22	80,39	112,03	19,17	48,13	144,05
23	80,11	108,67	18,33	59,06	131,7
24	81,26	108,5	18,7	58,74	144,27

- **Informações armazenadas na UCE:**

Dose Configurada (g)	Pulsos Calculado (um)	Lat_Wgs84	Long_Wgs84	XUTM	YUTM	Tempo Dosagem (ms)	Intervalo Entre Início Aplicações (ms)	Tempo de deslocamento *(ms)
80	3370	-20,770033	-42,8708916	721651	7701842	1261	167231	
80	3370	-20,770027	-42,8708839	721652	7701843	1590	4483	3222
80	3370	-20,770025	-42,8708763	721653	7701843	1571	5377	3787
80	3370	-20,770023	-42,8708649	721654	7701843	1585	5730	4159
80	3370	-20,77002	-42,8708534	721655	7701844	1571	4999	3414
80	3370	-20,770016	-42,8708458	721656	7701844	1578	5192	3621
80	3370	-20,770006	-42,8708382	721657	7701845	1564	38339	36761
110	4660	-20,769812	-42,8704033	721703	7701866	1213	341456	339892
110	4660	-20,769804	-42,8703957	721703	7701867	2202	4809	3596
110	4660	-20,769798	-42,870388	721704	7701868	2212	5813	3611
110	4660	-20,769793	-42,8703842	721705	7701868	2192	5283	3071
110	4660	-20,769789	-42,8703728	721706	7701869	2212	5244	3052
110	4660	-20,769787	-42,8703651	721707	7701869	2292	5091	2879
20	790	-20,769739	-42,8702469	721719	7701874	100	333173	330881
20	790	-20,769733	-42,8702278	721721	7701875	376	6488	6388
20	790	-20,76973	-42,8702202	721722	7701875	385	3680	3304
20	790	-20,769722	-42,8702087	721723	7701876	378	3506	3121
20	790	-20,769718	-42,8702011	721724	7701876	406	3641	3263
20	790	-20,769711	-42,8701897	721725	7701877	392	3763	3357
20	790	-20,769705	-42,870182	721726	7701878	388	3509	3117
50	2080	-20,769623	-42,8700218	721743	7701887	787	214202	213814
50	2080	-20,769617	-42,8700104	721744	7701887	1006	3638	2851
50	2080	-20,769611	-42,8699951	721745	7701888	1016	4500	3494
50	2080	-20,769608	-42,8699875	721746	7701888	1022	4401	3385
50	2080	-20,769602	-42,8699799	721747	7701889	1019	4134	3112

50	2080	-20,769596	-42,8699684	721748	7701889	1018	3769	2750
140	5950	-20,769535	-42,8697739	721768	7701896	2581	281462	280444
140	5950	-20,769533	-42,8697662	721769	7701896	2884	5377	2796
140	5950	-20,769531	-42,8697548	721770	7701896	2963	5937	3053
140	5950	-20,769531	-42,8697434	721772	7701896	2947	5815	2852
140	5950	-20,769529	-42,8697357	721772	7701897	2901	5683	2736
140	5950	-20,769527	-42,8697205	721774	7701897	2882	5802	2901
140	5950	-20,769537	-42,8695793	721789	7701895	2584	222598	219716
140	5950	-20,769535	-42,8695908	721788	7701896	2850	5529	2945
140	5950	-20,769535	-42,8696022	721786	7701896	2869	5739	2889
140	5950	-20,769537	-42,8696137	721785	7701896	2880	5581	2712
140	5950	-20,769537	-42,8696251	721784	7701896	2810	6033	3153
140	5950	-20,769539	-42,8696327	721783	7701895	2722	6254	3444
50	2080	-20,769566	-42,8698463	721761	7701893	767	391450	388728
50	2080	-20,769567	-42,869854	721760	7701892	990	3145	2378
50	2080	-20,769567	-42,8698654	721759	7701892	991	3414	2424
50	2080	-20,769571	-42,8698769	721758	7701892	999	3638	2647
50	2080	-20,769577	-42,8698845	721757	7701891	1015	3929	2930
50	2080	-20,769579	-42,8698959	721756	7701891	990	4090	3075
20	790	-20,769707	-42,8701134	721733	7701877	231	245070	244080
20	790	-20,769711	-42,8701286	721731	7701877	382	3059	2828
20	790	-20,769714	-42,8701363	721730	7701877	384	2894	2512
20	790	-20,76972	-42,8701439	721730	7701876	398	3371	2987
20	790	-20,769724	-42,8701515	721729	7701876	383	3300	2902
20	790	-20,769733	-42,870163	721728	7701875	380	3827	3444
110	4660	-20,769823	-42,8703003	721713	7701865	2110	185734	185354
110	4660	-20,769827	-42,8703117	721712	7701864	2268	5050	2940
110	4660	-20,769833	-42,8703232	721711	7701864	2271	5406	3138
110	4660	-20,769836	-42,8703308	721710	7701863	2289	5585	3314
110	4660	-20,769806	-42,8702889	721714	7701867	1663	176145	173856

110	4660	-20,76981	-42,8703003	721713	7701866	2226	4166	2503
110	4660	-20,769817	-42,8703117	721712	7701865	2274	4685	2459
110	4660	-20,769823	-42,8703194	721711	7701865	2236	4963	2689
110	4660	-20,769829	-42,8703308	721710	7701864	2248	5055	2819
110	4660	-20,769835	-42,8703384	721709	7701864	2325	5129	2881
80	3370	-20,770006	-42,8706398	721678	7701845	1270	162188	159863
80	3370	-20,770014	-42,8706474	721677	7701844	1647	4259	2989
80	3370	-20,770018	-42,8706589	721676	7701844	1647	4200	2553
80	3370	-20,770023	-42,8706665	721675	7701843	1678	3940	2293
80	3370	-20,770021	-42,8706741	721674	7701843	1639	4547	2869
80	3370	-20,770025	-42,8706856	721673	7701843	1622	4462	2823
80	3370	-20,770075	-42,8706818	721673	7701837	1482	147781	146159
80	3370	-20,770071	-42,8706703	721674	7701838	1653	5012	3530
80	3370	-20,770065	-42,8706589	721676	7701838	1654	4356	2703
80	3370	-20,770063	-42,8706513	721676	7701839	1648	3973	2319
80	3370	-20,770058	-42,8706398	721678	7701839	1642	4367	2719
80	3370	-20,770052	-42,8706322	721678	7701840	1654	4041	2399
110	4660	-20,76984	-42,8703194	721711	7701863	1808	416610	414956
110	4660	-20,769838	-42,8703117	721712	7701863	2274	4186	2378
110	4660	-20,769831	-42,8703079	721712	7701864	2235	5324	3050
110	4660	-20,769827	-42,8703003	721713	7701864	2217	5227	2992
110	4660	-20,769825	-42,8702889	721714	7701865	2202	5772	3555
110	4660	-20,769821	-42,8702812	721715	7701865	2215	5194	2992
20	790	-20,769814	-42,8702202	721722	7701866	18	238774	236559
20	790	-20,769814	-42,8702164	721722	7701866	384	4554	4536
20	790	-20,769812	-42,8702087	721723	7701866	383	3843	3459
20	790	-20,769802	-42,8701973	721724	7701867	378	3523	3140
50	2080	-20,769798	-42,8701897	721725	7701867	997	3496	3118
50	2080	-20,769793	-42,870182	721726	7701868	1005	3474	2477
50	2080	-20,769785	-42,8701668	721727	7701869	988	4206	3201

20	790	-20,769819	-42,8702202	721722	7701865	297	56105	55117
20	790	-20,769814	-42,8702164	721722	7701866	390	2896	2599
50	2080	-20,76981	-42,8702011	721724	7701866	994	3011	2621
50	2080	-20,769804	-42,8701897	721725	7701867	995	4096	3102
50	2080	-20,769798	-42,8701782	721726	7701867	1015	4460	3465
20	790	-20,769707	-42,870285	721715	7701878	122	83752	82737
20	790	-20,769701	-42,8702736	721716	7701878	371	5304	5182
20	790	-20,769697	-42,870266	721717	7701879	389	3001	2630
20	790	-20,76969	-42,8702545	721718	7701879	378	3406	3017
20	790	-20,769686	-42,8702431	721719	7701880	383	3129	2751
20	790	-20,76968	-42,8702316	721721	7701881	373	3111	2728
50	2080	-20,769594	-42,8700371	721741	7701890	438	217266	216893
50	2080	-20,769588	-42,8700256	721742	7701890	989	3343	2905
50	2080	-20,769583	-42,870018	721743	7701891	1003	3527	2538
50	2080	-20,769577	-42,8700066	721744	7701892	1013	3875	2872
50	2080	-20,769571	-42,8699951	721745	7701892	1013	3470	2457
50	2080	-20,769567	-42,8699875	721746	7701893	1013	3600	2587
140	5950	-20,769491	-42,8697891	721767	7701901	2147	260138	259125
140	5950	-20,769489	-42,8697739	721769	7701901	2897	5499	3352
140	5950	-20,769487	-42,8697662	721769	7701901	2886	5634	2737
140	5950	-20,769487	-42,869751	721771	7701901	2847	6036	3150
140	5950	-20,769485	-42,8697395	721772	7701901	2856	5570	2723
140	5950	-20,769485	-42,8697281	721773	7701901	2854	5921	3065
140	5950	-20,769463	-42,8697777	721768	7701904	2368	141535	138681
140	5950	-20,769466	-42,8697891	721767	7701904	2879	5532	3164
140	5950	-20,769468	-42,8698044	721765	7701903	2899	6019	3140
140	5950	-20,76947	-42,869812	721765	7701903	2876	6027	3128
140	5950	-20,769474	-42,8698196	721764	7701903	2875	6475	3599
140	5950	-20,769476	-42,8698311	721763	7701903	2866	5814	2939
50	2080	-20,769491	-42,8698692	721759	7701901	535	176634	173768

50	2080	-20,769493	-42,8698807	721757	7701901	969	3951	3416
50	2080	-20,769495	-42,8698921	721756	7701901	983	4179	3210
50	2080	-20,769497	-42,8698998	721755	7701900	1004	3712	2729
50	2080	-20,769499	-42,8699074	721755	7701900	998	3753	2749
50	2080	-20,769503	-42,8699188	721753	7701900	998	4117	3119
20	790	-20,76963	-42,8701706	721727	7701886	2	142885	141887
20	790	-20,76963	-42,8701706	721727	7701886	396	1385	1383
20	790	-20,769638	-42,8701859	721725	7701885	377	3854	3458
20	790	-20,769642	-42,8701935	721725	7701885	374	3456	3079
20	790	-20,769644	-42,8702049	721723	7701884	380	3302	2928
20	790	-20,769646	-42,8702126	721723	7701884	384	3386	3006
20	790	-20,769651	-42,870224	721721	7701884	384	3629	3245
110	4660	-20,769716	-42,8703575	721707	7701877	2021	118046	117662
110	4660	-20,769726	-42,8703728	721706	7701876	2242	5386	3365
110	4660	-20,76973	-42,8703804	721705	7701875	2230	5168	2926
110	4660	-20,769733	-42,870388	721704	7701875	2236	4754	2524
110	4660	-20,769739	-42,8703995	721703	7701874	2249	5314	3078
110	4660	-20,769747	-42,8704071	721702	7701873	2252	4887	2638
80	3370	-20,769884	-42,8706513	721677	7701858	1049	220221	217969
80	3370	-20,769894	-42,8706627	721675	7701857	1612	4391	3342
80	3370	-20,769897	-42,8706703	721675	7701857	1596	5181	3569
80	3370	-20,769905	-42,8706818	721673	7701856	1604	5007	3411
80	3370	-20,769911	-42,8706932	721672	7701856	1608	4339	2735
80	3370	-20,769918	-42,8707047	721671	7701855	1594	5015	3407