

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA AGRÔNOMICA**  
**SAMUEL SILVA REIS**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE**  
**VINHAÇA POR AUTOPROPELIDO NA REGIÃO DE BAMBUÍ-MG**

**FORMIGA – MG**  
**2018**

SAMUEL SILVA REIS

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE  
VINHAÇA POR AUTOPROPELIDO NA REGIÃO DE BAMBUÍ-MG

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrônômica do UNIFOR-MG, como requisito parcial para obtenção do título em Bacharel em Engenharia Agrônômica. Orientador: Prof. Me. Paulo Ricardo Frade.

FORMIGA – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca UNIFOR-MG

R375 Reis, Samuel Silva.  
Avaliação do desempenho e uniformidade de aplicação de vinhaça por  
autopropelido na região de Bambuí-MG / Samuel Silva Reis. – 2018.  
21 f.

Orientador: Paulo Ricardo Frade.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia  
Agrônômica)-Centro Universitário de Formiga-UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Fertirrigação. 2. Eficiência. 3. Produtividade. I. Título.

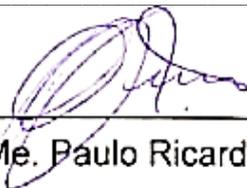
CDD 631.587

Samuel Silva Reis

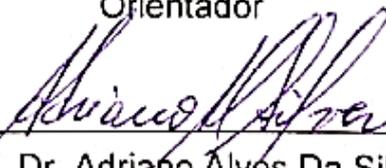
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DE  
VINHAÇA POR AUTOPROPELIDO NA REGIÃO DE BAMBUÍ-MG

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Agrônômica do UNIFOR-MG, como  
requisito parcial para obtenção do título  
em Bacharel em Engenharia Agrônômica.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Paulo Ricardo Frade  
Orientador



Prof. Dr. Adriano Alves Da Silva  
UNIFOR-MG



Prof. Dra. Kátia Daniela Ribeiro  
UNIFOR-MG

Formiga, 29 de novembro de 2018.

Dedico esse trabalho aos meus avós Sudário e Maria (*in memoriam*), a minha avó Tereza e aos meus pais Osvaldo e Raquel que me ensinaram valores importantes para toda a vida, e a todas as pessoas que através de atos, palavras e orações têm colaborado em minha jornada pessoal e profissional.

## **AGRADECIMENTO**

A Deus e a Nossa Senhora Aparecida, pela fé, proteção, força e saúde para estar sempre disposto a alcançar meus objetivos e superar as dificuldades.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração, que oportunizaram a janela em que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela confiança no mérito e ética aqui presentes.

À Raquel Silva Reis, pelo amor de mãe, doação e carinho, com suas características que levo para minha vida pessoal.

Ao Osvaldo Silva; pai, você é um exemplo de pessoa e de profissional, me espelho em você e levo seus conselhos comigo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Me. Paulo Ricardo Frade, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelo incentivo, criatividade, correções e dedicação.

À Michele Helena Bruno, pelo carinho, compreensão e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi, pelos ensinamentos; à banca examinadora e professores; aos meus amigos e colegas de profissão, minha eterna gratidão.

“O fruto de um trabalho de amor atinge sua plenitude na colheita, e esta chega sempre no tempo certo.”  
(Autor desconhecido)

## RESUMO

A vinhaça é um subproduto merecedor de destaque na produção de cana-de-açúcar, resultado do processo de fabricação do etanol. Em uma indústria localizada em Bambuí, ela é distribuída nas áreas de cultivo de cana por meio de fertirrigação, empregando-se o sistema de irrigação autopropelido. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de um equipamento de irrigação por meio de autopropelido, visando à otimização da lâmina de vinhaça aplicada, avaliando-se a uniformidade e a eficiência desse sistema. Utilizaram-se três indicadores de desempenho: o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e o coeficiente de uniformidade estatístico (CUE). As eficiências calculadas foram a eficiência de irrigação ( $E_i$ ), a eficiência de aplicação ( $E_a$ ), a eficiência de distribuição ( $E_d$ ), a eficiência potencial de aplicação ( $E_{ap}$ ) e a eficiência de armazenagem ( $E_s$ ). Para a determinação dos coeficientes e as respectivas eficiências, realizaram-se dois ensaios de precipitações, usando os coletores espaçados entre 4 e 8 m. Verificou-se que a distribuição da água de fertirrigação na área estudada encontra-se dentro dos valores recomendados pela literatura. Porém, a eficiência de irrigação fica comprometida, com valores não recomendados para esse tipo de sistema, o que pode comprometer o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Algumas medidas devem ser adotadas, como a manutenção, ou até mesmo a troca, da mangueira do carretel e da tubulação principal (adutora), pois apresentam muitos vazamentos. O bocal do canhão também deve ser substituído, já que está visivelmente desgastado. Além disso, o horário da fertirrigação também pode ser revisto, uma vez que aplicações em momentos de temperatura elevada e baixa umidade relativa provocam grandes perdas por evaporação.

Palavras-chave: Eficiência. Fertirrigação. Produtividade.

## ABSTRACT

Vinasse is a by-product worthy of note in the production of sugarcane, a result of the ethanol production process. In an industry located in Bambuí, it is distributed in the areas of cane cultivation, by means of fertirrigation, using the self-propelled irrigation system. The objective of this work was to evaluate the performance of an irrigation equipment by means of self-propelled, aiming at the optimization of the applied vinasse blade, evaluating the uniformity and efficiency of this system. Three performance indicators were used: the Christiansen uniformity coefficient (CUC), the uniform distribution coefficient (CUD) and the statistical uniformity coefficient (CUE). The estimated efficiencies were irrigation efficiency ( $E_i$ ), application efficiency ( $E_a$ ), distribution efficiency ( $E_d$ ), potential application efficiency ( $E_{ap}$ ) and storage efficiency ( $E_s$ ). For the determination of the coefficients and their respective efficiencies, two precipitation tests were performed, using the collectors spaced between 4 and 8 m. It was verified that the fertigation water distribution in the studied area is within the parameters. However, irrigation efficiency is compromised, with values not recommended for this type of system, which may compromise the development of sugarcane. Some measures should be taken, such as the maintenance or even the replacement of the spool hose and the main piping (piping), as there are many leaks. The nozzle of the barrel must also be replaced as it is visibly worn. In addition, the time of the fertigation can also be revised, since applications in times of high temperature and low relative humidity cause great losses by evaporation.

Key words: Efficiency. Fertigation. Productivity.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização de Bambuí no estado de Minas Gerais.....	26
Figura 2 - Área 01 de fertirrigação da indústria .....	27
Figura 3 – Autopropelido, do tipo carretel enrolador, trabalhando na aplicação da vinhaça.....	28
Figura 4 - Esquema de distribuição dos coletores para a avaliação do autopropelido.....	29
Figura 5 - Precipitação média em função da posição do coletor, do lado esquerdo e direito do canhão, nos ensaios de 4 m (a) e 8 m (b). .....	34
Figura 6 – Presença de vazamentos na adutora e no acoplamento da mangueira do carretel. ....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação dos valores do desempenho de sistemas de irrigação em função do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e do (CUE). .....	30
Tabela 2 - Valores dos itens obtidos para o cálculo das eficiências no espaçamento de 4 metros entre os coletores. ....	30
Tabela 3 - Valores dos itens obtidos para o cálculo das eficiências no espaçamento de 8 metros entre os coletores. ....	31
Tabela 4 - Coeficientes de uniformidade da distribuição da água aplicada (%) referentes aos testes realizados no campo .....	32
Tabela 5 – Resultados obtidos das eficiências do sistema de autopropelido.....	35
Tabela 6 – Dados do sistema de autopropelido utilizado .....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CUC - coeficiente de uniformidade Christiansen

CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição

CUE - coeficiente de uniformidade de estatístico

EA - eficiência de aplicação

EAP - eficiência potencial de aplicação

ED - eficiência de distribuição

EI - eficiência de irrigação

ES - eficiência de armazenagem

IARM – lâmina de irrigação útil armazenada, disponível para a cultura.

INF – lâmina média de irrigação infiltrada na parcela

IRN – irrigação real necessária

ITA – lâmina média de irrigação aplicada na parcela

ITA – lâmina média de irrigação aplicada na parcela

mm - milímetros

m - metros

N = Número de coletores ou pluviômetros

$\bar{X}$  = Lâmina média aplicada (mm).

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>A irrigação no Brasil e no mundo</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2</b>	<b>Métodos e sistemas de irrigação</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Sistema autopropelido de irrigação por aspersão</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3</b>	<b>Avaliação de desempenho de sistemas de irrigação</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Uniformidade</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3.1.1</b>	<b>Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3.1.2</b>	<b>Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3.1.3</b>	<b>Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE)</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Eficiência</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3.2.1</b>	<b>Eficiência de irrigação</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3.2.2</b>	<b>Eficiência de aplicação</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3.2.3</b>	<b>Eficiência potencial de aplicação</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3.2.4</b>	<b>Eficiência de armazenagem</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3.2.5</b>	<b>Eficiência de distribuição</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Adequabilidade da irrigação</b> .....	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do município</b> .....	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Descrição da área de estudo</b> .....	<b>27</b>
<b>4.3</b>	<b>Metodologia de ensaio e materiais utilizados</b> .....	<b>28</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise de dados</b> .....	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma das principais funções da irrigação é fornecer a quantidade adequada de água às plantas para prevenir o estresse hídrico, o que pode afetar, tanto em quantidade como em qualidade, a produção da cultura. Há sempre a quantidade e o momento exato para se usar a irrigação, pois é fundamental observar os parâmetros governados pelas condições climáticas locais, o tipo de cultura e seu estágio de crescimento, a profundidade efetiva do sistema radicular e a umidade do solo, objetivando, também, uma produtividade em níveis economicamente viáveis.

Sabe-se que o avanço tecnológico no setor de irrigação tem ocasionado o surgimento de novos equipamentos. Um deles é o sistema autopropelido, que representa, no processo de automatização dos métodos de irrigação, uma etapa que tem se expandido bastante, buscando, principalmente, uma redução nos gastos com mão de obra. Por outro lado, o seu custo variável pode se tornar um fator limitante na escolha deste tipo de equipamento. No entanto, muitas vezes, adotando-se um manejo adequado, é possível utilizar o sistema de irrigação em tempo inferior àquele para o qual foi projetado, economizando em termos de operação, refletindo diretamente nos custos de energia de bombeamento e mão de obra.

Em função da grande utilização deste equipamento, vários estudos são feitos visando obter sua uniformidade de distribuição de água, pois este é um dos critérios mais importantes para a avaliação de seu desempenho. Sabe-se, também, que estes testes são desenvolvidos em condições ideais, de acordo com as normas de controle de qualidade.

Uma das maiores utilizações do autopropelido é para a fertirrigação, que resulta em muitas vantagens para o solo agrícola, principalmente o canavieiro, com aumento da matéria orgânica e de alguns micronutrientes, além de haver o benefício da água, que propicia operações de cultivo de cana-soca e plantios temporãos, que necessitam de umidade em épocas de estiagem. Ademais, substitui nutrientes de origem mineral – parcialmente, o nitrogênio e o fósforo e, totalmente, o potássio (FILHO, 2005).

A vinhaça é um subproduto merecedor de destaque na produção de cana-de-açúcar, resultado do processo de fabricação do etanol, especificamente da destilação do caldo fermentado. Inicialmente, ela era despejada nos rios, poluindo os cursos d'água, ou em áreas de sacrifício, poluindo o solo. Hoje em dia, devido às

exigências do mercado, aos compromissos sociais, às leis e às normas ambientais específicas para sua disposição, as unidades produtoras do setor sucroalcooleiro atentam-se ao aproveitamento dos seus possíveis benefícios (SILVA, 2011).

Segundo Paulino et al. (2011), a aplicação de vinhaça é feita, em grande parte, com o sistema autopropelido. Para uma aplicação correta da vinhaça no campo, a uniformidade de distribuição e a eficiência desse sistema tornam-se ainda mais relevantes, uma vez que a irregularidade na aplicação acarretará na distribuição desigual do resíduo na área, podendo levar ao excesso de potássio e outros constituintes, chegando até mesmo a ultrapassar os limites permitidos por lei (RODRIGUES, 2012).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido, visando à otimização da lâmina de vinhaça aplicada.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a uniformidade do equipamento autopropelido de irrigação por meio da determinação, em condições de campo, do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE);
  - Calcular a eficiência da irrigação por meio de diferentes parâmetros;
  - Identificar e coletar dados do equipamento de autopropelido utilizado para aplicação de vinhaça.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 A irrigação no Brasil e no mundo

Segundo Paulino et al. (2011), conhecer as áreas irrigadas e sua distribuição geográfica no país é importante para o planejamento da gestão de recursos hídricos. Isso significa que a evolução da área irrigada, segundo o método de irrigação, possibilita a identificação do aproveitamento de tecnologias que visam ao uso racional da água.

O interesse pela irrigação no Brasil deve-se, principalmente, às mais variadas condições de clima, solo, cultura e características econômicas e sociais. Não existe um sistema de irrigação ideal, capaz de atender satisfatoriamente todas essas condições e interesses (TEIXEIRA, 2009).

Por isso, deve-se selecionar o sistema de irrigação mais adequado para cada situação e para atender os objetivos almejados. O processo de seleção requer uma análise detalhada, em função das exigências de cada sistema de irrigação, a fim de identificar as melhores alternativas (ANDRADE, 2001).

O Brasil está entre os dez países com a maior área irrigada do planeta, conforme um estudo feito pela Agência Nacional de Águas (ANA). De acordo com o Atlas Irrigação, que trata do uso da água na agricultura irrigada, atualmente, o País tem 6,95 milhões de hectares de terras onde se produzem alimentos utilizando diferentes técnicas de irrigação. A pesquisa mostra, ainda, que esse número representa apenas 20% da área potencial para a atividade (NASCIMENTO, 2017).

Com a rápida expansão da agricultura irrigada no Brasil, muitos problemas têm surgido, em consequência do desconhecimento das diversas alternativas de sistemas de irrigação, levando a uma seleção inadequada do melhor sistema para uma determinada condição. Isso tem causado o fracasso de muitos empreendimentos, deixando os agricultores frustrados com a irrigação e, muitas vezes, ocasionando a degradação dos recursos naturais (SCHONS, 2010).

Para Pinto (2008), o crescimento da atividade de irrigação resulta, de forma geral, no aumento do consumo de água, sendo que diversos benefícios também podem ser observados, como maior produtividade, redução de custos unitários, diminuição de riscos climáticos/meteorológicos e otimização de insumos e equipamentos. A irrigação também é fundamental para o aumento e a estabilidade

da oferta de alimentos e, conseqüentemente, do aumento da segurança alimentar e nutricional da população brasileira. Podem-se citar o tomate, o arroz, o pimentão, a cebola, a batata e o alho como exemplos de alimentos produzidos com alto percentual de irrigação. Do ponto de vista do uso racional da água, exigências legais e instrumentos de gestão, como a outorga de direito de uso de recursos hídricos (autorização para o uso da água) e a cobrança pelo uso, fomentam a sustentabilidade da atividade, o aumento da eficiência e a conseqüente redução do desperdício (ANA, 2017).

Além do efeito direto na disponibilidade de água para as plantas, outros fatores que contribuem para que a irrigação eleve a produtividade das culturas são: o uso mais eficiente de fertilizantes e a possibilidade de plantios mais densos e de uso de variedades de plantas que respondem melhor à irrigação (ANDRADE, 2001).

### **3.2 Métodos e sistemas de irrigação**

Na agricultura irrigada, a escolha do método e do sistema de irrigação é o ponto de partida para se estabelecer o planejamento e o manejo adequado, a fim de proporcionar ao produtor a utilização da água com a máxima eficiência, aumentando a produtividade das culturas, reduzindo os custos de produção e maximizando a receita líquida dos investimentos (SOUSA et al., 2011).

Os métodos de irrigação referem-se à forma de distribuição de água para as plantas, podendo ser classificados em quatro tipos, dos quais derivam os principais sistemas: a) método de irrigação por superfície; b) método de irrigação localizada; c) método de irrigação subsuperficial; d) método de irrigação por aspersão.

Na irrigação por superfície, a água alcança as plantas diretamente, por escoamento sobre a superfície do terreno cultivado. Normalmente, é necessário o bombeamento da água desde a fonte de abastecimento até, pelo menos, o canal principal. Em outros casos, a água pode chegar até os canais por gravidade, dependendo da declividade do terreno (SOUSA et al., 2011).

As principais vantagens desse método são: geralmente, apresenta o menor custo fixo e operacional; requer equipamentos simples e é fácil de manejar; sofre pouco efeito de ventos; é adaptável à grande diversidade de solos e culturas; possui elevado potencial para redução do consumo de energia; não interfere nos tratamentos fitossanitários; permite a utilização de águas com sólidos em suspensão

(ANDRADE, 2001).

Já a irrigação localizada caracteriza-se pela distribuição da água no solo de forma localizada, diretamente sobre a área de maior concentração do sistema radicular das plantas, em pequena intensidade, mas com alta frequência, mantendo o solo próximo da capacidade de campo. Pode ser dividida em gotejamento e microaspersão, sendo que, na irrigação por gotejamento, a água é aplicada às plantas em forma de pequenas gotas, utilizando-se, geralmente, baixa pressão de serviço e menor demanda de energia. No sistema de irrigação por microaspersão, a água é aspergida e distribuída em forma de círculo ou semicírculo, e a filtragem é menos rigorosa (BERNARDO, 1989b; SANTOS et al., 1997 apud SOUSA et al., 2011).

Fertilizantes e alguns defensivos podem ser aplicados por meio da água de irrigação, com possível aumento de produtividade das culturas, mas com perigo de contaminação do solo e do lençol freático. É um método que permite elevado grau de automação, necessitando de menor emprego de mão de obra em sua operação (ANDRADE, 2001).

Atualmente, as linhas laterais de gotejadores, ou tubos porosos, estão sendo enterradas de modo a permitir a aplicação subsuperficial da água, o que caracteriza o método de irrigação subsuperficial. A vantagem deste sistema é a remoção das linhas laterais da superfície do solo, facilitando o tráfego e os tratos culturais, além de possuir maior vida útil (ANDRADE, 2001).

O sistema de irrigação subsuperficial por gotejamento, também conhecido por gotejamento subsuperficial, aparece em resposta à busca pela alta eficiência de irrigação. É caracterizado pelo fato de a emissão de água ser feita subsuperficialmente, com frente de umidade tangenciando a superfície do solo, evitando a exposição de superfície molhada e reduzindo as perdas por evaporação (NOGUEIRA et al., 1997 apud SOUSA et al., 2011).

No método de irrigação por aspersão, são utilizados aspersores para distribuir água na área total, em forma de chuva. Dessa forma, a água é conduzida desde a fonte de abastecimento até a área cultivada (impulsionada por uma estação de bombeamento) por meio de tubulações ou condutos forçados, sendo distribuída às plantas pelos bocais de aspersores de diversas capacidades e características. Entre os sistemas por aspersão, os de aspersão convencional são os mais empregados na horticultura, pois se adequam a fruteiras e hortaliças, solos, topografias, formas e

tamanhos de área a ser irrigada. Em geral, são constituídos pelas linhas principal, secundárias e laterais, cuja mobilidade define os diferentes tipos de sistemas. Inicialmente, os sistemas de irrigação por aspersão mecanizados foram desenvolvidos para atender a condições especiais de topografia, tamanho e forma da área a irrigar. São compostos pelo pivô central, autopropelido (aspersores autopropelidos), deslocamento linear (linha lateral com movimentação longitudinal) e sistemas de montagem direta (SOUSA et al., 2011).

### **3.2.1 Sistema autopropelido de irrigação por aspersão**

O autopropelido é um sistema de irrigação que contém uma tubulação de sucção, um conjunto motobomba, uma linha principal, um carretel enrolador e um carro irrigador com um aspersor do tipo canhão. O carretel enrolador é formado pelo conjunto motriz e carretel, com mangueira de polietileno, montado sobre chassi com 2 a 6 rodas e acoplamento à barra de tração do trator. O conjunto motriz engloba uma turbina hidráulica e uma caixa de redução de velocidade, que faz o enrolamento da mangueira do carretel. A irrigação da faixa ocorre à medida que a mangueira vai sendo enrolada. O aspersor, montado sobre duas rodas no carro irrigador, na outra extremidade da mangueira, desloca-se a uma velocidade constante preestabelecida, irrigando, por vez, uma faixa de até 115 m de largura por até 650 m de comprimento. Após a irrigação de determinada faixa, o conjunto é facilmente deslocado para irrigar faixas adjacentes (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 2008).

O carretel enrolador autopropelido substitui, com vantagens, os antigos sistemas autopropelidos, nos quais todo o conjunto motriz se deslocava juntamente com o aspersor ao longo da faixa irrigada, arrastando uma mangueira flexível. Dentre os seus benefícios, destacam-se: melhor controle de velocidade de deslocamento do carro irrigador e menor tamanho de gotas dos canhões atuais (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 2008).

Este sistema irriga faixas longas, de largura variável, deslocando-se de forma contínua e linear no sentido do eixo da faixa. O aspersor funciona setorialmente, de maneira que o seu deslocamento se faz em solo seco. Seu uso é adaptável a culturas de diferentes portes, sendo muito utilizado para irrigação de cana-de-açúcar, milho e café (FRIZZONE, 2017).

No mercado, encontram-se autopropelidos cujo canhão hidráulico é

substituído por uma barra irrigadora. Esse tipo é indicado somente para áreas de pouca declividade, com a vantagem de uma melhor uniformidade de distribuição de água e gotas de menor tamanho. A barra, que pode ter comprimento superior a 50 m, é dotada de aspersores do tipo spray, com pressão de serviço entre 100 kPa e 300 kPa, o que reduz o consumo de energia. Geralmente, a barra é montada sobre um carro com quatro rodas e pode ter sua altura ajustada (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 2008).

Segundo Sousa et al. (2011, p. 149), o autopropelido pode ser utilizado em “fruteiras e hortaliças, cujas folhas sejam resistentes ao impacto das grandes gotas lançadas pelo aspersor. É apropriado para solos arenosos e franco-arenosos e áreas regulares”. Como vantagens desse sistema, os autores citam: a) custo de implantação relativamente baixo; b) prático e de fácil manejo no campo; c) necessita de pouca mão de obra. Já as principais limitações são: a) requer alta pressão e, conseqüentemente, elevado consumo de energia; b) não é indicado para áreas declivosas e com baixo índice de cobertura vegetal; c) a distribuição de água é bastante afetada pelo vento.

### **3.3 Avaliação de desempenho de sistemas de irrigação**

#### **3.3.1 Uniformidade**

O principal objetivo de um sistema de irrigação é proporcionar condições para se produzir com economia, que se consegue por meio do aumento da produtividade e da redução dos custos por unidade produzida. A avaliação do desempenho de um sistema de irrigação é uma etapa fundamental antes da implantação de qualquer estratégia de manejo de irrigação, pois, com base nos resultados obtidos, será possível avaliar e adequar o equipamento e sua utilização, em relação à necessidade de água dos cultivos utilizados (BERNARDO et al., 2005 apud MARTINS et al., 2013).

A melhoria da uniformidade de um sistema de irrigação é uma das decisões mais importantes para o manejo adequado da água, pois esta, em excesso, além de provocar seu desperdício, pode carrear nutrientes para zonas do solo não exploráveis pelas raízes. Já uma aplicação insuficiente pode acarretar prejuízos na produção, principalmente nos períodos críticos (BERNARDO et al., 2005; SILVA et

al., 2008 apud MARTINS et al., 2013).

Segundo Frizzone et al. (2012, p. 114), “as medidas de uniformidade de distribuição de água expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo em relação ao valor médio”.

Dentre esses parâmetros, são muito utilizados aqueles que permitem avaliar a uniformidade de distribuição de água pelo sistema, uma vez que a irrigação não é homogênea em todas as áreas atingidas por ela.

### 3.3.1.1 Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)

O coeficiente de uniformidade desenvolvido por Christiansen (1942) é uma representação estatística da uniformidade, utilizado principalmente em sistemas de irrigação por aspersão. Expressa a média de 50% da área, mesmo irrigada (MOURA, 2005), e pode ser obtido pela Equação 1.

$$CUC = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - \bar{X}|}{N \times \bar{X}} \right) \quad (1)$$

em que:

N = Número de coletores ou pluviômetros;

X<sub>i</sub> = Lâmina de água aplicada no i-ésimo ponto sobre a superfície do solo (mm);

$\bar{X}$  = Lâmina média aplicada (mm).

Para Frizzone et al. (2012, p. 115), “esse coeficiente é o mais conhecido e largamente utilizado em sistemas de irrigação por aspersão, sendo que, em geral, 80% é seu valor mínimo aceitável”.

### 3.3.1.2 Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

Outro indicador de uniformidade bastante utilizado na avaliação dos sistemas de irrigação é o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), que se baseia, segundo Silva (2002) apud Schons (2006), na relação entre a média do quartil

inferior e a média geral aplicada. Para sua determinação, é necessário derivar a fórmula de cálculo da média do quartil inferior. Matematicamente, a definição do CUD pode ser expressa pela Equação 2.

$$CUD = 100 \times \left( \frac{X_{25\%}}{\bar{X}} \right) \quad (2)$$

em que:

$X_{25\%}$  = média das 25% menores lâminas coletadas (mm).

### 3.3.1.3 Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE)

Segundo Frizzone et al. (2012), utilizando o desvio-padrão como medida de dispersão, Wilcox e Swailes (1974) propuseram outro coeficiente de uniformidade, denominado Coeficiente de Uniformidade Estatístico, para uso na avaliação de sistemas de irrigação por aspersão, o qual pode ser obtido por meio da Equação 3.

$$CUE = 1 - \frac{S}{\bar{X}} \quad (3)$$

em que:

S = desvio-padrão das lâminas coletadas (mm).

### 3.3.2 Eficiência

As medidas de eficiência quantificam, fisicamente, a qualidade da irrigação por incorporarem algumas consequências da uniformidade. Se, por um lado, as medidas de uniformidade dependem somente do grau de dispersão com que a água é distribuída; por outro, as medidas de eficiência dependem tanto da uniformidade quanto da forma como o sistema de irrigação é operado (FRIZZONE; REZENDE; FREITAS, 2011).

#### 3.3.2.1 Eficiência de irrigação

Quando se irriga uma área, em decorrência da desuniformidade, uma parte é

adequadamente irrigada, enquanto outra, não. Uma área é adequadamente irrigada quando a quantidade de água distribuída satisfaz ou excede o volume necessário (FRIZZONE; REZENDE; FREITAS, 2011).

Segundo Frizzone et al. (2012), eficiência de irrigação é a razão entre a água consumida pelo processo de evaporação e de transpiração do cultivo e a água proveniente de um rio ou outra fonte natural de água. Não é um termo apropriado ao se considerar como desperdício a água que não foi consumida pelo processo de evapotranspiração. Podendo ser calculado pela equação 4.

$$EI = 100 \times \frac{IRN}{ITD} \quad (4)$$

em que:

IRN – irrigação real necessária (lâmina de irrigação benéficamente usada para satisfazer ET+LS–PE + outros usos benéficos).

ITD – lâmina média de irrigação derivada ao campo (uso benéfico + não benéfico).

### 3.3.2.2 Eficiência de aplicação

A irrigação de campos individuais é realizada por diferentes sistemas, com o objetivo de armazenar, no perfil do solo, uma quantidade suficiente de água para suprir a demanda das culturas, além de outros benefícios. A eficiência de aplicação é uma medida de desempenho aplicável em escala de campo ou em unidades menores e se refere a um evento de irrigação (FRIZZONE et al., 2012).

Segundo Frizzone, Rezende e Freitas (2011, p. 217), a eficiência de aplicação “é definida pela relação entre a quantidade de água incorporada ao solo até a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura e a quantidade de água aplicada”. Trata-se do volume de água aplicado na parte do solo, que permanece disponível para se alcançar o objetivo desejado. Representado pela equação 5.

$$EA = 100 \times \frac{IARM}{ITA} \quad (5)$$

em que:

IARM – lâmina de irrigação útil armazenada, disponível para a cultura.

ITA – lâmina média de irrigação aplicada na parcela (irrigação total aplicada).

### 3.3.2.3 Eficiência potencial de aplicação

Ao se prevenir o escoamento superficial e considerar que toda a água que atingiu a superfície do solo infiltrou, a eficiência de aplicação em potencial representa a fração do volume total de água distribuída que permanece disponível para infiltração na parcela. É a fração da água aproveitada na parte que continuou disponível para infiltrar no solo (HART, PERI; SKOGERBOE, 1979; BERNADO; SOARES; MANTOVANI, 2006 apud FRIZZONE et al., 2012). Obtido pela equação 6.

$$EPA = 100 \times \frac{INF}{ITA} \quad (6)$$

### 3.3.2.4 Eficiência de armazenagem

A eficiência de aplicação é alta quando a quantidade de irrigação infiltrada no terreno não é excessiva, e o perfil do solo que contém raízes não é completamente abastecido. Como consequência, tem-se uma pequena percolação, considerando que se previne o escoamento superficial (FRIZZONE et al., 2012).

Esse parâmetro define a fração da lâmina de água requerida para suprir o *déficit* armazenado na zona das raízes. Embora seja indicador do excesso de água infiltrada, a eficiência de armazenamento não determina o ajuste da irrigação quanto ao reabastecimento da zona radicular, pois ela é um indicador do reabastecimento desta (FRIZZONE; REZENDE; FREITAS, 2011).

Eficiência de armazenamento é a razão entre a lâmina média de irrigação infiltrada que permaneceu armazenada, que pode ser aproveitada para as plantas (IARM), e a lâmina média de irrigação necessária para satisfazer o *déficit* (IRN). Expressa pela seguinte equação.

$$ES = 100 \times \frac{IARM}{IRN} \quad (7)$$

A ES avalia se a necessidade de água da planta foi satisfeita pela irrigação.

### 3.3.2.5 Eficiência de distribuição

A distribuição de água pelos sistemas de irrigação não é completamente uniforme. Por isso, ao se irrigar uma superfície, infiltram-se volumes de água maiores que o pretendido em algumas áreas, e quantidades menores em outras (FRIZZONE et al., 2012).

Eficiência de distribuição é a fração de água infiltrada que permaneceu disponível, com o objetivo de satisfazer a deficiência de irrigação e lixiviar o excesso de sais do solo, além de apresentar outros benefícios. Obtida através da equação 8.

$$ED = 100 \times \frac{IRN}{INF} \quad (8)$$

em que:

INF – lâmina média de irrigação infiltrada na parcela

### 3.3.3 Adequabilidade da irrigação

O grau de adequação refere-se à fração da área que recebe a quantidade de água capaz de manter a qualidade do produto e a produtividade vegetal no nível econômico desejado pelo produtor. Ou seja, é a parte da área abrangida pelo sistema de irrigação que apresenta conformidade com as necessidades do sistema de produção agrícola. Geralmente, o grau de adequação é definido em relação à porcentagem da área que recebe, no mínimo, o volume de água necessário para satisfazer a deficiência de irrigação (FRIZZONE et al., 2012).

Ainda segundo Frizzone et al. (2012), a avaliação do grau de adequação é feita utilizando-se uma distribuição acumulada de frequências. No manejo tradicional da irrigação, os níveis de eficiência preconizados são aqueles possíveis de serem atingidos com grau mínimo de adequação de:

- 90% para culturas com sistema radicular pouco profundo e de alta rentabilidade;
- 80% para culturas com profundidade média de sistema radicular e de médio valor econômico;
- 75% para culturas com sistema radicular profundo.

Desse modo, a irrigação tradicional é definida em termos da quantidade de água a ser aplicada para evitar déficit hídrico em 90%, 80% ou 75% da área.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização do município

Este trabalho foi realizado no município de Bambuí-MG, localizado, geograficamente, na latitude 20°05'49,5" S, longitude 44°04'06,29" W, com altitude de 758 metros. Possui uma área total de 1.453,99 km<sup>2</sup> e fica a 270 km de Belo Horizonte, no Centro-Oeste mineiro (FIG. 1), próximo à Serra da Canastra, onde nasce o rio São Francisco. Os acessos rodoviários se dão por meio das rodovias MG-050, BR-354 e BR-262. De acordo com o último censo, realizado em 2010, Bambuí contava com 22.734 habitantes, e uma população estimada, para 2018, de 23.757 pessoas (IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística,2018).

Figura 1 – Localização de Bambuí no estado de Minas Gerais.



Fonte: IBGE, 2018.

Sant'Anna Neto (2013) caracterizou o clima da região como tropical, apresentando estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (sendo julho o mês mais seco). A precipitação média anual é de 1.589,4 mm, a evapotranspiração, 1.046mm, e a temperatura média anual, 21,90°C.

A principal produção mineral de Bambuí é a extração de caulim, e a agrícola, o café, o arroz, o milho e a soja. A economia da cidade é movimentada pela

presença de uma grande usina de álcool , a Bambuí Bioenergia, cujo investimento previsto inicialmente foi de 250 milhões de reais (MFRURAL, 2018).

#### 4.2 Descrição da área de estudo

Os testes foram realizados em agosto de 2018, na área de cultivo de cana-de-açúcar, identificada como setor 01, de uma indústria localizada na cidade de Bambuí, na qual o uso da vinhaça para fertirrigação é constante (FIG.2). A indústria é do segmento sucroenergético, tendo como principais atividades a fabricação de álcool e a geração de energia elétrica.

A companhia possui duas filiais. Uma delas está localizada na zona rural do município de Bambuí-MG, onde são desenvolvidas as atividades agroindustriais focadas na fabricação e na comercialização de etanol, cana-de-açúcar e derivados, bem como na cogeração e comercialização de energia elétrica. A outra filial situa-se no mesmo endereço e cuida exclusivamente da cogeração e comercialização de energia elétrica.

Figura 2 - Área 01 de fertirrigação da indústria



Fonte: Google Earth, 2018.

O sistema avaliado foi um autopropelido do tipo carretel enrolador, composto, na extremidade da mangueira, por um carro porta-aspersor, sobre o qual fica instalado o canhão hidráulico, e, da mangueira de polietileno propriamente dita, o carretel enrolador, que é responsável pelo recolhimento da mangueira e, conseqüentemente, pelo deslocamento do carro porta-aspersor (FIG. 3).

Figura 3 – Autopropelido, do tipo carretel enrolador, trabalhando na aplicação da vinhaça



Fonte: O autor, 2018.

### 4.3 Metodologia de ensaio e materiais utilizados

Para determinar a uniformidade de distribuição dos sistemas de irrigação autopropelido foram adotadas metodologias e equações na forma proposta por CHRISTIANSEN (1942) citada por MANTOVANI (2009). Calcularam-se os Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e o Coeficiente de Uniformidade Estatístico – CUE. Conforme equações expressas no referencial teórico.

Os dados de precipitação foram obtidos por meio de coletores (pluviômetros), com área de captação de 50 cm<sup>2</sup>, compostos de PVC rígido, produzidos pela Fabrimar, instalados sobre hastes de alumínio a 0,60 m do solo, com as dimensões: 80 mm de diâmetro por 75 mm de altura.

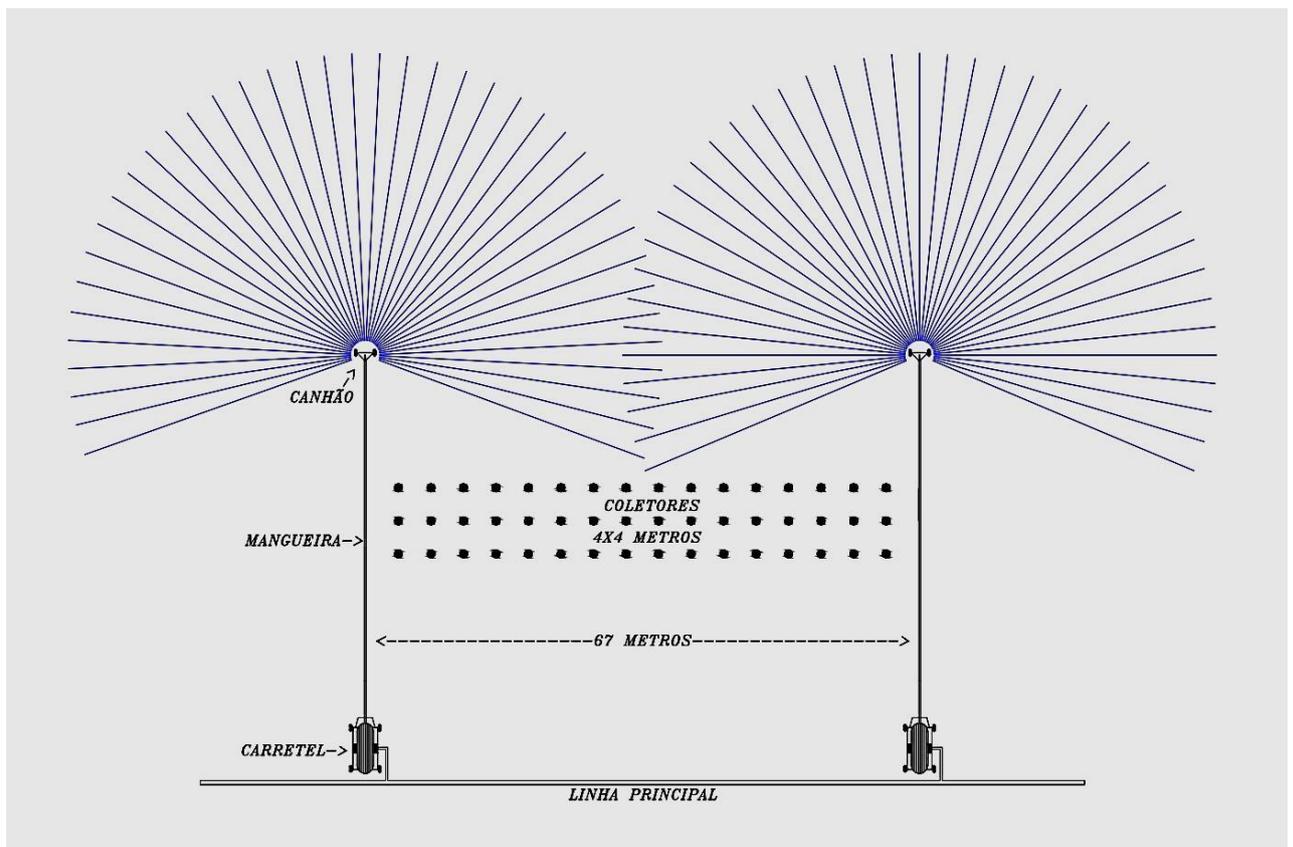
Os coletores pluviométricos foram colocados em três linhas perpendiculares à direção de deslocamento do autopropelido, conforme mostra a FIG.4. A primeira e a última linha ficaram afastadas no início e no final da faixa, respectivamente, de modo que as precipitações do autopropelido, no início e no final, não atingissem as linhas dos pluviômetros.

Foram realizados dois ensaios em triplicata, sendo que, no primeiro, o espaçamento entre os coletores no campo foi de quatro metros, com a fixação do primeiro coletor a quatro metros do canhão. Já no segundo teste, o espaçamento entre os coletores foi de oito metros, com o objetivo de verificar a uniformidade em

relação ao espaçamento dos coletores.

Para se determinar as perdas por evaporação da água recolhida nos coletores, foram utilizados quatro recipientes com volume conhecido de vinhaça, os quais foram colocados fora da área a ser irrigada. No final do teste, mediu-se o volume de água nos coletores, e, pela diferença entre o volume inicial e o final, obteve-se a evaporação, sendo considerada a média desses valores para cálculo.

Figura 4 - Esquema de distribuição dos coletores para a avaliação do autopropelido



Fonte: O autor, 2018.

Os resultados obtidos dos coletores foram inseridos em uma planilha eletrônica, para o cálculo dos coeficientes de uniformidade.

Os valores encontrados de CUC, CUD e CUE foram classificados conforme a TAB.1, proposta por Mantovani (2009).

Tabela 1- Classificação dos valores do desempenho de sistemas de irrigação em função do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e do (CUE).

Classificação	CUC (%)	CUD (%)	CUE (%)
Excelente	> 90	> 84	>95-100
Bom	80-90	68-84	85-90
Razoável	70-80	52-68	70-80
Ruim	60-70	36-52	65-70
Inaceitável	< 60	< 36	<60

Fonte: Mantovani, 2009.

Os dados meteorológicos foram coletados no momento da avaliação, (temperatura, umidade relativa e velocidade média do vento), com a utilização de um anemômetro modelo Icel Manaus AN-3090.

Foram aferidos, em campo, a vazão, a pressão de serviço, o ângulo de giro, o raio de alcance e o diâmetro do bocal do canhão hidráulico. Mediu-se a velocidade de deslocamento do equipamento no início, no meio e no final do carreador, determinando-se o tempo gasto para que fosse percorrida uma distância de 20 m.

Os dados referente aos cálculos das eficiências foram disponibilizados pela empresa onde foi realizado o experimento, como a INF (lâmina média infiltrada) foi levado em consideração a mesma lâmina coletada pelos coletores. A IARM (lâmina útil armazenada disponível para a cultura). Foi calculada de acordo com o que foi coletado e baseado no que não atingiu a lâmina que a planta realmente precisa .

A IRN (irrigação real necessária) não é calculada é um dado que a empresa já utiliza baseado na necessidade da cultura. Referente a ITA (Lâmina média de irrigação aplicada na parcela), os dados foram coletados no momento do ensaio para a execução do seu cálculo e no cálculo da ITD (lâmina média de irrigação derivada ao campo) leva em consideração (usos benéficos + não benéficos) (TAB.2 e 3).

Tabela 2 - Valores dos itens obtidos para o cálculo das eficiências no espaçamento de 4 metros entre os coletores.

Repetições	4m				
	IRN	ITD	IARM	INF	ITA
R1	25.0	41.0	15.7	18.5	26.9
R2	25.0	42.4	19.9	25.8	26.9
R3	25.0	42.4	20.4	25.3	26.9

Tabela 3 - Valores dos itens obtidos para o cálculo das eficiências no espaçamento de 8 metros entre os coletores.

Repetições	8m				
	IRN	ITD	IARM	INF	ITA
R1	25.0	42.4	18.6	30.8	26.9
R2	25.0	42.4	22.5	25.9	26.9
R3	25.0	42.4	21.1	28.1	26.9

#### 4.4 Análise de dados

A partir dos resultados obtidos após a coleta dos dados, os mesmos foram inseridos em planilha eletrônica e posteriormente foi realizado a confecção dos gráficos para melhor visualização dos resultados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos coeficientes de uniformidade encontram-se na TAB.4.

Tabela 4 - Coeficientes de uniformidade da distribuição da água aplicada (%) referentes aos testes realizados no campo

Coeficientes de Uniformidade	Espaçamento entre coletores					
	4 m			8m		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
CUC	68,98	86,63	83,7	71,49	74,3	81,55
CUD	42,75	69,39	68,26	58,23	38,91	64,24
CUE	60,97	80,61	80,29	64,54	67,22	74,9

Fonte: O autor, 2018.

Para os cálculos dos coeficientes de uniformidade, foram realizados três ensaios para cada espaçamento entre coletores (4 m e 8 m). No primeiro teste, com 4 m de espaçamento, foi encontrado o valor médio do CUC de 79,37 %. De acordo com Mantovani (2009), esse resultado (TAB.1) pode ser considerado razoável para esse tipo de equipamento de irrigação, mostrando que a quantidade de água aplicada na faixa irrigada está dentro da porcentagem aceitável.

Já no teste em que se utilizaram 8 m de espaçamento entre coletores, o valor médio de CUC foi de 75,78%, também considerado razoável, segundo o mesmo autor.

Segundo Martins (2009), a baixa uniformidade de aplicação de água de sistemas de irrigação se deve, em grande parte, ao mau dimensionamento do projeto e à ausência de manejo do sistema.

Keller e Bliesner (1990) citam que a concepção de baixos valores de uniformidade é relativa. Porém, geralmente consideram-se como baixos aqueles com Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) menores que 75%, sendo que valores superiores a 84% são recomendados para culturas de maior valor econômico. Bernardo et al. (2005) dizem que o valor mínimo recomendável de Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, para a irrigação por aspersão, é de 80%. Já Matura & Testezlaf (2003) afirmam que, para sistemas autopropelidos de irrigação, valores da ordem de 70% podem ser considerados como bons; e para Mantovani e Ramos (1994), os valores de CUC para o sistema de irrigação via autopropelido variam de 80 a 85%.

O valor médio de CUD encontrado no ensaio de 4 m foi de 60,13%, e, no segundo ensaio, de 8 m, 53,7%. No entanto, esses valores, segundo Bernardo (1989), são considerados como abaixo do mínimo aceitável, que é de 70%. Relacionando-se CUC e CUD, Rezende (1992) afirma que o fato de CUD ser sempre menor que CUC é inerente às variáveis das equações utilizadas na determinação desses coeficientes, pois, no cálculo de CUD, consideram-se apenas 25% da área que recebeu menos água, como afirmam Keller e Bliesner (1990).

Quando se observa que o valor médio de CUE no teste em que se utilizou o espaçamento de 4 m entre os coletores foi de 73,95% e, no de 8 m, foi de 68,8%, a classificação do sistema de irrigação passa a ser razoável e ruim, respectivamente, segundo Mantovani (2009), pois isso demonstra que existem problemas que podem afetar a distribuição de lâmina d'água na área.

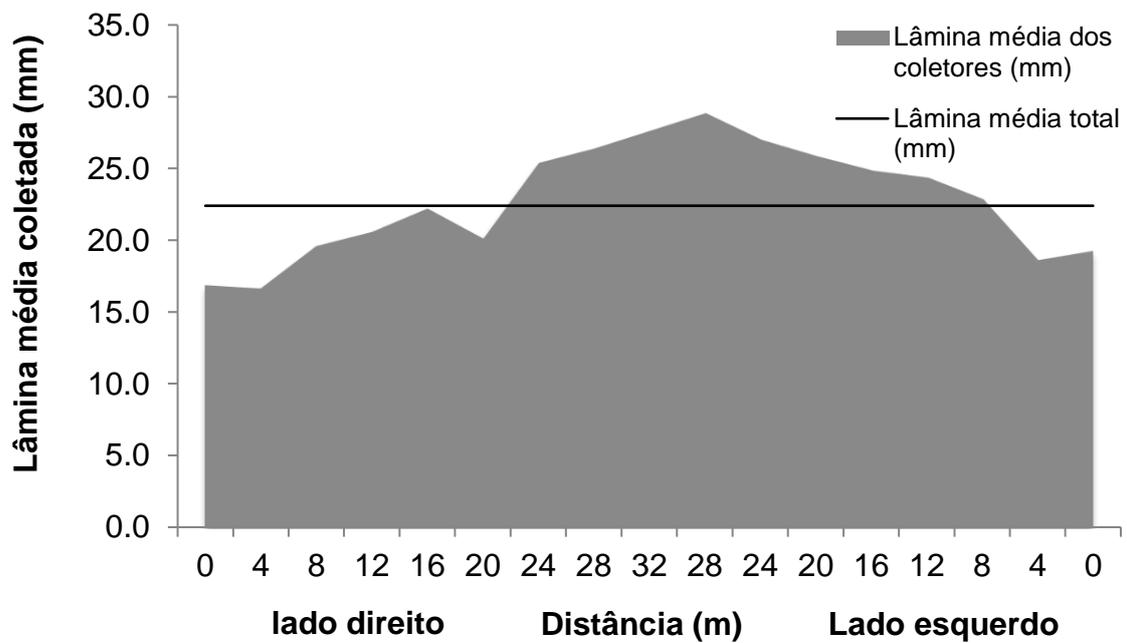
A velocidade média do vento encontrada durante os ensaios foi de  $6,33 \text{ m.s}^{-1}$ , considerado vento forte. Tarjuelo (1991), citado por Rocha (2000), classificou o vento em três níveis de velocidade: vento fraco ( $0$  a  $2 \text{ m.s}^{-1}$ ), vento mediano ( $2,1$  a  $4 \text{ m.s}^{-1}$ ) e vento forte (acima de  $4 \text{ m.s}^{-1}$ ). Este mesmo autor cita que a uniformidade de distribuição de água diminui 20% quando a velocidade do vento ultrapassa  $4 \text{ m.s}^{-1}$ . De acordo com a recomendação apresentada por Keller e Bliesner (1990), sob condições de vento moderado a fraco, os valores típicos de CUC para autopropelido devem estar acima de 70%.

A irrigação por aspersão é muito influenciada pela ação do vento, sendo que várias pesquisas têm demonstrado que o aumento da velocidade do vento diminui a uniformidade de distribuição de água, como resultado da distorção do perfil de aplicação de água e da redução da área coberta pelo aspersor e, conseqüentemente, da diminuição da sobreposição dos jatos de água (VORIES; BERNUTH, 1986).

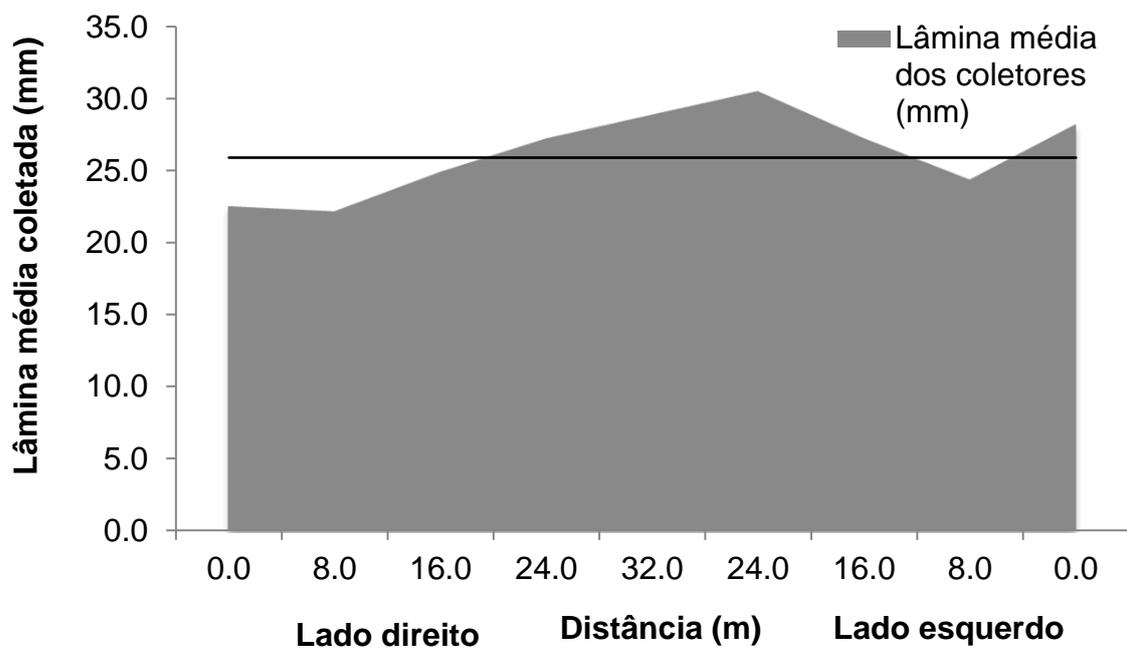
Scardua e Leme (1979 apud CHARMELO, 1990), em ensaios para determinar a uniformidade de aplicação de água para autopropelido, concluíram que ventos com velocidades acima de  $3 \text{ m.s}^{-1}$  e com direção no sentido de deslocamento do conjunto autopropelido prejudicam a uniformidade de distribuição de água e a lâmina aplicada, desaconselhando o uso deste equipamento em áreas onde a velocidade do vento exceda o valor mencionado. No momento do teste, a velocidade do vento chegou a atingir valores superiores a  $3 \text{ m.s}^{-1}$ , e foi possível observar que isso ocasionou a alteração das lâminas coletadas, uma vez que houve diferença nas

lâminas de água coletadas nos testes do lado direito e esquerdo, devido à alternância da velocidade e da direção do vento (FIG.5)

Figura 5 - Precipitação média em função da posição do coletor, do lado esquerdo e direito do canhão, nos ensaios de 4 m (a) e 8 m (b).



(a)



(b)

Os coletores que obtiveram menor precipitação foram os que estão representados na FIG.5(a), em que foi feito o ensaio de 4 m entre eles sendo que a auniformidade foi mais alta, conforme calculado anteriormente, por meio dos coeficientes de uniformidade. Esta variação observada no gráfico pode ser explicada pela repetição 1, que foi realizada em dia diferente, sendo influenciada pela velocidade do vento, pela variação na temperatura, ocasionando uma maior ou menor evaporação, e, até mesmo, pela variação da lâmina aplicada. Já na FIG.5(b), onde os coletores ficaram espaçados de 8 em 8 metros, a lâmina média dos coletores foi mais alta e, conseqüentemente, a uniformidade do equipamento de autopropelido foi mais baixa. Outro ponto a ressaltar e que pode ser observado nas figuras é o local onde os dois autopropelidos conseguem sobrepor suas lâminas. Sendo assim, as leituras nos coletores foram maiores em ambos os testes.

Normalmente, estudos sobre equipamentos para irrigação visam avaliar o seu desempenho, buscando a sua adequação a uma determinada condição de utilização. Além disso, os estudos comparativos entre os dados fornecidos pelos fabricantes e os valores obtidos em campo também contribuem para uma melhor indicação do uso deste maquinário . Estes ensaios também complementam as informações técnicas sobre os diversos modelos de aspersores disponíveis no mercado - fato que torna difícil a seleção de um que seja mais apropriado à necessidade do produtor (MARTÍN-BENITO et al., 1992).

Na TAB.5, é possível observar os resultados obtidos para os cálculos de eficiências realizados.

Tabela 5 – Resultados obtidos das eficiências do sistema de autopropelido

Eficiência	Espaçamento entre coletores					
	4m			8m		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Ei	60,98	58,98	58,98	58,98	58,98	58,98
Ea	58,34	73,90	75,99	69,36	83,92	78,37
Ed	100,0	96,79	98,66	81,30	96,49	88,97
Epa	68,69	96,17	94,34	100,0	96,46	100,0
Es	62,68	79,40	81,64	74,52	90,16	84,20

Fonte: O autor, 2018.

Os valores médios de eficiência de irrigação (Ei) encontrados foram de 59,64 e 58,98 %, para os ensaios de 4 m e 8 m, respectivamente. A eficiência de irrigação

é um termo utilizado para comparar usos benéficos e não benéficos da água de irrigação. Segundo (FRIZZONE, 2017), os baixos valores encontrados de eficiência de irrigação destinam-se à percolação profunda excessiva, ao escoamento superficial e à deriva pelo vento.

Ainda de acordo com o mesmo autor, a eficiência de aplicação ( $E_a$ ) descreve quão bem o sistema de irrigação satisfaz a necessidade de irrigação, cujo objetivo é atingir uma determinada quantidade desta. É usada para estimar o que acontece durante um simples evento de irrigação, embora a água não tenha sido usada pela cultura. Os valores encontrados para esta eficiência foram de 69,41%, para o espaçamento de 4 m, e 77,21%, para o de 8 m.

A eficiência do potencial de aplicação ( $E_{pa}$ ), apresentada na TAB.3, enquadra-se dentro do nível de excelência, que é maior que 90%, com exceção da repetição 1 no teste com espaçamento de 4 m entre coletores. Este resultado, segundo Gomes (2007), indica que o desempenho deste equipamento, de forma geral, encontra-se dentro do que é recomendado. Conforme o mesmo autor, para culturas de elevado valor econômico, como é o caso da cana-de-açúcar, estes valores devem ficar em patamares acima de 90%. Baixos valores de eficiência apontam perda excessiva de água por vazamentos nas tubulações e/ou bombas danificadas, refletindo na produtividade e na qualidade da cana produzida. Oliveira et al. (2004) encontraram valores de  $E_{pa}$  variando entre 80 e 99% para diferentes pivôs centrais. Para eles, esses resultados se devem à lâmina d'água infiltrada, que, assumida como igual à média coletada, aproximou-se da lâmina bruta aplicada, indicando a reduzida perda de água por evaporação e carreamento pelo vento.

Os valores médios de eficiência de armazenagem ( $E_s$ ) foram de 74,57 e 82,96%, e a eficiência de distribuição ( $E_d$ ), 98,48 e 88,92%, para os ensaios de 4 e 8 m, respectivamente. Hart (1979 apud FRIZZONE, 2017) classificou as eficiências como nível satisfatório para a repetição 1, no espaçamento de 4 metros, e excelente para as repetições 2 e 3 e também nas repetições de 8 metros entre os coletores, nessa ordem.

A evaporação média identificada durante o teste foi de 2,16 mm, que significa mais de 8% da lâmina média aplicada que foi 27 mm. Esta perda pode estar relacionada à alta temperatura e à baixa umidade relativa do ar na hora do teste.

Pereira (1995), simulando as perdas de água por evaporação e a uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão convencional, constatou que

as perdas de água por evaporação e arrastamento pelo vento variam de 9,25 a 11,50 % do volume de água aplicado.

Na TAB.6, estão detalhadas as características do sistema de autopropelido utilizado no estudo.

Tabela 6 – Dados do sistema de autopropelido utilizado

<b>Pressão de serviço (kgf.cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>Vazão (m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ângulo de giro (graus)</b>	<b>Raio de alcance (m)</b>	<b>Velocidade de deslocamento (m.h<sup>-1</sup>)</b>
6	90	180°	36	50

Fonte: O autor, 2018.

Durante o teste, não foram notadas variações na velocidade do autopropelido. Segundo Addink e colaboradores (1983), os coeficientes de uniformidade de aplicação de água de um equipamento autopropelido decrescem caso a velocidade de deslocamento do carro aspersor ao longo do carreador não seja constante. Estes autores relatam que, na literatura, foram encontrados valores extremos de até 60% de variação na velocidade de deslocamento de autopropelidos.

O ângulo de giro do canhão, descrito na TAB.4, é de 180°, habitualmente utilizado na fertirrigação da cana-de-açúcar em uma indústria situada em Bambuí. Esse ângulo não é o adequado, podendo ser um dos motivos de resultados insatisfatórios nos testes de uniformidade, distribuição e eficiência.

Conforme Keller & Bliesner (1990), alguns aspersores acoplados em autopropelidos necessitam ser operados com ângulo de giro inferior a 360° para se obter maior uniformidade de distribuição de água. Ao mostrarem a influência do ângulo de giro, os autores supracitados afirmam que, quando este é igual a 210°, proporciona um perfil de aplicação de água mais uniforme para o aspersor em movimento no carreador. Entretanto, o perfil produzido com o ângulo de 240° é quase tão bom quanto com o de 210°, sendo que o ângulo de 270° propicia uma uniformidade razoavelmente baixa.

Oliveira et al. (2004) encontraram valores de Epa variando entre 80 e 99% para diferentes pivôs centrais, sendo estes resultados decorrentes da lâmina d'água infiltrada, que, assumida como igual à média coletada, aproximou-se da lâmina bruta aplicada, indicando a reduzida perda de água por evaporação e carreamento pelo vento.

Outra causa da má distribuição pode estar relacionada à pressão de serviço do canhão, demonstrada na TAB.4.

Bernardo, Soares e Mantovani (2009) relatam que uma pressão de serviço muito alta resulta em uma elevada pulverização do jato de água, diminuindo seu raio de alcance, causando, conseqüentemente, uma concentração da precipitação próxima ao aspersor. Já uma pressão muito baixa implica em uma pulverização inadequada do jato de água, ocasionando um perfil de distribuição muito irregular, o que não foi observado nos ensaios realizados.

Outro fator diretamente ligado a esses resultados insatisfatórios foi a presença de vazamentos na adutora e no acoplamento da mangueira do carretel, notada na hora do teste realizado em campo, conforme pode ser visto na FIG.6. As perdas de água por vazamento são decorrentes das condições de manutenção do projeto. Em sistemas com boa manutenção, elas são menores que 1%. Entretanto, naqueles com manutenção inadequada, esse valor pode chegar a 10%, ou seja, a eficiência de condução de água será somente de 90%. Essas perdas ocorrem, principalmente, nos acoplamentos da tubulação (MUDRIK, 2005).

Figura 6 – Presença de vazamentos na adutora e no acoplamento da mangueira do carretel.



Fonte: O autor, 2018.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A distribuição e a aplicação da água de fertirrigação na área estudada encontram-se com uma eficiência dentro dos parâmetros recomendados. Já a eficiência de irrigação foi considerada inaceitável, uma vez que todos os coeficientes de uniformidade avaliados apresentaram valores reduzidos quando comparados aos recomendados pela literatura. Assim, em virtude dessa baixa eficiência de irrigação, o desempenho do sistema avaliado encontra-se abaixo do que é esperado para esse tipo de sistema, podendo comprometer o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Algumas medidas devem ser adotadas, como a manutenção, ou até mesmo a troca, da mangueira do carretel e da tubulação principal (adutora), pois apresentam muitos vazamentos. O bocal do canhão também deve ser substituído, já que está visivelmente desgastado. Além disso, o horário da fertirrigação também pode ser revisto, uma vez que aplicações em momentos de temperatura elevada e baixa umidade relativa provocam grandes perdas por evaporação.

## REFERÊNCIAS

- ADDINK, J. W. Et al. **Desing and operation of sprinkler systems**. In: JENSEN, M. E. (Ed.) Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph: Transactions of American Society of Agricultural Engineers, p. 621-658., 1983.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017.
- ANDRADE, Camilo de Lelis Teixeira de. Seleção do sistema de irrigação. **Circular Técnica da Embrapa nº 14**. Sete Lagoas, MG, dezembro, 2001.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa, MG: Imprensa Universitária, 1989. 596 p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, C. **Manual de irrigação**. 8 edição revisada e ampliada - Viçosa: UFV, 2009. 625 p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: UFV, 2005. 661 p.
- CENTRO DE PRODUÇÕES TÉCNICAS (CPT). **Sistema de irrigação autopropelido: vantagens**. S. d. Disponível em: <<https://www.cpt.com.br/dicas-cursos-cpt/sistema-de-irrigacao-autopropelido-vantagens>> Acesso em 20 fev. 2018.
- CHARMELO, L. **Desempenho de um equipamento de irrigação autopropelido, sob diferentes condições operacionais**. 1990. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- FRIZZONE, J. A. **desempenho e otimização dos sistemas de irrigação**. Notas de aula da disciplina LEB 1571-irrigação. Curso de graduação em engenharia agrônômica ESALQ/USP. Piracicaba-SP. 2017, 26p.
- FRIZZONE, J. A. FREITAS, Paulo Sérgio L.; REZENDE, Roberto; FARIA, Manoel Alves. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 350 p.
- FRIZZONE, J. A. **Os métodos de irrigação**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2017. Disponível em: <[http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Frizzone/LEB\\_15.pdf](http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Frizzone/LEB_15.pdf)> Acesso em 20 mar. 2018.
- FRIZZONE, J. A. REZENDE, Roberto; FREITAS, Paulo Sérgio L. **Irrigação por aspersão**. Maringá: Eduem, 2011. 271 p.
- GOMES, W. F. J. **Balanço hídrico e fertilização na cana-de-açúcar** in: Curso De Especialização Gestão E Tecnologia Agrícola No Setor Sucroalcooleiro. Maceió, PECEGE/ESALQ/USP, 2007.
- GOMES, W. F. J. **Balanço hídrico e fertilização na cana-de-açúcar** in: Curso De Especialização Gestão E Tecnologia Agrícola No Setor Sucroalcooleiro. Maceió, PECEGE/ESALQ/USP, 2007.

HART, W.E., PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. Irrigation performance: an evaluation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.105, n.3, p.275-288, 1979

KELLER, J., BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649 p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 2009. 355 p.

MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M. M. Manejo da irrigação. In: COSTA, E. F. da.; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. (Eds.) **Quimigação – aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Brasília: EMBRAPA/SPI, 1994. p.129-158

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. **Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 150 p.

MARTINS, C. L.; BUSATO, C.; SILVA, S. F.; RODRIGUES, W. N.; REIS, E. F. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação no sul do estado do Espírito Santo. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 236-241, maio/ago. 2013. Disponível em: <<https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/1069/1154>> Acesso em 04 abr. 2018.

MATSURA, E. E.; TESTEZLAF, R. Autopropelido. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. **Irrigação**. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. p. 179-207

MOURA, E. N. Avaliação de desempenho de sistemas de irrigação pressurizados em fruticultura. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v.3, n.1, p. 67-74, jan./mar. 2005. Disponível em: <<https://periodicos.pucpr.br/index.php/cienciaanimal/article/view/8993/8645>> Acesso em 05 abr. 2018.

MUDRIK, Alexandre Silva. **Manejo da irrigação por gotejamento em cafeeiros nas condições edafoclimáticas do cerrado do Triângulo Mineiro. 2005.**

NASCIMENTO, Luciano. Brasil está entre os dez países com a maior área irrigada do planeta, diz estudo. **Agência Brasil**, out. 2017. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2017-10/brasil-esta-entre-os-dez-paises-com-maior-area-irrigada-do-planeta-diz-estudo>> Acesso em 01 mar. 2018.

OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. A. C.; PAZ, V. P. S. ; SANTOS, C. A. **Avaliação do desempenho de sistemas pivô central na região oeste da Bahia**. Irriga, Botucatu, v.9, n.2, p. 126-135, maio-agosto,2004.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A. SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; JOSÉ, J. V. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, abril-junho, 2011.

PEREIRA, G. M. **Simulação de perdas de água por evaporação e da**

**uniformidade de distribuição na irrigação.** 1995. 125p. Tese – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa.

PINTO, Paulo Raimundo et al. **Sistema de automação do irrigâmetro utilizando-se instrumentos digitais.** 2008.

REZENDE. R. **Desempenho de um sistema de irrigação pivô central quanto à uniformidade e eficiência de aplicação de água abaixo e acima da superfície do solo.** Piracicaba: ESALQ/ USP, 1992. 86p. Dissertação Mestrado.

SANT'ANNA NETO J.L. **A climatologia geográfica no Brasil:** origem e contexto histórico. In: Margarete C. de Costa Trindade Amorim; João Lima Sant'Anna Neto; Ana Monteiro. (Org.). Climatologia Urbana e Regional: questões teóricas e estudos de caso. 1ed.São Paulo: Outras Expressões, vol. 1, 11-73, 2013.

SCHONS, R. L. **Avaliação de parâmetros de desempenho de sistemas de irrigação por pivô central visando a sua otimização operacional.** (Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7520/RICARDO%20SCHONS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em 01 mar. 2018.

SCHONS, Ricardo Luis et al. **Crítérios para o aumento do índice de eficiência nos sistemas de irrigação tipo pivô central.** 2010. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

SOUSA, V. F. et al. (ed. téc.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

TARJUELO, J. M. **El riego por aspersión y su tecnología.** 3. ed. Madrid: Mundi, 2005. 581 p.

TEIXEIRA, Luciana de Gois Aquino et al. **Análise da gestão estratégica nas unidades rurais agrícolas com sistema de irrigação por pivô central do município de Orizona-GO.** 2009.

VORIES, E. D.; BERNUTH, R. D. **Single nozzle sprinkler performance in wind.** Transaction of the ASAE, Saint Joseph, v. 29, n. 5, p. 1325-1330, 1986.