

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Metodologias de avaliação da uniformidade de distribuição de água e de  
seleção de emissores para pivôs centrais**

Lucas Maltoni Andrade  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

**LUCAS MALTONI ANDRADE**

**Metodologias de avaliação da uniformidade de distribuição de água e de  
seleção de emissores para pivôs centrais**

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: Rubens Alves de Oliveira

Coorientadores: Luis Cesar Dias Drumond  
Catariny C. Aleman Pina  
Fernando F. da Cunha  
Job T. de Oliveira  
Paulo Roberto Cecon

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2024**

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

T

A553m  
2024

Andrade, Lucas Maltoni, 1998-

Metodologias de avaliação da uniformidade de distribuição de água e de seleção de emissores para pivôs centrais / Lucas Maltoni Andrade. – Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (89 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.

Referências bibliográficas: f. 72-76.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.721>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Irrigação agrícola. 2. Irrigação por pivô central. 3. Água - Distribuição. I. Oliveira, Rubens Alves de, 1961-.

II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

III. Título.

CDD 22. ed. 627.52

**LUCAS MALTONI ANDRADE**

**Metodologias de avaliação da uniformidade de distribuição de água e de  
seleção de emissores para pivôs centrais**

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: 26 de fevereiro de 2024.

Assentimento:

---

Lucas Maltoni Andrade  
Autor

---

Rubens Alves de Oliveira  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 25/02/2025 às 16:45:40 e pelo orientador em 26/02/2025 às 15:47:35. 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 **RN11.BFX4.CWRI** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos silenciosos sacrifícios e ao apoio  
inabalável de minha família em cada passo  
desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Sérgio e Magdala, e ao meu irmão, Breno, por apoiarem minhas escolhas de maneira absolutamente incondicional.

Ao professor orientador Rubens Alves, pelas orientações, ensinamentos e confiança depositada em mim. Seu comprometimento e bom coração transformaram meu mestrado em uma experiência gratificante e me tornaram uma pessoa melhor. Sem ele, este caminho teria sido muito mais difícil.

À Sekita Agronegócios, pela recepção e parceria inestimáveis que tornaram este estudo possível. Ao gerente de produção Lucian, pelo acompanhamento, facilitação, empolgação e sugestões que enriqueceram este trabalho.

Ao grupo GEPFOR, com orientação do professor Luiz César, e aos estagiários Pedro, André e Thiago, que prestaram grande auxílio no início e durante as avaliações de campo.

Aos coorientadores, pela estimada colaboração.

Às amigas que pude formar durante o trabalho, que tornaram os dias mais prazerosos e me presentearam com boas memórias.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

ANDRADE, Lucas Maltoni, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Metodologias de avaliação da uniformidade de distribuição de água e de seleção de emissores para pivôs centrais**. Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Coorientadores: Luis Cesar Dias Drumond, Catariny Cabral Aleman Pina, Fernando Franca da Cunha, Job Teixeira de Oliveira e Paulo Roberto Cecon.

O dimensionamento apropriado e a avaliação periódica do desempenho de pivôs centrais na agricultura irrigada são essenciais para garantir a distribuição uniforme de água no campo e a eficiência hídrica. Consequentemente, essas práticas contribuem diretamente para o aumento do rendimento das culturas e a sustentabilidade do empreendimento. Assim, teve-se como objetivo com o presente trabalho avaliar o desempenho de diferentes métodos de campo para a determinação da uniformidade de distribuição de água em pivôs centrais. Além disso, também foi realizada a análise de métodos de seleção de bocais para emissores em nível de projeto. O estudo foi realizado em dois pivôs centrais localizados no município de Rio Paranaíba - MG, sendo denominados de pivô 180° (P180) e pivô 360° (P360). A avaliação da uniformidade foi realizada utilizando-se coletores padronizados espaçados de 1 m e, posteriormente, simulando espaçamentos maiores até 12 m, com a eliminação de leituras compreendidas entre os intervalos. Os coletores foram instalados em linhas perpendiculares ao movimento do equipamento, regulado à 50% no percentímetro, em comum acordo com a empresa parceira. Avaliou-se sua disposição em diferentes posições no campo, com as linhas sendo analisadas tanto individualmente quanto em conjuntos, visando comparar metodologias descritas na literatura. Foram realizadas três repetições para cada linha de coletores, totalizando 15 ensaios de uniformidade em cinco posições para o P360 e 12 ensaios em quatro posições para o P180. As medições de vazão foram realizadas pelo método direto, com três repetições para cada numeração de bocal. No caso de bocais repetidos, as medições foram feitas apenas em um bocal representativo de cada numeração, sendo os valores obtidos comparados às vazões especificadas no catálogo do fabricante. Foram avaliadas a lâmina média, lâmina média ponderada e o coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado para pivôs centrais ( $CUC_{HH}$ ) para cada linha a partir dos valores obtidos pelos coletores. A seleção de bocais dos emissores em nível de projeto foi realizada com base em quatro combinações de critérios: os métodos da vazão aproximada e do diâmetro de bocal para dois espaçamentos entre emissores. A primeira categoria de espaçamento é baseada no espaçamento constante entre saídas,

enquanto para o segundo, adotou-se um espaçamento dobrado para os dois primeiros lances dos pivôs. Utilizou-se como referência para a seleção dos bocais as vazões e diâmetros reais necessários em cada saída, considerando como lâmina de projeto a lâmina bruta à 100% do percentímetro. As avaliações de vazão indicaram para ambos os pivôs valores superiores e com maior variação aos verificados em catálogo, implicando em maiores lâminas brutas e valores de  $CUC_{HH}$  reduzidos. As combinações dos critérios de seleção de bocais e espaçamentos apresentaram para ambos os pivôs um  $CUC_{HH}$  teórico superior ao estimado de acordo com a listagem de bocais verificada em campo. Quanto às avaliações individuais da uniformidade, não houve interação significativa para o P360 e P180 entre os fatores de espaçamento entre coletores e posição das linhas em campo. Não houve diferenças entre as médias para o fator espaçamento, com níveis de 1 a 12 m para ambos os pivôs. O fator de posição das linhas de coletores, por outro lado, apresentou diferenças entre médias para os dois equipamentos avaliados, sendo para P180 a lâmina média ponderada e para P360, a lâmina média, média ponderada e  $CUC_{HH}$ . As combinações entre linhas de coletores, representando diferentes metodologias, não apresentaram diferenças entre as médias. O  $CUC_{HH}$  médio de todos os ensaios realizados foi superior a 90% para os dois pivôs, sendo tal valor considerado excelente de acordo com classificações presentes na literatura. Já as perdas por evaporação e arraste foram semelhantes à valores máximos relatados por outros autores, sendo de 14,21 e 13,49% para P360 e P180, respectivamente.

Palavras-chave: irrigação; desempenho; uniformidade; emissor; vazão



## ABSTRACT

ANDRADE, Lucas Maltoni, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2024. **Methodologies for evaluating water distribution uniformity and selection of emitters for center pivots.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-advisers: Luis Cesar Dias Drumond, Catariny Cabral Aleman Pina, Fernando Franca da Cunha, Job Teixeira de Oliveira and Paulo Roberto Cecon.

The appropriate design, as well as periodic evaluation of the performance of center pivots in irrigated agriculture, are essential to ensure uniform water distribution over the field and water efficiency. Consequently, these practices directly contribute to increased crop yields and the sustainability of the enterprise. Thus, the objective of this study was to evaluate the performance of different field methods for determining the water distribution uniformity in center pivots. In addition, selection methods for emitters nozzles at a project level were also analyzed. The study was conducted on two center pivots located in the municipality of Rio Paranaíba - MG, referred to as the 180° pivot (P180) and 360° pivot (P360). The uniformity evaluation was carried out using standardized collectors spaced at 1 m intervals, and subsequently simulating larger spacings up to 12 m by the elimination of readings between the intervals. Collectors were installed in lines perpendicular to the equipment's movement, regulated at 50% on the percentimeter, in agreement with the company. Their arrangement in different positions in the field was evaluated, with the lines being analyzed both individually and as groups, to compare methodologies described in the literature. Three repetitions were performed for each collector line, totaling fifteen uniformity tests in five positions for P360 and twelve tests in four positions for P180. Flow measurements were conducted using the direct method, with three repetitions for each nozzle number. For repeated nozzles, measurements were made on only one nozzle for each number, and the values obtained were compared to the flow rates specified in the manufacturer's catalog. The average water depth, weighted average depth, and the modified Christiansen's uniformity coefficient for central pivots ( $CUC_{HH}$ ) were evaluated for each line based on the values obtained from the collectors. Nozzle selection for the emitters at the project level was based on four combinations of criteria: the approximate flow rate method and the nozzle diameter method for two emitter spacing categories. The first category was based on constant spacing between outlets, while the second assumed double spacing for the first two spans. The reference for the nozzle selection was the actual flow rate and diameters required for each outlet, considering a project water depth at 100% of the percentimeter.

The flow rate evaluations for both pivots indicated higher and more variable values than those reported in the manufacturer's catalog, resulting in increased water depths and reduced  $CUC_{HH}$  values. The evaluated nozzle selection combinations showed a theoretical  $CUC_{HH}$  higher than the estimated based on the field-tested nozzle listing for both pivots. Regarding individual uniformity assessments, there was no significant interaction for P360 and P180 between the factors of collectors spacing and line positions in the field. No differences were found between averages for the spacing factor, ranging from 1 to 12 m for both pivots. The collector's line position factor, on the other hand, showed differences between averages for both evaluated systems, with P180 showing differences in the weighted average water depth, and for P360, the average depth, weighted average depth, and  $CUC_{HH}$ . The combinations of collector lines, representing different methodologies, showed no significant differences. The average  $CUC_{HH}$  for all tests exceeded 90% for both pivots, a value considered excellent according to literature classifications. Meanwhile, evaporation and wind drift losses were similar to the maximum values reported by other authors, being 14.21% and 13.49% for P360 and P180, respectively.

Keywords: irrigation; performance; uniformity; emitter; flow rate

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Mapa da localização dos ensaios de campo.....                                                                                                         | 24 |
| Figura 2 – Emissor I-Wob2 UP3 com defletor de 9 ranhuras. ....                                                                                                   | 25 |
| Figura 3 – Configuração dos emissores nos primeiros lances dos pivôs P180 e P360<br>.....                                                                        | 26 |
| Figura 4 – Curvas de nível da área semicircular do P180 e arredores.....                                                                                         | 28 |
| Figura 5 – Curvas de nível da área circular do P360 e arredores .....                                                                                            | 29 |
| Figura 6 – Posição e identificação das linhas de coletores no P180 .....                                                                                         | 32 |
| Figura 7 – Perfil altimétrico das linhas de coletores do P180 .....                                                                                              | 32 |
| Figura 8 – Posição e identificação das linhas de coletores no P360 .....                                                                                         | 33 |
| Figura 9 – Perfil altimétrico das linhas de coletores do P360 .....                                                                                              | 33 |
| Figura 10 – Eliminação de leituras na simulação de espaçamentos entre coletores                                                                                  | 34 |
| Figura 11 – Áreas anelares de emissores para espaçamento uniforme ( $ESP_{uniforme}$ ) e<br>espaçamento dobrado nos dois primeiros lances ( $ESP_{campo}$ )..... | 40 |
| Figura 12 – Procedimento de seleção de bocais pelo método do coeficiente de<br>descarga.....                                                                     | 42 |
| Figura 13 – Comparação das vazões medidas do P180 e P360 com as vazões de<br>catálogo, com emissores operando com pressão de 7 mca.....                          | 48 |
| Figura 14 – Diferença percentual entre as vazões medidas e as vazões de catálogo.<br>.....                                                                       | 49 |
| Figura 15 – Lâmina total simulada para as vazões de catálogo e vazões medidas em<br>campo para o P180 e P360.....                                                | 50 |
| Figura 16 – Variação das vazões medidas e de catálogo ao longo das linhas laterais<br>do P180 e P360.....                                                        | 52 |
| Figura 17 – Lâmina total simulada do P180 considerando $ESP_{uniforme}$ e $ESP_{campo}$ para<br>os critérios de seleção de bocais $MQ_{ap}$ e $MCd$ .....        | 53 |
| Figura 18 – Lâmina total simulada do P360 considerando $ESP_{uniforme}$ e $ESP_{campo}$ para<br>os critérios de seleção de bocais $MQ_{ap}$ e $MCd$ .....        | 53 |
| Figura 19 – Boxplots dos ensaios de uniformidade com espaçamento de 1 m entre<br>coletores para cada posição de linha e repetição do P180 .....                  | 56 |
| Figura 20 – Boxplots dos ensaios de uniformidade com espaçamento de 1 m entre<br>coletores para cada posição de linha e repetição do P360 .....                  | 57 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Vazão, diâmetro do orifício e coeficiente de descarga por numeração de bocal.....                                                                                                                                                                     | 27 |
| Tabela 2 – Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) conforme Mantovani (2001).....                                                                                                                                                     | 36 |
| Tabela 3 – Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) conforme ABNT (2016) .....                                                                                                                                                         | 36 |
| Tabela 4 – Lâminas totais de projeto para diferentes regulagens do percentímetro .                                                                                                                                                                               | 38 |
| Tabela 5 – Combinações das linhas individuais de coletores para cada pivô avaliado .....                                                                                                                                                                         | 44 |
| Tabela 6 – Datas e condições climáticas no início de cada ensaio realizado .....                                                                                                                                                                                 | 45 |
| Tabela 7 – Vazões medidas para P180 e P360 comparadas à vazão de catálogo ..                                                                                                                                                                                     | 47 |
| Tabela 8 – Lâmina total e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) para as vazões medidas e de catálogo .....                                                                                                                       | 50 |
| Tabela 9 – Lâmina total e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) para as simulações de seleção de bocais para emissores do P180 e P360 .....                                                                                      | 54 |
| Tabela 10 – Médias de lâmina ponderada ( $L_{pon}$ ) e perda por evaporação e arraste ( $P_{E+A}$ ) por posição avaliada para o P360 e P180 .....                                                                                                                | 58 |
| Tabela 11 – Resumo da ANOVA para as linhas de coletores separadas, em relação à posição e espaçamento para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P180..... | 61 |
| Tabela 12 – Médias das posições das linhas de coletores para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P180.....                                               | 61 |
| Tabela 13 – Análise das linhas agrupadas para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P180.....                                                              | 63 |
| Tabela 14 – Médias das metodologias de avaliação para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P180.....                                                      | 63 |
| Tabela 15 – Resumo da ANOVA para as linhas de coletores separadas, em relação à posição e espaçamento para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P360..... | 65 |

|                                                                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 16 – Médias das posições das linhas de coletores para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P360..... | 65 |
| Tabela 17 – Análise das linhas agrupadas para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P360.....                | 67 |
| Tabela 18 – Médias das metodologias de avaliação para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P360.....        | 68 |

## SUMÁRIO

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                              | <b>14</b> |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>                                   | <b>16</b> |
| 2.1 Pivôs centrais .....                                               | 16        |
| 2.2 Uniformidade na irrigação .....                                    | 18        |
| 2.3 Métodos de avaliação da uniformidade de distribuição de água ..... | 19        |
| 2.4 Emissores .....                                                    | 20        |
| <b>3 OBJETIVOS .....</b>                                               | <b>23</b> |
| 3.1 Objetivo geral .....                                               | 23        |
| 3.2 Objetivos específicos .....                                        | 23        |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                     | <b>24</b> |
| 4.1 Área de estudo .....                                               | 24        |
| 4.2 Pivôs centrais analisados .....                                    | 24        |
| 4.2.1 Emissor I-Wob UP3 .....                                          | 25        |
| 4.2.2 Descrição do Pivô 180° .....                                     | 28        |
| 4.2.3 Descrição do pivô 360° .....                                     | 29        |
| 4.3 Testes de vazão .....                                              | 30        |
| 4.4 Ensaios de uniformidade .....                                      | 30        |
| 4.4.1 Análise de uniformidade .....                                    | 35        |
| 4.5 Condições de ensaio .....                                          | 37        |
| 4.6 Perdas por evaporação e arraste .....                              | 38        |
| 4.7 Seleção de bocais .....                                            | 39        |
| 4.8 Método de leitura da lâmina de água .....                          | 42        |
| 4.9 Análise estatística .....                                          | 43        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                  | <b>45</b> |
| 5.1 Dados climáticos .....                                             | 45        |
| 5.2 Vazões medidas e de catálogo .....                                 | 46        |
| 5.3 Seleção de bocais .....                                            | 52        |
| 5.4 Lâminas coletadas .....                                            | 55        |
| 5.5 Perdas por evaporação e arraste .....                              | 58        |
| 5.6 Uniformidade de distribuição, lâminas médias e ponderadas .....    | 60        |
| 5.6.1 Pivô 180° – Análise individual das linhas de coletores .....     | 60        |
| 5.6.2 Pivô 180° – Análise das metodologias de avaliação .....          | 62        |
| 5.6.3 Pivô 360° – Análise individual das linhas de coletores .....     | 64        |

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.6.4 Pivô 360° – Análise das metodologias de avaliação..... | 67        |
| 5.6.5 Discussão adicional .....                              | 68        |
| <b>6 CONCLUSÕES .....</b>                                    | <b>71</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                      | <b>72</b> |
| <b>APÊNDICE A – Mapa de bocais para o P180.....</b>          | <b>77</b> |
| <b>APÊNDICE B – Mapa de bocais para o P360.....</b>          | <b>82</b> |
| <b>APÊNDICE C – Gráficos para o P180.....</b>                | <b>86</b> |
| <b>APÊNDICE D – Gráficos para o P360.....</b>                | <b>88</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A eficácia na distribuição de água na irrigação é um assunto cada vez mais relevante no contexto da agricultura brasileira, tendo em vista que a gestão eficiente dos recursos hídricos é essencial para a produtividade agrícola e uso racional da água. Em 2022, de acordo com a Agência Nacional de Águas (2024), a agricultura irrigada foi responsável por uma retirada de água na ordem de aproximadamente  $1027 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , correspondendo a 50,5% de toda a retirada de água em território nacional, superando todos os outros setores combinados. Diferentes sistemas de irrigação estão entre os mais utilizados e responsáveis por esse consumo. No entanto, um sistema que merece atenção especial devido à sua rápida expansão é o pivô central (Bernardo *et al.*, 2019).

Pivôs centrais são conhecidos por apresentarem o potencial de altas uniformidades dada a elevada sobreposição de água entre os emissores, bem como à baixa velocidade de deslocamento da linha lateral (Frizzone *et al.*, 2018). No entanto, deve-se levar em consideração que os sistemas não são completamente eficientes (Elshaikh; Jiao; Yang, 2018). Além de existirem perdas naturais de água no processo de aplicação, sabe-se que sua distribuição em campo não é perfeitamente uniforme, implicando em regiões no campo com excesso e déficit hídrico (Amare; Tompai, 2022). Tal fato pode resultar em perdas na rentabilidade do empreendimento, bem como na imposição de uma maior pressão em relação aos recursos hídricos (Rodrigues; Pereira, 2009).

Nota-se que as causas dos fatores mencionados podem ser provenientes de condições ambientais, decisões equivocadas de projeto e/ou manutenção inadequada do equipamento. Elshaikh, Jiao e Yang (2018) mencionam que a avaliação da performance geral dos sistemas de irrigação não só contribui para a otimização de sistemas já em operação, como também proporciona aprendizados para projetos e manejos futuros. Elhaj e Alsayim (2021) acrescentam que sua avaliação em campo em antecedência às safras é de grande importância para os proprietários, técnicos e engenheiros na tomada de decisões de maneira assertiva. Portanto, torna-se imperativo a aferição da uniformidade em condições de campo e de maneira recorrente para o diagnóstico apropriado de possíveis causas dos desvios da uniformidade prevista (Frizzone *et al.*, 2018). Verifica-se na literatura a recomendação de métodos de amostragem para a determinação da uniformidade de distribuição



(Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016; American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2020). No entanto, não se verificou um consenso entre estudos, tampouco uma ampla avaliação entre os métodos recomendados, em função da variação de diferentes espaçamentos e locação das linhas de coletores em campo. Tais avaliações são dispendiosas em termos materiais e humanos, de maneira que se busca com este estudo avaliar se há diferenças significativas de valores de uniformidade de distribuição para distintas metodologias e configurações em campo.

Por outro lado, além da avaliação da uniformidade de sistemas já instalados, é importante se analisar ainda na concepção do projeto de um pivô central a seleção dos diâmetros dos bocais dos emissores a serem utilizados. De acordo com Rogers, Alam e Shaw (2008), existem diversas opções comerciais capazes de entregar bons resultados de eficiência e uniformidade. No entanto, Martin *et al.* (2012) salientam que a seleção apropriada dos emissores é fundamental para se atingir as maiores eficiências possíveis. Isso ocorre porque tal equipamento tem relação direta com a uniformidade de distribuição de água, podendo afetar a produtividade das culturas e elevar os custos operacionais.

Apesar da relevância da seleção apropriada de emissores já mencionada, verificou-se que é notadamente escassa na literatura estudos que analisam e/ou propõem metodologias de seleção de bocais para emissores comerciais, bem como as implicações em função de diferentes abordagens. Assim, busca-se também com o presente estudo avaliar o efeito de diferentes métodos de seleção de bocais para emissores nos valores de uniformidade de distribuição de água.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Pivôs centrais

Frank L. Zybach desenvolveu o primeiro protótipo de pivô central em 1947, nos Estados Unidos, marcando um avanço significativo na área da irrigação. Embora o equipamento tenha passado por diversas modernizações ao longo dos anos, seu princípio fundamental permaneceu essencialmente o mesmo. Esse tipo de sistema pode ser caracterizado como uma linha lateral apoiada em torres móveis capazes de girar ao redor de um eixo central, irrigando, portanto, uma área circular (Sadeghi *et al.*, 2022). Além disso, canhões hidráulicos podem ser instalados nas extremidades dos lances em balanço para um incremento da área irrigada (Frizzone *et al.*, 2018). No entanto, essa prática tem caído em desuso devido às baixas eficiências frequentemente envolvidas, e, portanto, tornando a relação retorno/investimento desfavorável.

Quanto às suas características de projeto, normalmente, esse sistema possui um raio de 200 a 800 metros, com o movimento das torres ocorrendo por meio de sucessivos desalinhamentos e alinhamentos em relação à torre da extremidade, sendo a velocidade desta regulada pelo percentímetro. Tendo em vista que a velocidade instantânea da última torre é fixa, a função do percentímetro é indicar em porcentagem a fração de tempo em que a torre irá se mover. Logo, para uma regulagem de 50%, a última torre levará o dobro de tempo para se deslocar pela área irrigada, e, portanto, aplicará o dobro da lâmina de água, quando comparado à regulagem em 100% (Mantovani; Bernardo; Palaretti, 2009). A distância entre as torres de um pivô central, chamada de lance, geralmente varia de 24 a 76 metros, a depender das especificações do sistema. Cada torre possui seu próprio mecanismo de tração, permitindo a movimentação de maneira independente. Os pivôs mais antigos eram repletos de problemas de caráter mecânico, principalmente quanto ao alinhamento da linha lateral. No entanto, esse problema foi essencialmente resolvido com sistemas de controle por feedback das velocidades das torres (Walker, 1979). Assim, a coordenação entre torres é mantida de maneira que o alinhamento da linha lateral seja preservado, uma vez que as torres mais centrais, devido ao menor arco a ser percorrido, movimentam-se por uma menor fração do tempo (Bernardo *et al.*, 2019).

As vazões dos emissores presentes no pivô central são crescentes ao longo da linha lateral, tendo em vista que as extremidades dos pivôs se deslocam mais rapidamente, a fim de cobrir maior área. Logo, as taxas de aplicação de água dos emissores nessa região precisam ser mais elevadas. Como consequência, são nessas extremidades que o escoamento superficial possui maior chance de ocorrência, dada a superação das taxas de aplicação de água com relação à taxa de infiltração do solo (Waller; Yitayew, 2016).

Especificamente para o cenário nacional, tem-se conhecimento de que o primeiro pivô central no Brasil foi instalado em 1979, em Brotas, São Paulo, na bacia do rio Tietê, com uma área irrigada de 76 hectares (Ana, 2019). Desde então, o uso desse sistema se expandiu consideravelmente. Na última década, houve um crescimento anual de aproximadamente 200 mil hectares em novas áreas irrigadas, com os pivôs centrais sendo responsáveis por metade dessa expansão (Ana, 2024). Em 2022, a área equipada com esse sistema alcançou 1,92 milhão de hectares, com 92,5% dessa área concentrada em 6 estados, sendo: 29,2% em Minas Gerais; 16,3% em Goiás; 15,3% na Bahia; 12,9% em São Paulo; 10,2% no Rio Grande do Sul e 8,6% no Mato Grosso (Ana, 2023).

Com essa trajetória de crescimento, as projeções indicam que em 2030 sejam alcançados 2,88 milhões de hectares irrigados por pivôs centrais, consolidando-se como o principal sistema de irrigação adotado no país, com uma participação estimada de 28,6% dos 10,09 milhões de hectares irrigados em território nacional (Ana, 2019).

Entre as razões da ampla adoção dos pivôs centrais, pode-se citar a capacidade de irrigar maiores áreas em comparação com outros sistemas, a automação do equipamento e aplicação de lâminas reduzidas, proporcionando seu aproveitamento para aplicação de fertilizantes, defensivos agrícolas, entre outras (Mantovani; Bernardo; Palaretti, 2009). Por outro lado, uma desvantagem que deve ser considerada é que, devido à sua natureza circular, mesmo com diversos pivôs instalados próximos entre si, ainda há setores não irrigados, conhecidos como 'corners' ou cantos. Assim, se cultivados, esses espaços não recebem água diretamente do pivô, exigindo a instalação de sistemas de irrigação alternativos. Caso contrário, esses cantos implicam na perda de área com potencial produtivo, comprometendo o uso eficiente da terra.

## 2.2 Uniformidade na irrigação

A uniformidade na distribuição de água é de grande importância visto a necessidade de se buscar uma distribuição equitativa do recurso hídrico em campo, a fim de promover o crescimento homogêneo da cultura agrícola e uso racional da água. O déficit hídrico pode impor perdas consideráveis de produção, enquanto que uma lâmina em excesso pode causar a contaminação ambiental com o carreamento de nutrientes do solo para corpos hídricos ou mesmo por percolação profunda (Solomon, 1990; Ascough; Kiker, 2002).

Diversos estudos destacam de maneira consistente os principais fatores que influenciam a uniformidade de distribuição de água em pivôs centrais. Entre os mais relevantes, estão a velocidade do vento, a altura dos emissores, o espaçamento entre eles e a adoção de bocais inadequados para tais emissores. Tem-se, ainda, a variação de pressão ao longo da linha lateral, podendo ser acentuada em decorrência do relevo (Keller; Bliesner, 1990; Heinemann *et al.*, 1998; Rezende *et al.*, 1998). Diante dessas influências, torna-se essencial a avaliação da uniformidade, tendo em vista que a ação isolada ou conjunta desses fatores pode comprometer de maneira considerável o desempenho do sistema.

Uma maneira de realizar tais avaliações é por meio de indicadores ou coeficientes de uniformidade, que permitem avaliar a variação das lâminas aplicadas durante um evento de irrigação em relação à lâmina média. De acordo com Frizzone *et al.* (2018), considerando a dispersão dos valores, torna-se possível por meio desses coeficientes a classificação qualitativa da uniformidade praticada pelo equipamento.

As medidas de cálculo previstas na literatura são variadas, podendo-se citar os coeficientes de Christiansen (1942), modificado por Heermann e Hein (1968) para pivôs centrais, considerando uma ponderação da distância do coletor para o centro do pivô ( $R_J$ ), denominado como  $CUC_{HH}$ ; Wilcox e Swailes (1947), Coeficiente de uniformidade estatístico (CUE); Hart (1961), Coeficiente de uniformidade de Hart (CUH) e o valor de uniformidade de distribuição (UD), proposto por SCS-USDA.

Frizzone *et al.* (2018) destacam que o  $CUC_{HH}$  é reconhecido por muitos como o coeficiente mais utilizado para medir a uniformidade de distribuição de água, sendo frequentemente adotado como parâmetro de referência em trabalhos científicos. Segundo Kushwaha e Kanojia (2018), os valores de  $CUC_{HH}$  devem idealmente estar acima de 90%, sendo, assim, o reflexo de bons níveis de manutenção e operação,

garantindo o aproveitamento do potencial de uniformidade do sistema. Essa recomendação está de acordo com outras fontes, como Mantovani (2001) e ABNT (2016), que classificam respectivamente a uniformidade como excelente e muito boa para valores de  $CUC_{HH}$  maiores que 90%.

## 2.3 Métodos de avaliação da uniformidade de distribuição de água

Atualmente, existem normas que estabelecem as metodologias de avaliação da uniformidade dos pivôs centrais. A ABNT (2016) e a ASABE (2020) apontam condições ideais para a realização de ensaios e recomendam a utilização de recipientes padronizados, conhecidos como coletores, para a coleta de água. Esses coletores devem ser dispostos em campo de maneira uniformemente espaçada e posicionados ao longo da área irrigada.

De acordo com as recomendações, é sugerido um diâmetro mínimo de coleta de água para os coletores empregados, sendo equivalente a pelo menos 60 milímetros (ASABE, 2020), embora também seja aconselhável utilizar coletores tão maiores quanto for possível em nível prático. Os mesmos devem ser dispostos em no mínimo duas linhas radiais com  $3^\circ$  entre si, com espaçamento máximo entre coletores de 3 ou 5 m para sprays e aspersores de impacto, respectivamente. Bernardo *et al.* (2019) mencionam ainda, com base nas normas, a adoção de quatro linhas radiais com  $90^\circ$  entre si, com espaçamento variando de 4 a 10 m, sem indicação de dependência do espaçamento em relação ao dispositivo de aplicação de água.

Lima e Zocoler (2010) avaliaram, de acordo com ASABE (2020), linhas de coletores em posições de aclave, declive e nível e concluíram que, não só a lâmina média foi diferente, mas também o consumo elétrico e a uniformidade de distribuição de água são afetadas pela posição da linha lateral do pivô central. Já Tambo *et al.* (2022), também de acordo com ASABE (2020), afirmam que uma linha ao longo do raio do pivô central em áreas de terreno mais regular e equipadas com válvulas reguladoras de pressão pode ser o suficiente para analisar a uniformidade de distribuição de água. No entanto, acrescentam que o mesmo não é válido quando o equipamento apresenta pressões aquém das necessárias e(ou) quando a área analisada apresenta um perfil irregular. Os mesmos autores também avaliaram a uniformidade com coletores dispostos de maneira circular e em malha, indicando

serem adequados para apontarem efeitos da topografia, para o padrão circular, bem como patinagem e parada das torres, para o padrão em malha.

Li *et al.* (2020) ainda mencionam que o tamanho, bem como a altura de instalação dos coletores afetam a avaliação da uniformidade de distribuição, mesmo seguindo as orientações de dimensão mínima dos coletores, espaçamento e disposição de linhas em campo de acordo com ABNT (2016) e ASABE (2020).

Em relação ao espaçamento adotado entre os coletores, poucas e relativamente antigas foram as referências encontradas na literatura que sustentam as recomendações atuais (Davis, 1966; Bremond; Molle, 1995; Marjang; Merkley; Shaban, 2012). Tal descompasso pode ser prejudicial tendo em vista a constante atualização tecnológica dos pivôs centrais, bem como dos dispositivos de aplicação de água, enquanto as recomendações atualmente praticadas se baseiam em estudos pouco recentes. A mão de obra e o tempo necessários para realizar o procedimento de avaliação da uniformidade de distribuição em campo são elevados e variam consideravelmente em função do espaçamento praticado. Logo, é de interesse comum que as avaliações de uniformidade, quando realizadas, sejam de metodologia adequada à realidade das tecnologias atuais, e, portanto, confiáveis e otimizadas.

## 2.4 Emissores

A irrigação por aspersão é um método de irrigação pressurizado que distribui a água sobre as culturas agrícolas fragmentando os jatos de água em pequenas gotas que simulam a precipitação natural (Chauhdary *et al.*, 2023). Pivôs centrais fazem parte dessa categoria, sendo também considerados como sistemas mecanizados, dada a sua movimentação em campo promovida pelas torres móveis (Bernardo *et al.*, 2019). Essa fragmentação da água, característica dos sistemas de irrigação por aspersão, é realizada por meio de dispositivos chamados de emissores, que essencialmente convertem a energia de pressão do sistema em energia cinética, sob a forma de um jato de água.

Os emissores devem operar com a vazão esperada, conforme as especificações do fabricante, apesar de pequenas variações serem aceitas. Para isso, reguladores de pressão podem ser instalados na entrada dos emissores, de modo a garantir seu funcionamento adequado em casos de sobrepressão (Walker, 1979). Suas especificações, como vazão, área molhada, dinâmica de fragmentação dos jatos

de água, pressão de serviço, entre outras, variam de forma considerável, a depender das necessidades do projeto.

Em revisão às classificações e utilizações de emissores em geral, Rocha *et al.* (2023) estabeleceram critérios de diferenciação como pressão de serviço, área de cobertura, número de bocais, movimento fixo ou giratório do jato de água, dentre outras características. Nota-se que para pivôs centrais, o tipo mais utilizado são os emissores de pressão muito baixa, com a pressão de serviço compreendida entre 4 e 10,2 mca, equipados com placas defletoras giratórias (Rovelo *et al.*, 2019), e capazes de entregar boas uniformidades de distribuição de água com menor custo energético.

Mohammed e Ahmed (2022) mencionam cinco fatores que devem ser levados em consideração a respeito da performance de um emissor, sendo [1] tamanho de gota, [2] taxa de aplicação, [3] uniformidade, [4] raio molhado e [5] vazão. Particularmente acerca da uniformidade, sabe-se que, além de parâmetros hidráulicos e de espaçamentos, a mesma é função do perfil de aplicação de água dos emissores (Amir; Alchanatis, 1992). Estudos simularam emissores com perfis teóricos de aplicação de água, cabendo citar como perfis mais comuns o elíptico, triangular e retangular (Valín *et al.*, 2012; Mohamed *et al.*, 2021). Tarjuelo *et al.* (1999) acrescentam que além dos fatores inerentes ao emissor, o desempenho do mesmo também está sujeito às condições de campo, mencionando principalmente a ação do vento, temperatura e umidade relativa do ar. Por outro lado, também é possível simular a performance de um emissor de acordo com sua vazão teórica, considerando um orifício de saída circular, em função do seu diâmetro e da pressão de operação (Rogers; Alam; Shaw, 2008).

De acordo com Keller e Bliesner (1990), a seleção dos bocais para pivôs centrais deve ser feita de maneira criteriosa, afim de garantir que a lâmina aplicada seja aproximadamente constante. Na prática, os valores de vazão dos emissores e seus bocais associados apresentam comportamento de crescimento à medida que se afastam do centro do pivô, devido à maior área irrigada resultante do aumento do raio (Rajan *et al.*, 2015). Esses valores teóricos de vazão são contínuos, podendo assumir qualquer valor. Por outro lado, os emissores comercialmente disponíveis apresentam o comportamento de uma variável discreta, fornecendo valores específicos de vazão, determinados por distintos diâmetros dos bocais, frequentemente identificados por cores.

Assim, nota-se que dificilmente a vazão calculada em fase de projeto será plenamente atendida, visto a incompatibilidade entre os valores teóricos e os limites dos emissores comerciais (Silva; Azevedo, 1998). Como resultado, dentro dos limites operacionais de cada emissor, haverá, inevitavelmente, áreas com vazões superiores e/ou inferiores àquelas originalmente previstas no projeto. Dessa forma, torna-se essencial realizar a seleção de emissores de maneira que a discrepância entre as vazões teóricas previstas no projeto e as observadas pelos emissores comerciais sejam minimizadas.



### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Avaliar metodologias de determinação da uniformidade de distribuição de água em pivôs centrais, considerando variados padrões da amostragem, e analisar métodos de seleção de bocais para emissores em condição de projeto.

#### **3.2 Objetivos específicos**

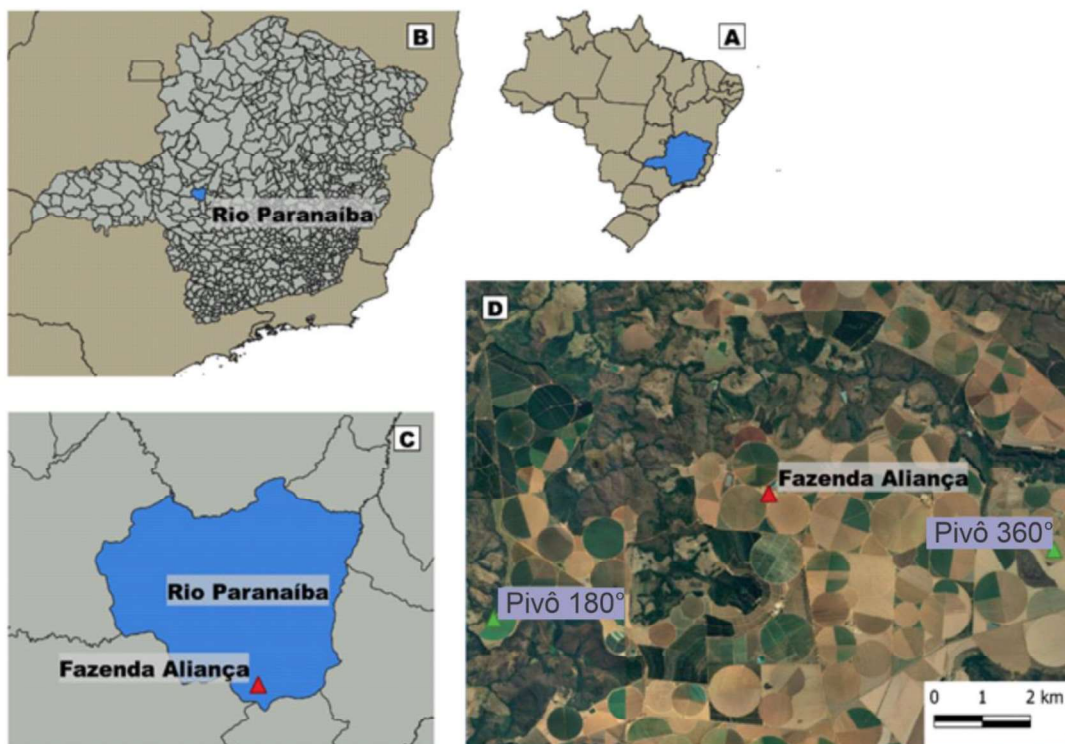
- Determinar o desempenho de diferentes métodos de avaliação da uniformidade de distribuição de água, considerando o espaçamento entre coletores de água, o número de fileiras de coletores instaladas no campo e a irregularidade do terreno no local de instalação.
- Avaliar metodologias de seleção de bocais de emissores para pivôs centrais com base na vazão, a fim de maximizar a uniformidade de distribuição teórica.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

Os ensaios foram conduzidos no município de Rio Paranaíba – MG, na fazenda Aliança, pertencente ao grupo “Sekita Agronegócios”, com coordenadas  $19^{\circ}24'10''\text{S}$  e  $46^{\circ}15'41''\text{O}$  e elevação de 1.184 m, conforme indicado na Figura 1. Os pivôs presentes na fazenda contam com assessoria externa dedicada à avaliação, manutenção e adequação dos equipamentos em questão. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é Cwb, ou seja, clima com verão temperado e inverno seco (Alvares *et al.*, 2013).

Figura 1 – Mapa da localização dos ensaios de campo



Fonte: Autor.

### 4.2 Pivôs centrais analisados

Como amostra, foram utilizados dois pivôs centrais do fabricante VALMATIC, denominados Pivô 180° (P180), situado nas coordenadas  $19^{\circ}25'38''\text{S}$ ;  $46^{\circ}18'59''\text{O}$ , e

Pivô 360° (P360), situado nas coordenadas 19°24'49"S; 46°12'19"O. Foram levantados os perfis altimétricos para os respectivos pivôs adotando-se modelos digitais de elevação (MDE) do programa europeu 'Copernicus' com resolução espacial de 30 m, para análise em maior escala. Não foi possível determinar a idade dos equipamentos visto que eles são usualmente movidos para outras áreas a serem irrigadas em diferentes safras, havendo a troca de componentes com outros pivôs.

#### 4.2.1 Emissor I-Wob UP3

Ambos os pivôs centrais são equipados com emissores Senninger I-Wob2 UP3, com defletor I-Wob 9 ranhuras (preto) (Figura 2) instalados a aproximadamente 1,83 m em relação ao solo, espaçamento de 2,29 m, e válvulas reguladoras de pressão PSR-2 de 7 mca.

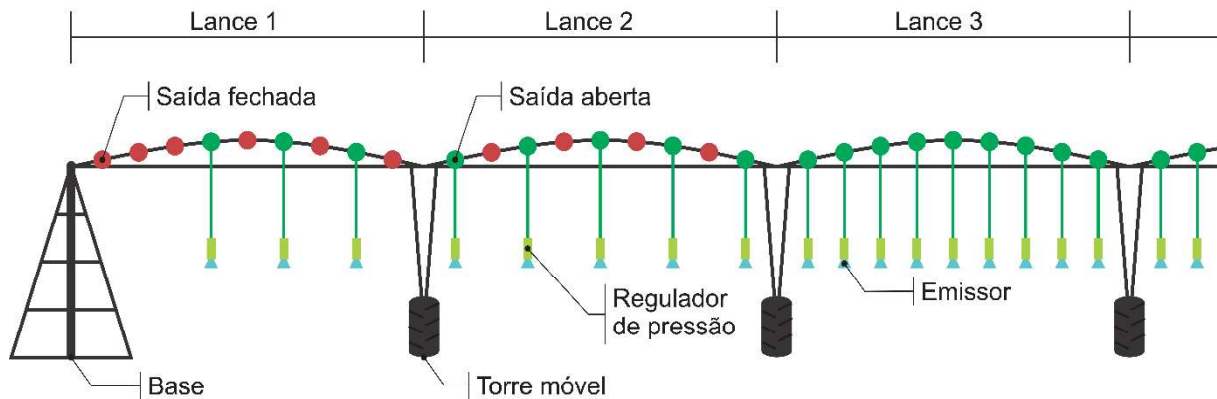
Figura 2 – Emissor I-Wob2 UP3 com defletor de 9 ranhuras.



Fonte: Catálogo Senninger.

Os três emissores iniciais do primeiro lance do P180 e P360 foram fechados, visto a proximidade da torre central. Ainda, para os dois primeiros lances dos pivôs, as saídas de emissores são alternadas, diminuindo a sobreposição de água, conforme indicado na Figura 3.

Figura 3 – Configuração dos emissores nos primeiros lances dos pivôs P180 e P360



Fonte: Autor.

De acordo com as informações presentes no catálogo do fabricante, tal modelo de emissor é capaz de receber os bocais removíveis de nº6 ao nº26 (Tabela 1) e, operando à pressão de 7 – 11 mca, apresenta uma vazão ( $Q_{\text{catálogo}}$ ) de 182 a 4.168  $\text{Lh}^{-1}$ , bem como um diâmetro molhado de 10,4 a 17,4 m. Foi incluída na Tabela 1 os valores de coeficiente de descarga ( $C_d$ ) para cada numeração de bocal, a uma pressão de serviço de 7 mca, seguindo o cálculo indicado pela Equação (1):

$$C_{d_i} = \frac{4 * q_i}{\pi D_i^2 \sqrt{2gP_s}} \quad (1)$$

em que  $D_i$  é o diâmetro do bocal do aspersor 'i' (m);  $q_i$ , a vazão do aspersor 'i' ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ );  $g$ , aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ );  $P_s$ , pressão de serviço (m); e  $C_{d_i}$ , coeficiente de descarga do aspersor 'i', adimensional.

Tabela 1 – Vazão, diâmetro do orifício e coeficiente de descarga por numeração de bocal

| Nº do bocal   Cor       | Diâmetro do bocal (mm) | Vazão (Q <sub>catálogo</sub> ) l/h | Coeficiente de descarga (Cd) |
|-------------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Nº 6 Dourado            | 2,38                   | 182                                | 0,9676                       |
| Nº 6,5 Dourado          | 2,59                   | 213                                | 0,9562                       |
| Nº 7 Lima               | 2,78                   | 248                                | 0,9664                       |
| Nº 7,5 Lima             | 2,97                   | 286                                | 0,9764                       |
| Nº 8 Lilás              | 3,18                   | 325                                | 0,9679                       |
| Nº 8,5 Lilás            | 3,38                   | 368                                | 0,9701                       |
| Nº 9 Cinza              | 3,57                   | 411                                | 0,9711                       |
| Nº 9,5 Cinza            | 3,76                   | 459                                | 0,9777                       |
| Nº 10 Turquesa          | 3,97                   | 509                                | 0,9726                       |
| Nº 10,5 Turquesa        | 4,17                   | 561                                | 0,9716                       |
| Nº 11 Amarelo           | 4,37                   | 618                                | 0,9746                       |
| Nº 11,5 Amarelo         | 4,57                   | 675                                | 0,9733                       |
| Nº 12 Vermelho          | 4,76                   | 736                                | 0,9782                       |
| Nº 12,5 Vermelho        | 4,95                   | 799                                | 0,9820                       |
| Nº 13 Branco            | 5,16                   | 865                                | 0,9784                       |
| Nº 13,5 Branco          | 5,36                   | 933                                | 0,9780                       |
| Nº 14 Azul              | 5,56                   | 1004                               | 0,9781                       |
| Nº 14,5 Azul            | 5,77                   | 1077                               | 0,9742                       |
| Nº 15 Marrom-escuro     | 5,95                   | 1154                               | 0,9816                       |
| Nº 15,5 Marrom-escuro   | 6,15                   | 1231                               | 0,9801                       |
| Nº 16 Laranja           | 6,35                   | 1313                               | 0,9806                       |
| Nº 16,5 Laranja         | 6,55                   | 1397                               | 0,9806                       |
| Nº 17 Verde-escuro      | 6,75                   | 1483                               | 0,9802                       |
| Nº 17,5 Verde-escuro    | 6,93                   | 1572                               | 0,9857                       |
| Nº 18 Roxo              | 7,14                   | 1663                               | 0,9824                       |
| Nº 18,5 Roxo            | 7,34                   | 1756                               | 0,9816                       |
| Nº 19 Preto             | 7,54                   | 1851                               | 0,9805                       |
| Nº 19,5 Preto           | 7,75                   | 1949                               | 0,9772                       |
| Nº 20 Turquesa-escura   | 7,94                   | 2049                               | 0,9788                       |
| Nº 20,5 Turquesa-escura | 8,13                   | 2151                               | 0,9800                       |
| Nº 21 Mostarda          | 8,33                   | 2255                               | 0,9787                       |
| Nº 21,5 Mostarda        | 8,53                   | 2362                               | 0,9776                       |
| Nº 22 Castanho          | 8,73                   | 2471                               | 0,9764                       |
| Nº 22,5 Castanho        | 8,94                   | 2582                               | 0,9729                       |
| Nº 23 Creme             | 9,13                   | 2696                               | 0,9740                       |
| Nº 23,5 Creme           | 9,32                   | 2810                               | 0,9742                       |
| Nº 24 Azul-escuro       | 9,53                   | 2925                               | 0,9699                       |
| Nº 24,5 Azul-escuro     | 9,73                   | 3043                               | 0,9680                       |
| Nº 25 Cobre             | 9,92                   | 3162                               | 0,9677                       |
| Nº 25,5 Cobre           | 10,11                  | 3282                               | 0,9670                       |
| Nº 26 Bronze            | 10,32                  | 3402                               | 0,9620                       |
| Cd <sub>médio</sub>     |                        |                                    | 0,9749                       |

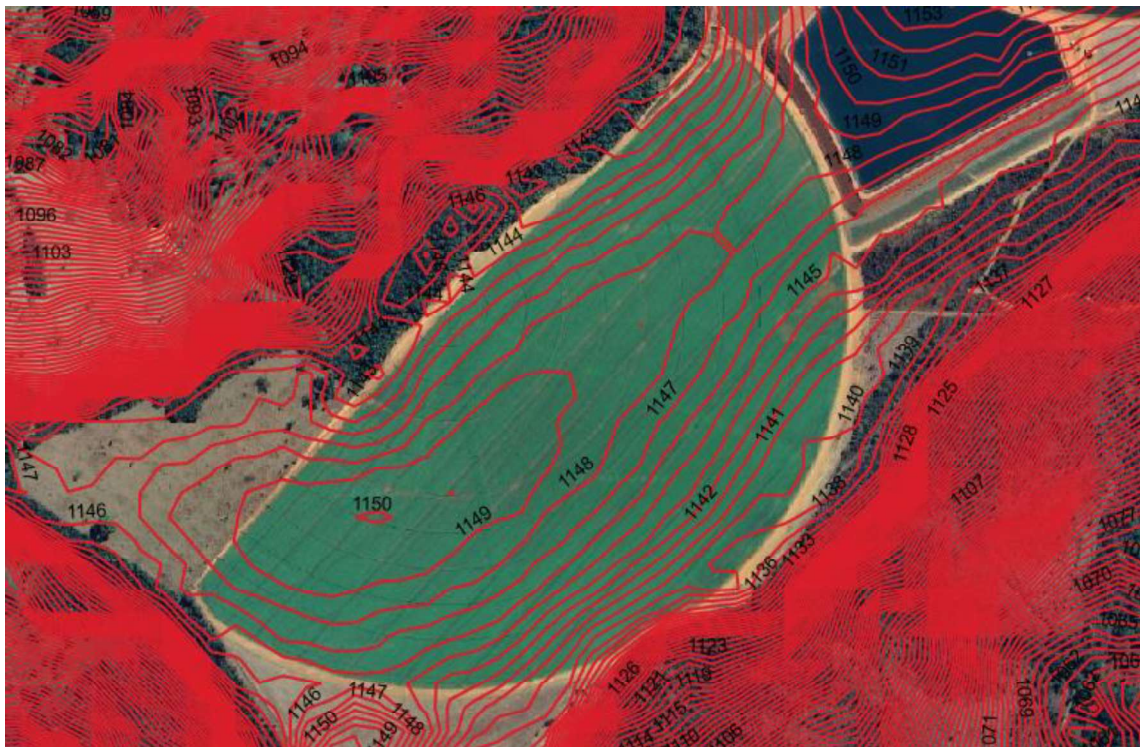
Fonte: Catálogo Senninger.

#### 4.2.2 Descrição do Pivô 180°

O pivô 180° apresenta um raio total de 498,96 m (10 lances e balanço), com uma área irrigada de 35,3 ha, tempo de volta a 100% de 10,25 horas, vazão de 206,58 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> e uma lâmina total com pivô regulado a 100% no percentímetro igual a 2,71 mm. O equipamento possui 193 emissores instalados ao longo da tubulação, com a numeração de bocais tendo início no n° 6 até o n° 22,5 de acordo com a classificação do fabricante, com um spray final da fabricante Senninger instalado na última saída. O pivô é abastecido por um reservatório instalado ao lado, com conjunto motobomba suspenso em balsa, sendo possível identificar a estrutura na Figura 4.

De acordo com as especificações disponibilizadas, apresenta uma pressão na base e no balanço de 35 e 15 mca, respectivamente. A listagem de bocais, fornecida pela empresa parceira e validada em campo, devido a sua extensão, encontra-se indicada no Apêndice A.

Figura 4 – Curvas de nível da área semicircular do P180 e arredores

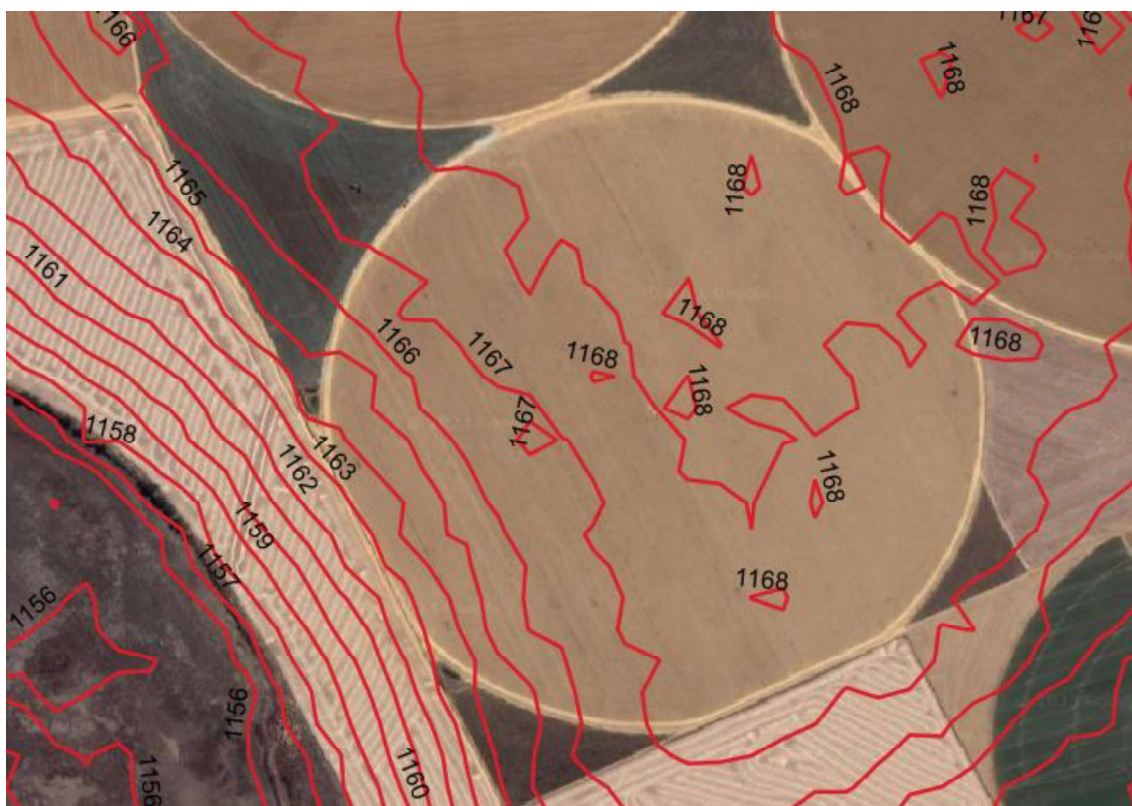




#### 4.2.3 Descrição do pivô 360°

O pivô 360° (Figura 5) apresenta um raio total de 301,19 m (6 lances e balanço), com uma área irrigada de 28,5 ha, tempo de volta a 100% de 6,69 horas, vazão de  $186,99 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  e uma lâmina total com pivô regulado a 100% no percentímetro igual a 4,39 mm. O equipamento possui 111 emissores instalados ao longo da tubulação, com a numeração de bocais tendo início no nº6 até o nº26 de acordo com a classificação do fabricante. Além disso, há uma saída adicional equipada com o emissor de fim de pivô R55i VT, bocal verde nº80, da fabricante Nelson. O pivô é abastecido por um reservatório localizado à aproximadamente 700 m, sentido norte, com o conjunto motobomba instalado externamente. De acordo com as especificações disponibilizadas, apresenta uma pressão na base e no balanço de 36 e 14 mca, respectivamente. A listagem de bocais, fornecida pela empresa parceira e validada em campo, devido a sua extensão, encontra-se indicada no Apêndice B.

Figura 5 – Curvas de nível da área circular do P360 e arredores



Fonte: Imagem do programa Copernicus, resolução 30x30. Autor.

### 4.3 Testes de vazão

Para os pivôs analisados, foi medida a vazão de apenas um dos emissores ( $Q_{\text{medido}}$ ) associado a cada número de bocal instalado no equipamento, uma vez pressurizado. Para o P180, foram medidas as vazões de 29 emissores, com três repetições, totalizando 87 medições. Já para o P360, foram 32 emissores, totalizando 96 medições. No processo de medição de vazão foram empregados baldes transparentes de 20 litros, um cronômetro com escala até décimo de segundo, uma proveta graduada de 1 litro e um recipiente fechado para direcionar toda a água do emissor para o balde. Foram cronometrados os tempos de enchimento dos baldes a partir do momento em que a vazão começou a ser direcionada. Assim, obteve-se a vazão para cada repetição pela Equação (2):

$$q = \frac{V_c}{T_c} \quad (2)$$

em que  $q$  é a vazão do aspersor ( $L \cdot s^{-1}$ );  $V_c$ , volume coletado (L); e  $T_c$ , tempo de coleta (s).

Os valores de vazão que apresentaram distorção foram descartados e uma nova medição foi realizada. Os valores médios de vazão de cada emissor ( $Q_{\text{medido}}$ ) foram posteriormente comparados com os valores de vazão indicados no catálogo do fabricante ( $Q_{\text{catálogo}}$ ) apresentados na Tabela 1.

### 4.4 Ensaios de uniformidade

Para coleta da lâmina de água aplicada pelo pivô central foram utilizados kits de ensaio de precipitação, compostos por coletores de água idênticos entre si, com altura de 10,2 cm e diâmetro de 8 cm, da marca FABRIMAR, com área de coleta de 56,2 cm<sup>2</sup>. A leitura dos volumes coletados foi realizada por meio de proveta transparente graduada em mililitros com escala de leitura de 1,0 mL, com posterior conversão para lâmina por meio da divisão do volume pela área do coletor.

Os coletores foram numerados em ordem crescente a partir do primeiro recipiente posicionado próximo ao centro do pivô central e instalados a aproximadamente 0,7 m acima do nível do solo, de maneira perpendicular ao



movimento do equipamento. A numeração em ordem crescente é necessária para a ponderação das leituras em relação à área correspondente, visto que a área representada pelo coletor aumenta com a sua distância em relação ao centro do pivô central.

Foram testadas quatro combinações das linhas de coletores, seguindo as metodologias de avaliação de uniformidade mencionadas anteriormente, sendo: [1] Uma única linha em nível ( $MA_{única}$ ); [2] Duas linhas com angulação entre si de  $3^\circ$  ( $MA_{ABNT}$ ); [3] 3 linhas, sendo a primeira linha no sentido de maior aclave, a segunda linha no sentido de maior declive, e a terceira, disposta ao longo do nível ( $MA_{3\text{ linhas}}$ ); e [4] 4 linhas perpendiculares entre si ( $MA_{4\text{ linhas}}$ ).

Devido à natureza semicircular do P180, adotou-se apenas as metodologias de avaliação  $MA_{única}$ ,  $MA_{ABNT}$  e  $MA_{3\text{ linhas}}$ , sendo que para  $MA_{3\text{ linhas}}$ , as duas linhas posicionadas nas regiões irregulares ficaram sujeitas tanto ao aclave quanto ao declive do terreno.

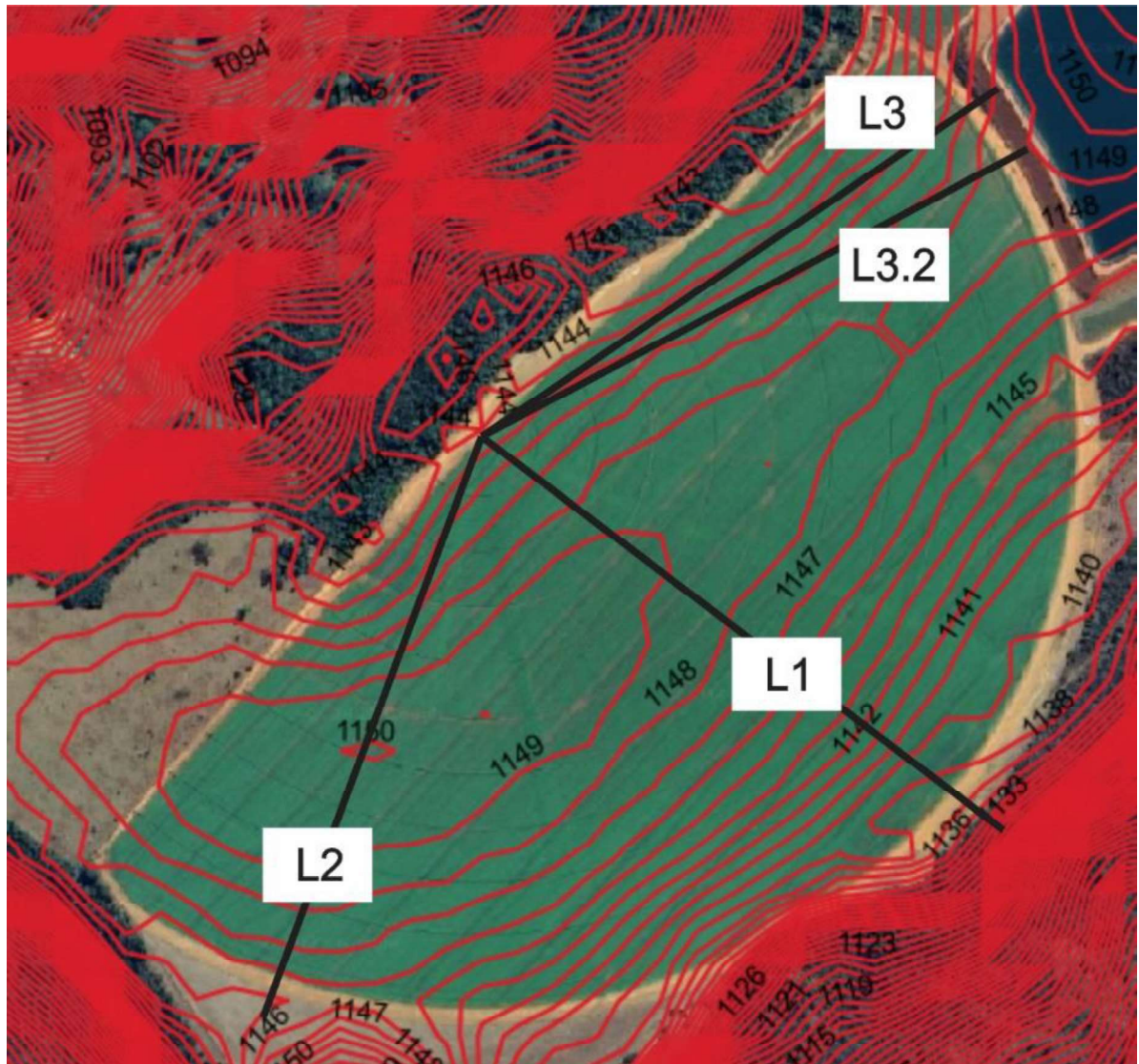
Para P360, não foi possível empregar a metodologia  $MA_{3\text{ linhas}}$  por completo, tendo em vista que não havia área em aclave no pivô. Assim, adotou-se apenas duas linhas de coletores, sendo elas as linhas L2 e L4. Em decorrência dessa adaptação, denominou-se o método adaptado para P360 de  $MA_{3\text{ linhas}}^*$ .

As ilustrações das disposições em campo das linhas de coletores encontram-se indicadas nas Figuras 6 a 8, seguidas dos respectivos perfis de elevação.

Nota-se pela Figura 7 que L3 possui a menor diferença entre cotas, de aproximadamente 2 m entre o ponto central e a extremidade. Já L1 e L2 apresentam diferenças de cota de aproximadamente 5,12 e 6 m, respectivamente, em relação ao ponto central e a área mais alta. Já em relação à extremidade, L1 apresentou diferença de 5,36 m abaixo do ponto de referência, enquanto L2 e L3.2, 1,94 e 3,7 m acima da referência, respectivamente.

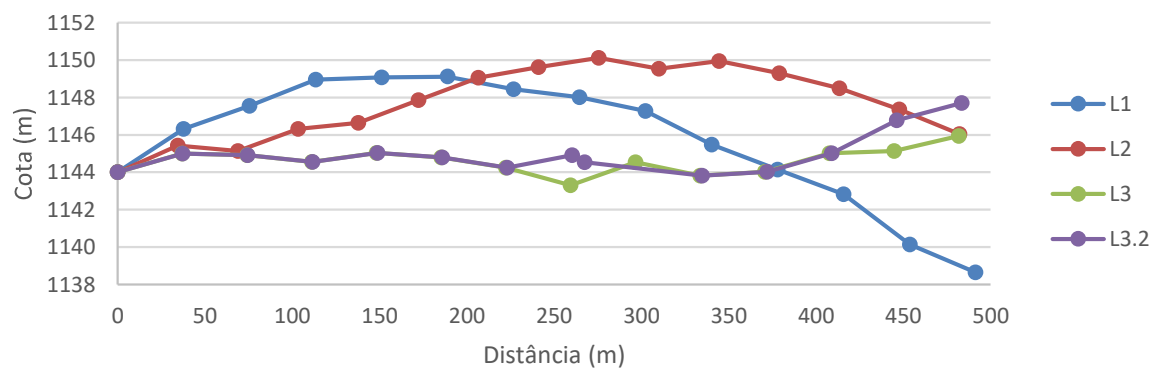
De acordo com as Figuras 8 e 9, tem-se que L2 é a linha de coletores sujeita a maiores diferenças de cota no P360, apresentando um desnível de aproximadamente 4,81 m. Para as demais linhas, os desníveis foram de 0,4 m para L1; 0,79 m para L3; 1,06 m para L4 e 0,45 m para L4.2.

Figura 6 – Posição e identificação das linhas de coletores no P180



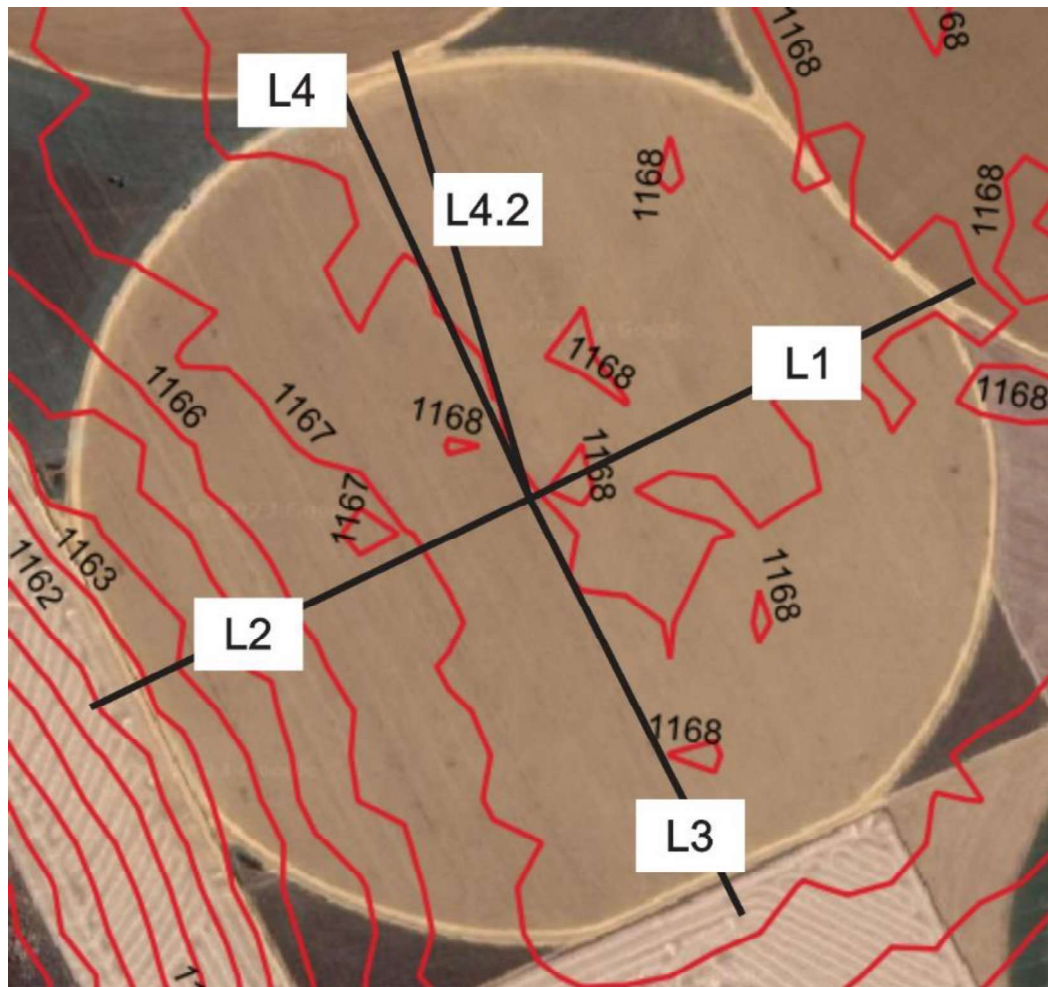
Fonte: Imagem do programa Copernicus, resolução 30x30. Autor.

Figura 7 – Perfil altimétrico das linhas de coletores do P180



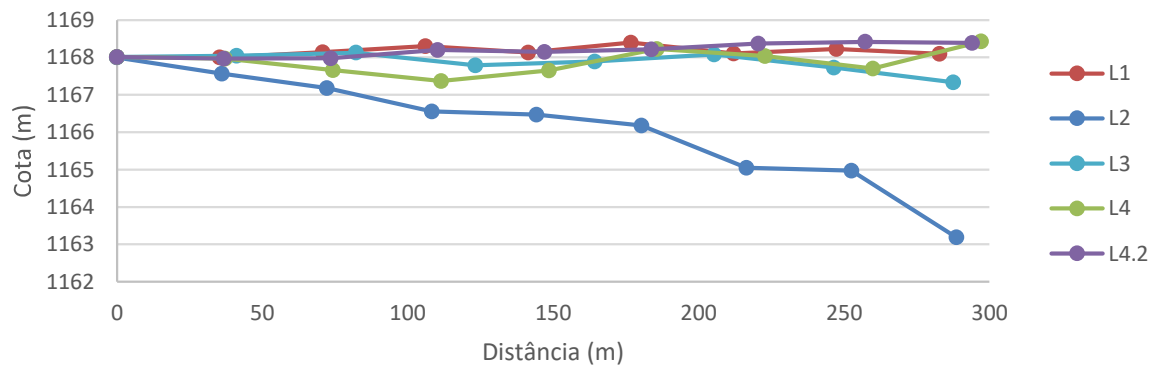
Fonte: Autor.

Figura 8 – Posição e identificação das linhas de coletores no P360



Fonte: Imagem do programa Copernicus, resolução 30x30. Autor.

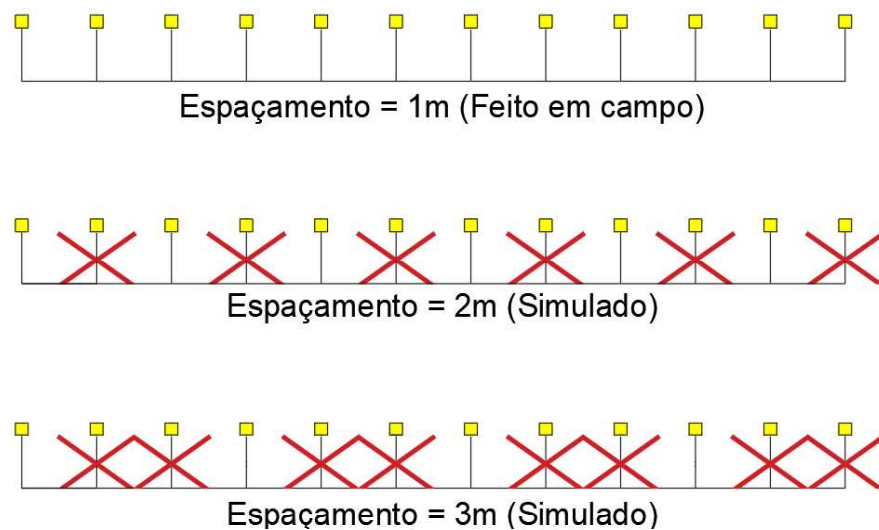
Figura 9 – Perfil altimétrico das linhas de coletores do P360



Fonte: Autor.

Para cada posição, os coletores foram instalados com espaçamento de 1 m entre si. Dessa maneira, após a fase de coleta de dados em campo, foi possível determinar os valores de uniformidade para o espaçamento de 1 m, bem como simular para espaçamentos maiores. Para tal análise, foram eliminadas as leituras dos coletores cujos espaçamentos entre si fossem menores que a distância simulada (Figura 10). Logo, para uma simulação de uniformidade com espaçamento de 2 m, envolvendo três coletores, o coletor central foi desconsiderado.

Figura 10 – Eliminação de leituras na simulação de espaçamentos entre coletores



Fonte: Autor.

Foram simulados espaçamentos de valores inteiros, com distância máxima de 12 m (E1, E2..., E12). Devido às limitações físicas, coletores não puderam ser instalados nas trilhas das torres móveis e aqueles cujas leituras extrapolaram o volume máximo de coleta foram descartados durante o processamento dos dados.

Realizou-se três repetições para cada uma das linhas de coletores já mencionadas, com cada pivô executando três voltas completas, totalizando 12 ensaios para o P180 e 15 ensaios para o P360.

Durante os ensaios, as lâminas de água coletadas foram provenientes de uma velocidade correspondente à regulagem de 50% do percentímetro dos equipamentos testados. A ABNT (2016) e a ASABE (2020) recomendam, para avaliações de uniformidade de distribuição, uma regulagem da velocidade do pivô equivalente à aplicação de uma lâmina de ao menos 15 mm, salvo os casos de regulagens diferentes em comum acordo com o cliente, ou nesse caso, parceiro. Dada a

quantidade de ensaios previstos para este estudo, com 12 avaliações para o P180 e 15 para o P360, decidiu-se que a regulação de 50% seria mais apropriada. Dessa maneira, pôde-se evitar a aplicação de lâminas excessivas, bem como manter o tempo de volta completa dos equipamentos compreendido entre as 6h e 18h do mesmo dia, caso fosse necessário.

#### 4.4.1 Análise de uniformidade

Cada ensaio teve os valores do coeficiente de uniformidade de distribuição calculados, bem como a lâmina média ( $L_{med}$ ) e a lâmina média ponderada ( $L_{pon}$ ) com relação à área. Para as metodologias de avaliação de uniformidade envolvendo mais de uma linha de coletores ( $MA_{ABNT}$ ,  $MA_3$  linhas e  $MA_4$  linhas), foram calculadas as uniformidades e as lâminas individualmente para cada linha. Posteriormente, determinou-se as médias entre as linhas de coletores compreendidas em cada metodologia de avaliação.

Acrescenta-se que, uma vez validada em campo a listagem de bocais dos pivôs disponibilizada pela empresa parceira, também foi calculada a uniformidade teórica a partir dos valores de  $Q_{catálogo}$  e  $Q_{medido}$ .

Foi adotado para o cálculo da uniformidade de distribuição de água a metodologia propostas por Christiansen (1942), Equação (3), modificada por Heermann e Hein (1968), Equação (4), para pivôs centrais.

$$CUC = \left( 1 - \frac{(\sum_{j=1}^N |X_j - \bar{X}|)}{N \bar{X}} \right) 100 \quad (3)$$

em que  $CUC_{HH}$  é %;  $N$ , número de observações;  $X_j$ , lâmina de água aplicada no ponto  $j$  (mm); e  $\bar{X}$ , lâmina média aplicada (mm).

Salienta-se que o método proposto por Christiansen (1942) assume a igualdade de áreas entre os coletores. No entanto, para pivôs centrais, os coletores devem ser instalados de maneira radial, implicando em áreas crescentes conforme afastam-se do centro do pivô. Dessa maneira, Heermann e Hein (1968) propuseram uma adaptação do método inicial, considerando a ponderação da distância do coletor para o centro do pivô ( $R_j$ ), indicada a seguir.



$$CUC_{HH} = \left( 1 - \frac{(\sum_{j=1}^N R_j |X_j - \bar{X}_p|)}{\sum_{j=1}^N X_j R_j} \right) 100 \quad (4)$$

Sendo  $\bar{X}_p$  dado por:

$$\bar{X}_p = \frac{\sum_{j=1}^N X_j R_j}{\sum_{j=1}^N R_j} \quad (5)$$

em que  $CUC_{HH}$  é %;  $N$ , número de observações;  $X_j$ , lâmina de água aplicada no ponto  $j$ , sobre a superfície do solo (mm);  $\bar{X}_p$ , lâmina média ponderada (mm); e  $R_j$ , distância do coletor  $j$  ao centro do pivô (m).

O  $CUC_{HH}$  foi utilizado para classificar a uniformidade de distribuição de água dos pivôs P180 e P360 de acordo com a relação apresentada nas Tabelas 2 e 3, conforme proposto por Mantovani (2001) e ABNT (2016), respectivamente.

Tabela 2 – Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) conforme Mantovani (2001)

| Classificação | CUC (%)  |
|---------------|----------|
| Excelente     | > 90%    |
| Bom           | 80 – 90% |
| Razoável      | 70 – 80% |
| Ruim          | 60 – 70% |
| Inaceitável   | < 60%    |

Fonte: Mantovani (2001).

Tabela 3 – Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) conforme ABNT (2016)

| Classificação | CUC (%)  |
|---------------|----------|
| Muito boa     | > 90%    |
| Boa           | 85 – 89% |
| Regular       | 80 – 84% |
| Ruim          | < 80%    |

Fonte: ABNT (2016).

#### 4.5 Condições de ensaio

No início de cada ensaio foram medidos pelo menos cinco valores consecutivos de velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, a uma altura de 2 m, durante um período em que a velocidade do vento se mantivesse estável. O equipamento utilizado foi um anemômetro digital da marca PeakMeter®, modelo PM6252B, com margens de erro de 2% para velocidade do vento, 1,5°C para temperatura e 3% para umidade relativa do ar. Os ensaios em que a velocidade média do vento foi superior a 3,5 m s<sup>-1</sup> foram descartados, e um novo ensaio foi realizado quando as condições mais apropriadas de vento foram atendidas.

A fim de realizar a reposição da lâmina de água evaporada de dentro dos coletores durante o processo de leitura, foram coletados valores de evaporação de água durante os ensaios por meio de três coletores de controle instalados fora do alcance dos emissores do pivô, nas imediações do ensaio, para que as lâminas evaporadas nos três coletores fossem representativas. Foram inseridos 100 mL de água nos coletores no início de cada ensaio com posterior leitura do volume ao final por meio de proveta graduada, com o valor evaporado sendo a diferença entre os volumes inicial e final.

Anotou-se periodicamente a hora durante as leituras para se estimar o tempo necessário de leitura das linhas de coletores, e, portanto, cada coletor, a fim de estimar o tempo de exposição do mesmo à evaporação, após a passada do pivô, conforme Equação (6).

Nota-se, porém, que para as linhas de coletores espaçadas em 3° avaliadas no mesmo dia, alternadamente, umas delas só poderia ser lida após a finalização da linha irrigada inicialmente, apresentando assim um Tempo<sub>exposição</sub> maior.

$$\text{Volume}_{\text{corr}} = \text{Volume} + \frac{\overline{\Delta \text{Evap}}}{\text{Tempo}_{\text{ensaio}}} * \text{Tempo}_{\text{exposição}} \quad (6)$$

em que Volume<sub>corr</sub> é o volume de água corrigido (mL); Volume, é o volume de água obtido durante a leitura na linha de coletores (mL);  $\overline{\Delta \text{Evap}}$ , diferença entre os volumes inicial e final dos coletores de controle para evaporação (mL); Tempo<sub>ensaio</sub>, tempo em que os coletores de controle ficaram expostos (segundos); e Tempo<sub>exposição</sub>, tempo em

que os coletores sob a área de alcance dos pivôs ficaram expostos após sua passada (segundos).

Os experimentos de evaporação nos coletores de controle foram iniciados a partir do momento em que os coletores posicionados no raio de ação dos pivôs já não estivessem mais sob a influência direta dos emissores.

Utilizou-se um dispositivo GPS portátil da marca Garmin modelo eTrex 10 para levantamento in loco das áreas de maior aclave e declive, bem como os locais de instalação das linhas de coletores. A importação dos pontos captados pelo GPS foi realizada no programa TrackMaker® versão gratuita 14.0.613 e processamento no programa de código livre QGIS versão 3.28.3 Firenze.

#### 4.6 Perdas por evaporação e arraste

A fim de se estimar a perda de água durante o processo de aplicação, adotou-se a média dos valores de lâminas médias ponderadas coletadas ao fim de cada ensaio para cada posição. As lâminas de projeto previstas à regulagem de 50% do percentímetro foram utilizadas como referência.

Nota-se que é recomendada a utilização da lâmina média aplicada durante o ensaio ao invés da lâmina de projeto, uma vez que apontaria a real aplicação. No entanto, para tal, seria necessário o conhecimento da vazão total do pivô em condições reais, exigindo a medição em todos os emissores, de maneira que tal nível de detalhamento não foi adotado neste trabalho.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de lâminas totais previstas para diferentes regulagens do percentímetro de acordo com as especificações disponibilizadas.

Tabela 4 – Lâminas totais de projeto para diferentes regulagens do percentímetro

|      | Lâmina total de projeto (mm) |      |      |
|------|------------------------------|------|------|
|      | 100%                         | 75%  | 50%  |
| P180 | 2,71                         | 3,61 | 5,41 |
| P360 | 4,39                         | 5,85 | 8,78 |

Fonte: Especificações técnicas disponibilizadas pela empresa parceira.



A estimativa das perdas por evaporação e arraste foi calculada de acordo com a seguinte equação:

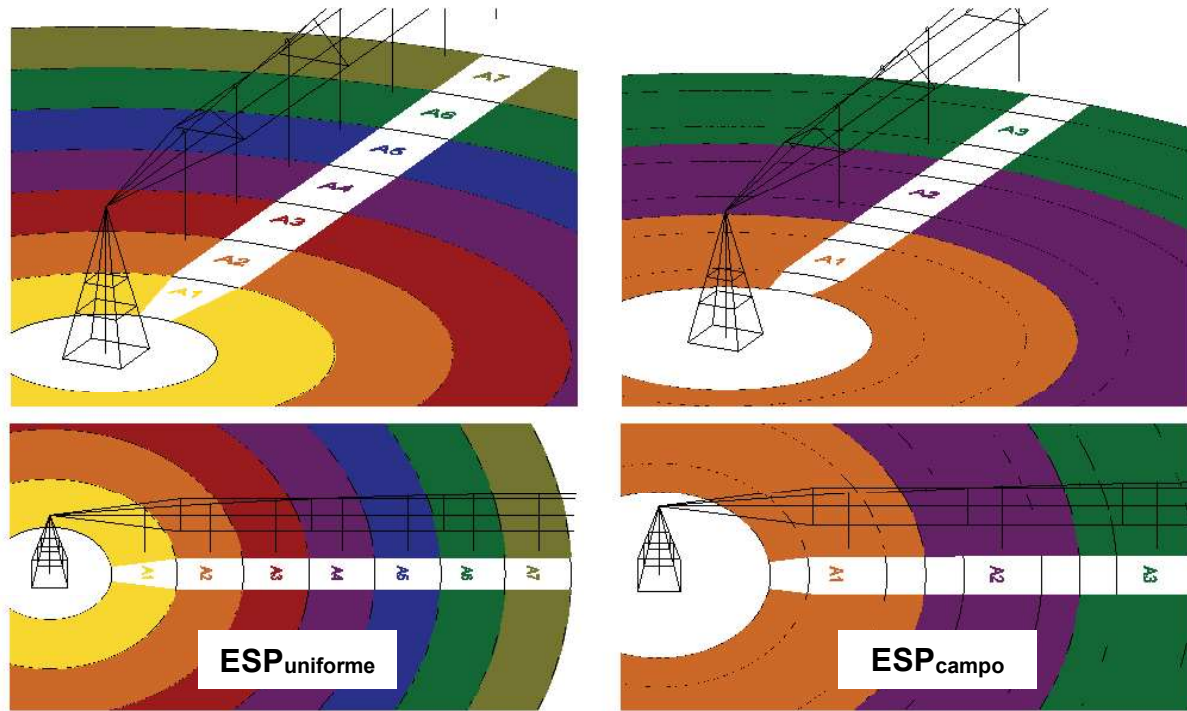
$$P_{E+A} = \left( 1 - \left( \frac{L_C}{L_P} \right) \right) * 100 \quad (7)$$

em que  $P_{E+A}$  são as perdas por evaporação e arraste (%);  $L_C$ , a lâmina média ponderada coletada (mm); e  $L_P$ , a lâmina prevista em projeto (mm).

#### 4.7 Seleção de bocais

Foram analisados dois métodos de seleção de bocais referentes ao modelo de emissor I-Wob2 UP3 para as situações de espaçamento uniforme dos emissores na linha lateral ( $ESP_{uniforme}$ ) e espaçamento dobrado nos dois primeiros lances ( $ESP_{campo}$ ) para P180 e P360 (Figura 11). O objetivo foi determinar o  $CUC_{HH}$  máximo de projeto. A seleção dos emissores foi realizada buscando-se atingir a lâmina total de projeto referente à rotação com regulagem em 100% do percentímetro para ambos os pivôs, sendo essa a lâmina mínima passível de ser aplicada pelos equipamentos. Os métodos de seleção foram pela vazão aproximada ( $MQ_{ap}$ ) e coeficiente de descarga médio ( $MCd$ ).

Figura 11 – Áreas anelares de emissores para espaçamento uniforme ( $ESP_{uniforme}$ ) e espaçamento dobrado nos dois primeiros lances ( $ESP_{campo}$ )



Fonte: Autor.

Para  $MQ_{ap}$ , a seleção dos emissores consistiu inicialmente no cálculo do volume de água necessário em cada fração de área considerando a lâmina total aplicada pelos pivôs à regulagem de 100% no percentímetro (Tabela 4), de acordo com a Equação (8).

$$V_{\text{água}_i} = LB_{100\%} * \text{Área}_{\text{anelar}_i} \quad (8)$$

em que  $V_{\text{água}_i}$  é o volume de água a ser aplicado pelo emissor 'i' (L);  $LB_{100\%}$ , lâmina total de projeto, equivalente ao percentímetro regulado em 100% (mm); e  $\text{Área}_{\text{anelar}_i}$ , fração de área a ser irrigada por cada emissor 'i' ( $m^2$ ).

Em seguida, obteve-se a vazão real necessária ( $Q_{\text{necessária}}$ ) em cada saída do pivô de acordo com a Equação (9), dessa vez considerando o tempo necessário para uma volta completa atrelada também à regulagem de 100% do percentímetro. Por fim, fez-se a escolha dos bocais que apresentaram a vazão de catálogo mais próxima dos valores de  $Q_{\text{necessária}}$ .

$$Q_{necessária_i} = \frac{V_{água_i}}{T_{100\%}} \quad (9)$$

em que  $Q_{necessária_i}$  é a vazão real necessária a ser aplicada pelo emissor 'i' ( $L \cdot h^{-1}$ );  $V_{água_i}$ , volume de água a ser aplicado pelo emissor 'i' (L); e  $T_{100\%}$ , tempo para uma volta completa do pivô, com percentímetro regulado a 100%.

Para MCd, foram utilizados os valores de vazão e diâmetro dos bocais comercialmente disponíveis, ambos de acordo com as especificações que constam no catálogo do fabricante (Tabela 1). A partir desses dados foi calculado o coeficiente de descarga individual ( $Cd_i$ ) referente a cada numeração de bocal. Adotou-se para a aceleração da gravidade o valor de  $9,8 \text{ m s}^{-2}$ .

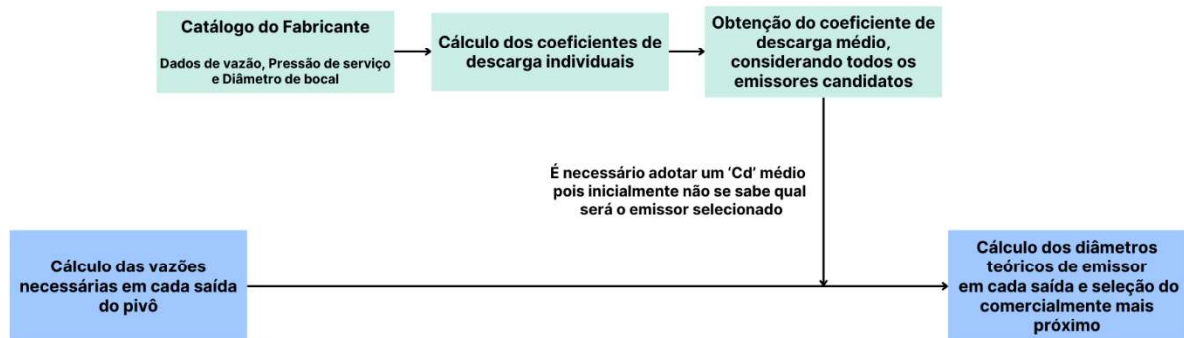
Posteriormente, utilizou-se a média dos valores de  $Cd_i$ , equivalente a 0,9746 (Tabela 1), a fim de possibilitar o cálculo do diâmetro do bocal necessário, conforme a Equação (10), para cada posição ao longo do pivô, de acordo com a  $Q_{necessária}$ . Essa abordagem foi necessária visto que não seria possível adotar um coeficiente de descarga individual dada a não definição inicial do bocal. Por fim, foi selecionado o bocal comercial com diâmetro mais aproximado do diâmetro necessário.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 * q_i}{\pi \sqrt{2gP_s} Cd_{médio}}} \quad (10)$$

em que  $D_i$  é o diâmetro do bocal do emissor 'i' (m);  $q_i$ , vazão do aspersor 'i' ( $m^3 \text{ s}^{-1}$ );  $g$ , aceleração da gravidade ( $m \text{ s}^{-2}$ );  $P_s$ , pressão de serviço (m); e  $Cd_{médio}$ , média dos valores  $Cd_i$  (adimensional).

Na Figura 12, é mostrado o procedimento de cálculo pelo método do coeficiente de descarga de maneira simplificada.

Figura 12 – Procedimento de seleção de bocais pelo método do coeficiente de descarga



Fonte: Autor.

Acrescenta-se que os métodos de seleção  $MQ_{ap}$  e  $MCd$  foram formulados assumindo um espaçamento constante entre emissores ao longo de toda a linha lateral ( $ESP_{uniforme}$ ). No entanto, para permitir a comparação com as condições observadas em campo ( $ESP_{campo}$ ), onde há espaçamento dobrado entre emissores nos dois primeiros lances, foi necessário ajustar a formulação. Para tal, foi considerado o incremento na área do setor anelar representada por cada emissor nesses lances iniciais, como consequência do aumento do espaçamento (Figuras 3 e 11).

Foi utilizado o catálogo referente ao modelo de emissor I-Wob UP3 da fabricante Senninger para coletar as informações necessárias para os cálculos mencionados. Tendo em vista a busca pela uniformidade teórica máxima dos sistemas simulados, não se considerou a ocorrência de vento, entupimentos, flutuações de pressão, entre outras.

A análise do impacto das metodologias  $MQ_{ap}$  e  $MCd$  foi baseada na simulação da instalação dos emissores selecionados para os pivôs P180 e P360, de tal maneira que foi possível comparar os resultados de uniformidade obtidos pelos métodos com a uniformidade obtida dos ensaios em campo, bem como com a uniformidade teórica de acordo com os valores de  $Q_{catálogo}$  e  $Q_{medido}$ .

#### 4.8 Método de leitura da lâmina de água

Os kits utilizados nos ensaios de uniformidade de distribuição de água da marca FABRIMAR são compostos por coletores, hastes metálicas e provetas, as quais fornecem diretamente a lâmina de água coletada em milímetros. Como a escala linear

da proveta, de 0,5 mm, não atende o nível de precisão exigido no presente estudo, optou-se por medir o volume de água coletado em uma proveta graduada em mililitros, sendo a lâmina calculada por meio da seguinte equação:

$$L = \frac{V_C}{A_C} \quad (11)$$

em que L é a lâmina coletada (mm);  $V_C$ , volume coletado (L); e  $A_C$ , área interna de captação do coletor ( $m^2$ ).

#### 4.9 Análise estatística

Tendo em vista que na prática cada pivô central possui especificidades de ordem mecânica, de projeto, bem como estão sujeitos a diferentes ações do ambiente local, a análise experimental foi conduzida para cada pivô individualmente. Adotou-se um esquema fatorial 5x12 para o P360 e 4x12 para o P180, ambos no Delineamento em Blocos Casualizados (DBC) com três repetições, sendo os blocos os diferentes dias de avaliação. Os dois fatores analisados respectivos ao esquema fatorial foram: [1] posição das linhas em campo, sendo cinco níveis para a circunferência do P360 e quatro níveis para a semicircunferência do P180; e [2] espaçamento entre os coletores, com os mesmos 12 níveis para ambos os experimentos.

Posteriormente, realizou-se uma nova análise experimental, dessa vez comparando as diferentes metodologias de avaliação de uniformidade de distribuição de água. Assim, fez-se a análise para DBC com um só fator, sendo as diferentes metodologias provenientes das combinações de linhas de coletores, conforme indicado na Tabela 5.

Os dados foram analisados por meio da análise de variância e as médias, quando apresentaram diferença significativa, foram comparadas por meio do teste de Tukey, adotando-se um nível de 5% de probabilidade.

Tabela 5 – Combinações das linhas individuais de coletores para cada pivô avaliado

|          | Metodologias                                                                                    |                                                                                                                                       |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | P180                                                                                            | P360                                                                                                                                  |
| Posições | L1*L2*L3 (MA <sub>3</sub> linhas)<br>L3*L3.2 (MA <sub>ABNT</sub> )<br>L3 (MA <sub>única</sub> ) | L1*L2*L3*L4 (MA <sub>4</sub> linhas)<br>L2*L4 (MA <sub>3</sub> linhas*)<br>L4*L4.2 (MA <sub>ABNT</sub> )<br>L4 (MA <sub>única</sub> ) |

Fonte: Autor.

Todas as análises estatísticas e a geração de gráficos consequentes foram realizadas no ambiente de desenvolvimento integrado RStudio, com a linguagem R, versão 4.2.2 (R Core Team, 2022) e o pacote ggplot2 (Wickham, 2016). Também foi empregado o pacote 'ExpDes.pt' (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2021) dedicado à realização da ANOVA e dos testes de comparação múltipla de médias na língua portuguesa para a linguagem R.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Dados climáticos

Na Tabela 6 encontram-se as informações referentes à condição climática no início de cada ensaio com indicação dos dias em que foram realizados, bem como o agrupamento entre ensaios, definido pela repetição em cada pivô.

Tabela 6 – Datas e condições climáticas no início de cada ensaio realizado

|      | Posição | Data     | Temperatura (°C) | Umidade (%) | Vento (m s <sup>-1</sup> ) | Repetição |
|------|---------|----------|------------------|-------------|----------------------------|-----------|
| P180 | L1      | 12/10/23 | 33,58            | 37,77       | 2,20                       | 1         |
|      | L2      | 11/10/23 | 33,13            | 45,16       | 1,25                       |           |
|      | L3      | 15/10/23 | 31,51            | 40,38       | 3,22                       |           |
|      | L3.2    | 15/10/23 | 31,51            | 40,38       | 3,22                       |           |
|      | L1      | 17/10/23 | 37,12            | 28,33       | 1,53                       | 2         |
|      | L2      | 17/10/23 | 27,32            | 52,81       | 2,84                       |           |
|      | L3      | 14/10/23 | 34,75            | 33,98       | 1,97                       |           |
|      | L3.2    | 14/10/23 | 34,75            | 33,98       | 1,97                       |           |
|      | L1      | 16/10/23 | 36,00            | 33,06       | 3,26                       | 3         |
|      | L2      | 16/10/23 | 36,55            | 30,48       | 3,17                       |           |
|      | L3      | 18/10/23 | 35,00            | 32,10       | 1,03                       |           |
|      | L3.2    | 18/10/23 | 35,00            | 32,10       | 1,03                       |           |
| P360 | L1      | 12/09/23 | 30,45            | 33,65       | 1,42                       | 1         |
|      | L2      | 26/09/23 | -                | -           | -                          |           |
|      | L3      | 27/09/23 | 35,12            | 30,70       | 2,93                       |           |
|      | L4      | 26/09/23 | 36,55            | 31,63       | 1,83                       |           |
|      | L4.2    | 26/09/23 | 36,55            | 31,63       | 1,83                       |           |
|      | L1      | 13/09/23 | 33,00            | 35,17       | 2,58                       | 2         |
|      | L2      | 02/10/23 | 24,65            | 69,71       | 2,82                       |           |
|      | L3      | 24/09/23 | 33,81            | 35,00       | 1,90                       |           |
|      | L4      | 03/10/23 | 36,52            | 36,68       | 2,44                       |           |
|      | L4.2    | 03/10/23 | 36,52            | 36,68       | 2,44                       |           |
|      | L1      | 15/09/23 | 31,79            | 39,44       | 2,45                       | 3         |
|      | L2      | 20/09/23 | 36,26            | 30,85       | 1,91                       |           |
|      | L3      | 03/10/23 | 25,72            | 67,26       | 2,78                       |           |
|      | L4      | 19/09/23 | 30,38            | 39,52       | 2,99                       |           |
|      | L4.2    | 19/09/23 | 30,38            | 39,52       | 2,99                       |           |

Fonte: Autor.

Nota-se a ausência de dados climáticos referente ao ensaio L2 no dia 26/09/2024 devido ao mal funcionamento pontual do anemômetro digital, de maneira que não comprometeu a coleta de dados climáticos dos outros ensaios. Ainda, as disposições de linhas duplas espaçadas em 3°, L3 e L3.2 para P180 e L4 e L4.2 para P360, tiveram leituras dos coletores feitas de maneira seguida, uma vez que dada a curta distância entre as linhas, a diferença de tempo em que ambas são completamente irrigadas é pequena. Logo, para minimizar a evaporação dos coletores da linha lida em sequência, convencionou-se utilizar as mesmas médias climáticas obtidas previamente à leitura da primeira linha de coletores, assumindo-se diferenças principalmente na velocidade do vento.

## 5.2 Vazões medidas e de catálogo

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de  $Q_{\text{medido}}$ , bem como os valores de  $Q_{\text{catálogo}}$ , para cada numeração de bocal amostrado. As numerações de bocais que não possuem valores de  $Q_{\text{medido}}$  para ambos os pivôs indicam que determinado número de bocal não foi adotado no pivô de dado faltante.

É possível notar que grande parte dos valores de  $Q_{\text{medido}}$  para P180 e P360 são maiores do que os valores de  $Q_{\text{catálogo}}$  para uma pressão de 7 mca. Na Figura 13, observa-se o aumento de vazão à medida em que se aumenta o diâmetro do bocal dos aspersores.

Os valores de  $Q_{\text{medido}}$  dos bocais do P180, em parte, foram maiores não somente que os valores de  $Q_{\text{catálogo}}$ , mas como também os valores de  $Q_{\text{medido}}$  para o P360. As pressões nas bases dos pivôs, durante os ensaios realizados estiveram de acordo com o previsto em projeto. Por outro lado, foi informado pela empresa parceira que as válvulas reguladoras de pressão em utilização para ambos os pivôs apresentavam considerável tempo de uso, com elas prestes a serem trocadas.



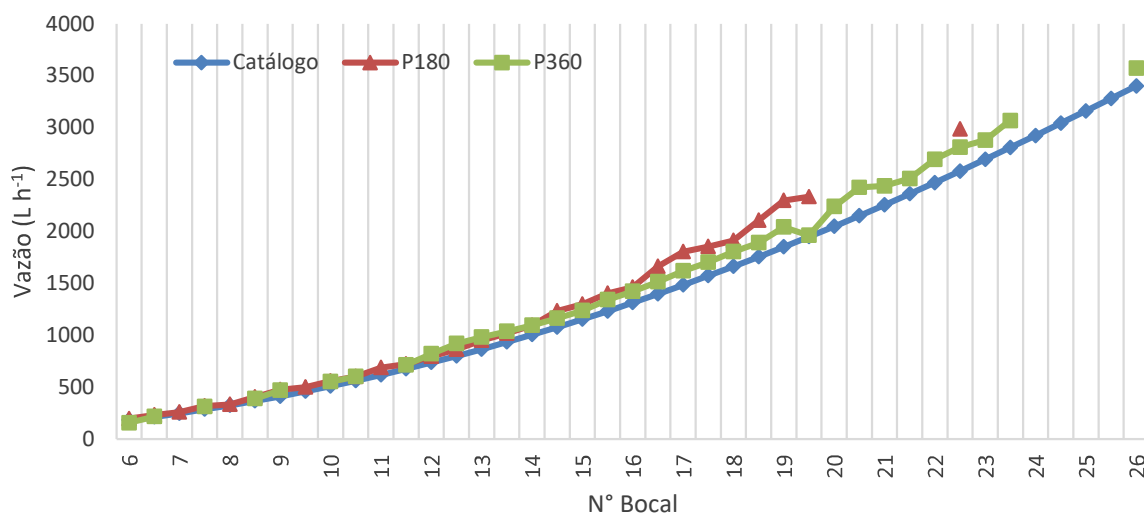
Tabela 7 – Vazões medidas para P180 e P360 comparadas à vazão de catálogo

| Nº bocal | Vazão (L h <sup>-1</sup> ) |                          |                          |
|----------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
|          | Q <sub>catálogo</sub>      | Q <sub>medido</sub> P180 | Q <sub>medido</sub> P360 |
| 6        | 182                        | 195,2 (+)                | 155,5 (-)                |
| 6,5      | 213                        | 231,9 (+)                | 217,3 (+)                |
| 7        | 248                        | 258,8 (+)                |                          |
| 7,5      | 286                        | 318,7 (+)                | 312,9 (+)                |
| 8        | 325                        | 332,1 (+)                |                          |
| 8,5      | 368                        | 403,8 (+)                | 389,5 (+)                |
| 9        | 411                        | 474,2 (+)                | 468,0 (+)                |
| 9,5      | 459                        | 500,5 (+)                |                          |
| 10       | 509                        | 557,1 (+)                | 552,9 (+)                |
| 10,5     | 561                        | 602,2 (+)                | 602,5 (+)                |
| 11       | 618                        | 687,6 (+)                |                          |
| 11,5     | 675                        | 723,0 (+)                | 713,2 (+)                |
| 12       | 736                        | 794,9 (+)                | 819,7 (+)                |
| 12,5     | 799                        | 862,4 (+)                | 919,9 (+)                |
| 13       | 865                        | 948,5 (+)                | 981,6 (+)                |
| 13,5     | 933                        | 1017,2 (+)               | 1035,5 (+)               |
| 14       | 1004                       | 1095,4 (+)               | 1096,1 (+)               |
| 14,5     | 1077                       | 1233,2 (+)               | 1162,2 (+)               |
| 15       | 1154                       | 1298,3 (+)               | 1237,2 (+)               |
| 15,5     | 1231                       | 1402,1 (+)               | 1342,2 (+)               |
| 16       | 1313                       | 1460,6 (+)               | 1422,2 (+)               |
| 16,5     | 1397                       | 1660,9 (+)               | 1514,7 (+)               |
| 17       | 1483                       | 1804,4 (+)               | 1617,9 (+)               |
| 17,5     | 1572                       | 1855,0 (+)               | 1703,4 (+)               |
| 18       | 1663                       | 1913,3 (+)               | 1804,8 (+)               |
| 18,5     | 1756                       | 2107,6 (+)               | 1890,7 (+)               |
| 19       | 1851                       | 2298,8 (+)               | 2042,1 (+)               |
| 19,5     | 1949                       | 2333,6 (+)               | 1962,0 (+)               |
| 20       | 2049                       |                          | 2238,8 (+)               |
| 20,5     | 2151                       |                          | 2425,3 (+)               |
| 21       | 2255                       |                          | 2438,6 (+)               |
| 21,5     | 2362                       |                          | 2509,8 (+)               |
| 22       | 2471                       |                          | 2694,4 (+)               |
| 22,5     | 2582                       | 2988,4 (+)               | 2812,2 (+)               |
| 23       | 2696                       |                          | 2881,7 (+)               |
| 23,5     | 2810                       |                          | 3069,9 (+)               |
| 26       | 3402                       |                          | 3573,6 (+)               |

Fonte: Autor.

‘(+)’ ou ‘(-)’ indicam respectivamente uma vazão medida superior ou inferior à de catálogo.

Figura 13 – Comparação das vazões medidas do P180 e P360 com as vazões de catálogo, com emissores operando com pressão de 7 mca



Fonte: Autor.

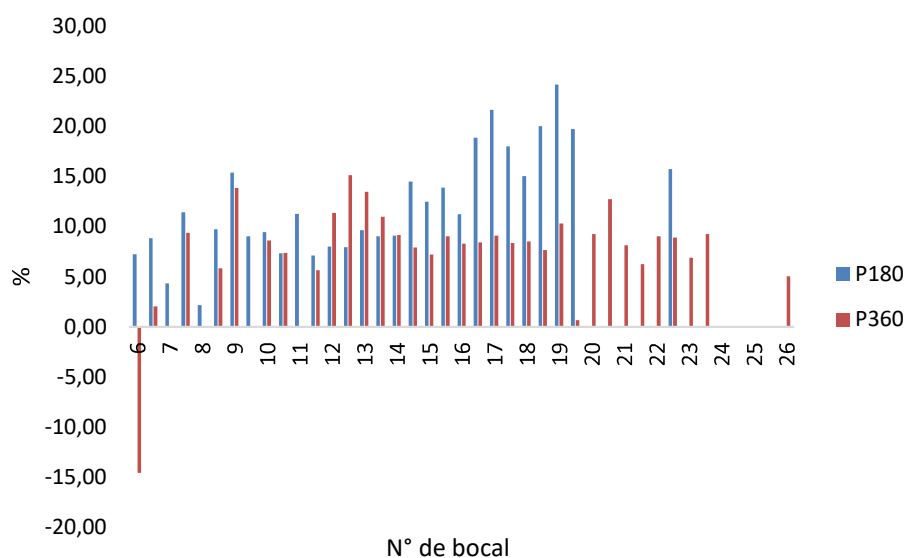
A diferença entre os valores de  $Q_{\text{medido}}$  e  $Q_{\text{catálogo}}$  para ambos os pivôs pode ser atribuída ao desgaste das válvulas reguladoras de pressão, já em ponto de troca, com pressão de saída maior que a prevista, resultando em maior vazão, como verificado para a maioria dos bocais amostrados.

Deve-se salientar que, dado o método direto de medição de vazão empregado, Bernardo *et al.* (2019) recomendam para uma boa precisão dos resultados o emprego de um recipiente de tamanho tal que o tempo de enchimento seja de 20 segundos. No entanto, dada a necessidade prática de movimentação em campo, não foi possível atender tal recomendação. Dessa maneira, conforme mediu-se as vazões para bocais de numeração crescente, conferindo maior vazão, e, portanto, menor tempo de enchimento do recipiente, tem-se menor precisão de acordo com a progressão dos bocais. Estudos adicionais seriam necessários a fim de quantificar a alteração na precisão.

Dados os valores superiores de  $Q_{\text{medido}}$  em comparação com os valores de  $Q_{\text{catálogo}}$ , espera-se maiores valores de lâmina total aplicada, uma vez que a área é a mesma para determinado emissor.

Na Figura 14 estão indicadas as diferenças percentuais dos valores de  $Q_{\text{medido}}$  para P180 e P360 tomando como referência os valores de  $Q_{\text{catálogo}}$ .

Figura 14 – Diferença percentual entre as vazões medidas e as vazões de catálogo.



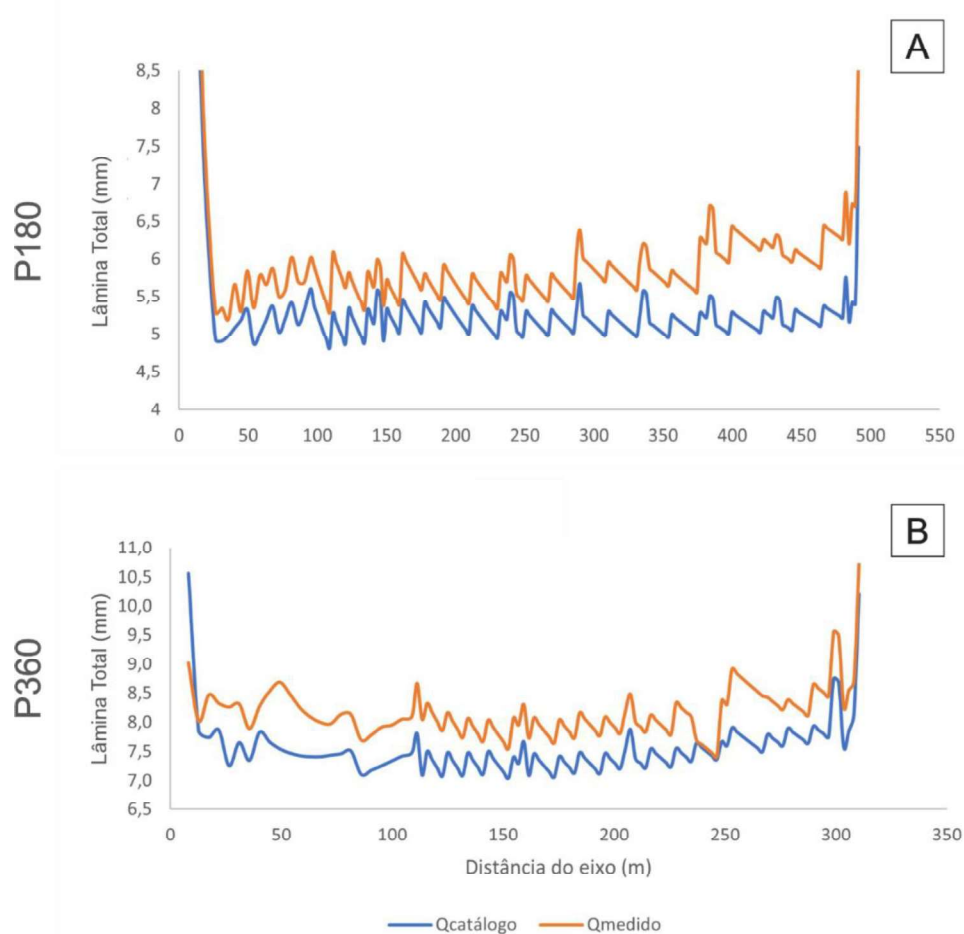
Fonte: Autor.

Nota-se que os bocais número 6 e 19.5 referentes ao P360 apresentaram comportamento divergente dos demais. Ambos apresentaram queda acentuada, indicando um valor de  $Q_{\text{medido}}$  aproximadamente 14,5% menor para o bocal 6 e aproximando-se do valor de  $Q_{\text{catálogo}}$  para o bocal 19.5. É possível que isso tenha sido ocasionado por um entupimento parcial dos bocais, não detectados durante a medição em campo.

A Figura 15 indica a relação da lâmina total ao longo dos raios dos pivôs P360 e P180 de acordo com os valores de  $Q_{\text{medido}}$  e  $Q_{\text{catálogo}}$ . Para tal, assumiu-se que os valores de  $Q_{\text{medido}}$  para cada bocal fossem iguais entre bocais de mesma numeração, mas em diferentes emissores.

Como esperado, as lâminas totais para ambos os pivôs foram superiores às esperadas de acordo com os valores de  $Q_{\text{catálogo}}$ , como pode ser reforçado por meio da Tabela 8.

Figura 15 – Lâmina total simulada para as vazões de catálogo e vazões medidas em campo para o P180 e P360



Fonte: Autor.

Tabela 8 – Lâmina total e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) para as vazões medidas e de catálogo

|           | P360              |                | P180              |                |
|-----------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
|           | Lâmina total (mm) | $CUC_{HH}$ (%) | Lâmina total (mm) | $CUC_{HH}$ (%) |
| Qcatálogo | 7,58              | 96,36          | 5,22              | 97,04          |
| Qmedido   | 8,21              | 95,87          | 5,96              | 94,94          |

Fonte: Autor.

Observou-se para as lâminas totais provenientes dos valores de  $Q_{medido}$  um aumento percentual de 8,31% para o P360 e 14,17% relativo ao P180, em relação aos valores de lâmina total provenientes de  $Q_{catálogo}$ . Já para o  $CUC_{HH}$ , obteve-se quedas de 0,49% e 2,1% para o P360 e P180, respectivamente.

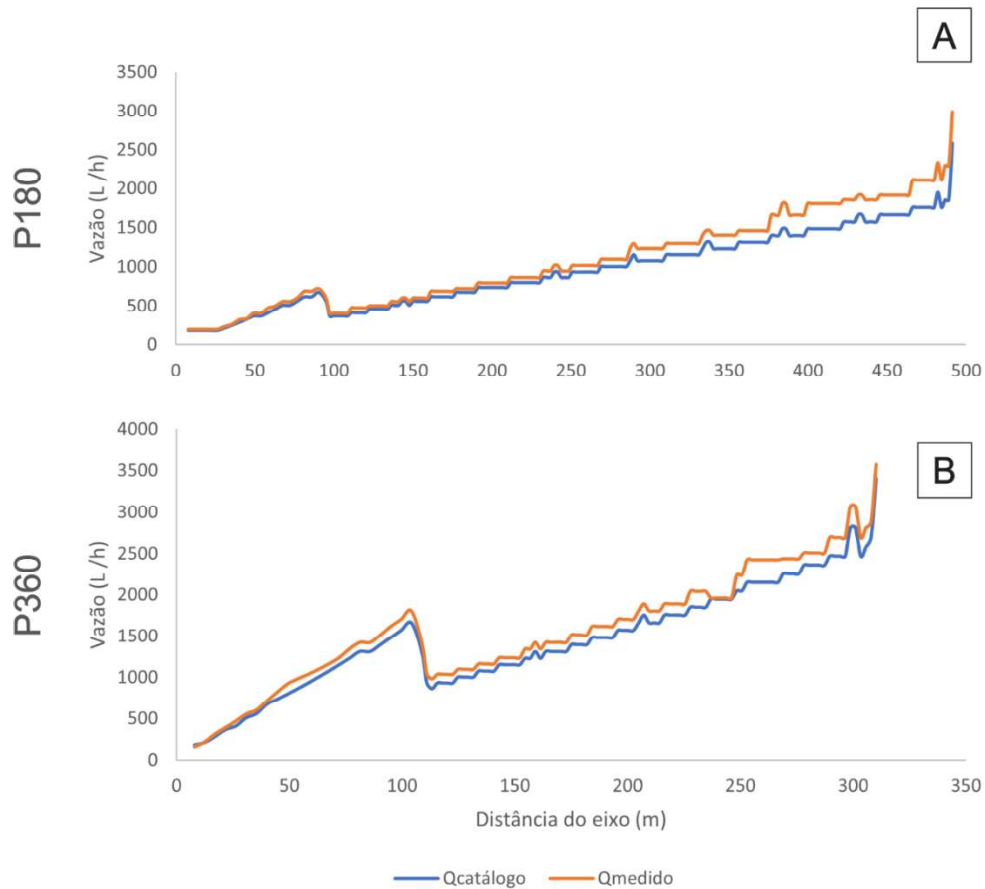
Nota-se, ainda, uma variação atípica das lâminas totais para o P360 (Figura 15B) no intervalo inicial de distância do eixo, entre aproximadamente 50 e 100 m. Tal variação ocorreu tanto para  $Q_{\text{medido}}$  quanto para  $Q_{\text{catálogo}}$ , com a lâmina não apresentando o comportamento usual de sucessivos aumentos e quedas. Acredita-se que a causa seja o arredondamento sucessivo para maiores vazões na seleção dos bocais dos emissores nessa região. Dessa maneira, a queda brusca da lâmina seria suavizada, conforme observou-se no gráfico.

Já para o comportamento da lâmina total de  $Q_{\text{medido}}$  para o P180 (Figura 15A), percebe-se uma maior diferença entre as lâminas simuladas a partir de 300 m. No momento de medição das vazões, o P180 estava posicionado próximo a L1 (Figura 7), de maneira que, a partir da distância de aproximadamente 300 m, o perfil de elevação da linha lateral apresenta uma queda acentuada. Logo, acredita-se que o desnível com relação ao ponto pivô nessa região contribuiu para maiores valores de vazão, e, portanto, de lâmina.

As progressões de vazão para ambos os pivôs apresentaram um comportamento esperado (Figura 16), visto que se tem incrementos da vazão com o aumento do diâmetro do bocal do emissor à medida que se afasta do centro. Em alguns trechos da tubulação existem emissores com o mesmo diâmetro do bocal para áreas crescentes, considerando-se a não disponibilidade de diâmetros comerciais para atender os valores teóricos calculados. A mesma explicação se aplica à Figura 15 anteriormente exposta, em que a lâmina total apresenta sucessivos aumentos e quedas, tendo em vista que a lâmina total naturalmente reduz, uma vez que a vazão é fixada para uma área crescente.

Para a Figura 16, em ambos os casos é notada uma queda brusca dos valores de vazão na proximidade de 100 m. Tal fato ocorreu em decorrência do maior espaçamento entre emissores dos dois primeiros lances de ambos os pivôs, com o fechamento das saídas de emissores de maneira intercalada, dobrando o espaçamento, conforme indicado pela Figura 3.

Figura 16 – Variação das vazões medidas e de catálogo ao longo das linhas laterais do P180 e P360



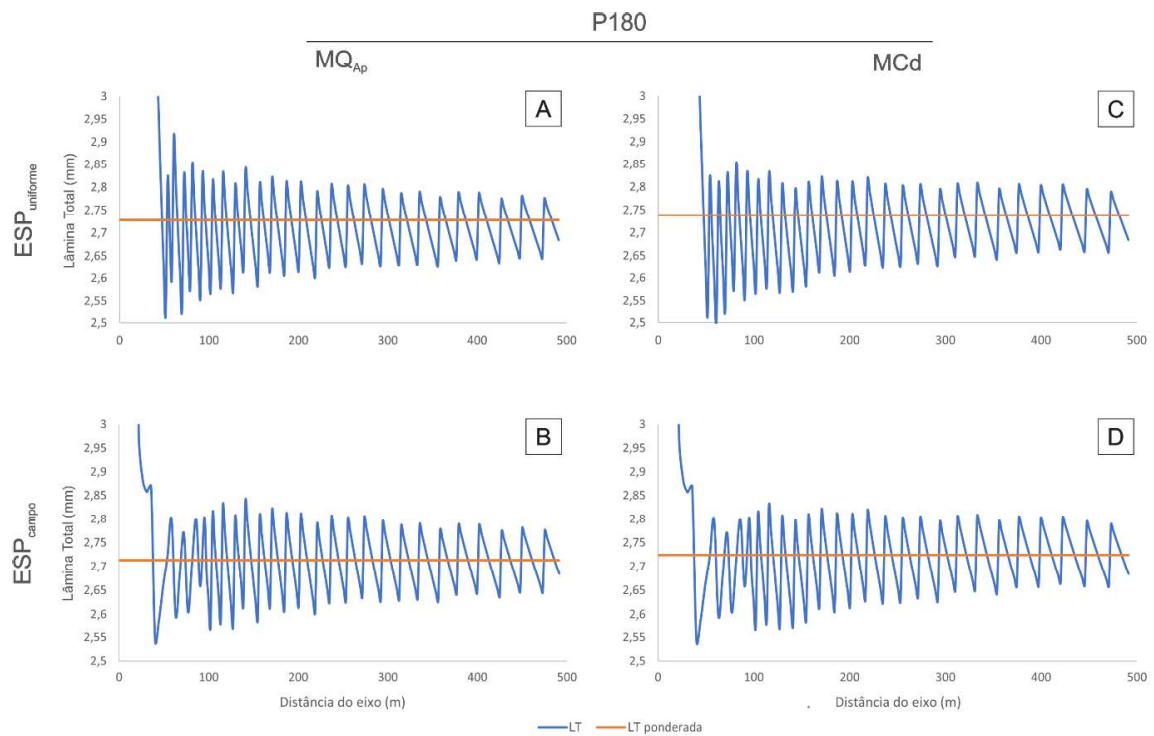
Fonte: Autor.

### 5.3 Seleção de bocais

Nas Figuras 17 e 18, estão apresentadas as variações da lâmina total, referentes à regulação de 100% do percentímetro, ao longo do raio do P180 e P360 para os métodos de vazão aproximada ( $MQ_{ap}$ ) e coeficiente de descarga ( $MC_d$ ). Ainda, fez-se a combinação dos mesmos tanto para espaçamento uniforme dos emissores ( $ESP_{uniforme}$ ), quanto para o observado em campo, com posicionamento intercalado dos emissores nos dois primeiros lances ( $ESP_{campo}$ ).

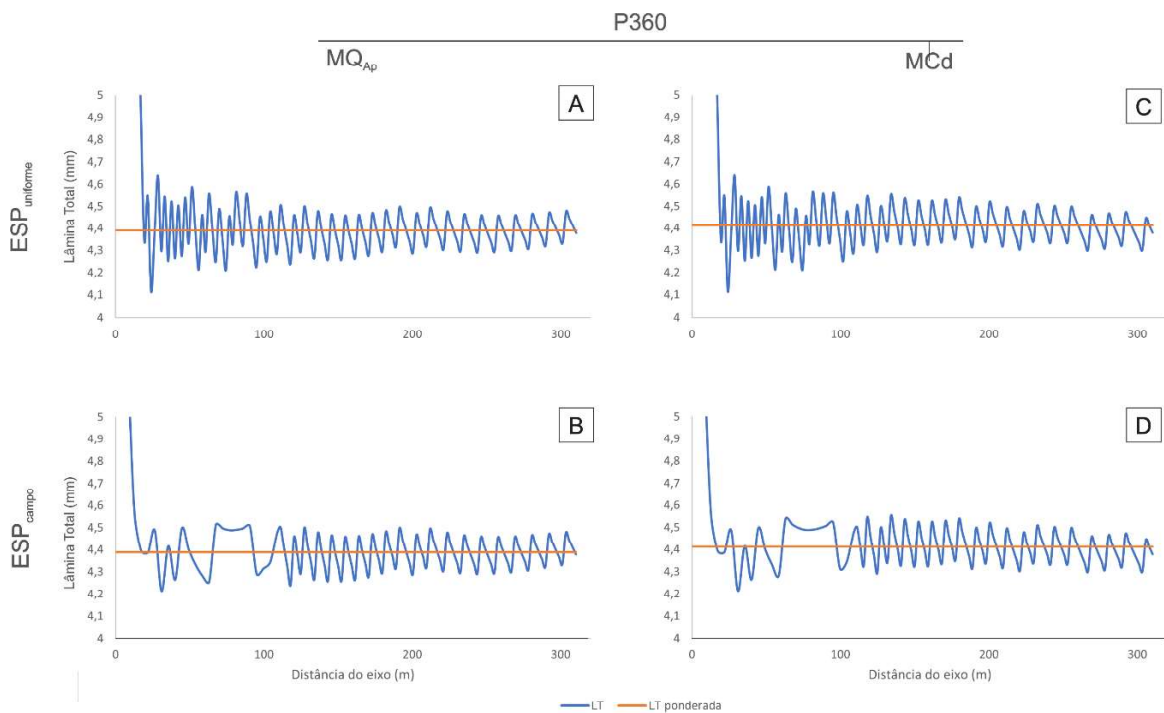
É possível verificar que as lâminas totais aplicadas pelos emissores localizados mais próximos ao centro do pivô apresentaram maior variação em relação à lâmina média. Em seguida, as lâminas convergem para o valor médio, uma vez que os valores de  $Q_{catálogo}$  se aproximam dos valores de  $Q_{necessária}$ .

Figura 17 – Lâmina total simulada do P180 considerando  $ESP_{uniforme}$  e  $ESP_{campo}$  para os critérios de seleção de bocais  $MQ_{Ap}$  e  $MCd$



Fonte: Autor.

Figura 18 – Lâmina total simulada do P360 considerando  $ESP_{uniforme}$  e  $ESP_{campo}$  para os critérios de seleção de bocais  $MQ_{Ap}$  e  $MCd$



Fonte: Autor.

Percebe-se pelas Figura 18B e 18D uma variação atípica da lâmina total entre as distâncias de 50 e 100 m para ambos os métodos  $MQ_{ap}$  e  $MCd$  para a condição de  $ESP_{campo}$ . Tal variação não foi observada nos resultados relativos aos mesmos métodos para o  $ESP_{uniforme}$ , de acordo com as Figura 18A e 18C. Nota-se que uma distorção semelhante foi identificada e discutida anteriormente para o P360 (Figura 15B) de acordo com a listagem de bocais fornecida pela empresa parceira, aproximadamente no mesmo intervalo de distância do eixo. Dessa maneira, acredita-se que, analogamente ao discutido previamente, o arredondamento para maiores vazões se repetiu para os métodos de seleção de bocais  $MQ_{ap}$  e  $MCd$  estudados neste trabalho.

Na Tabela 9 estão apresentados os valores de lâmina total e  $CUC_{HH}$  simulados para cada abordagem utilizando os valores de  $Q_{catálogo}$ . Todos os métodos empregados apresentaram valores de lâmina total próximas à de projeto (Tabela 4) com regulagem em 100% do percentímetro, utilizada como referência. Já para os valores de  $CUC_{HH}$ , obteve-se resultados superiores para todos os métodos quando comparados aos valores resultantes da simulação de acordo com a listagem de bocais fornecida pela empresa parceira para a  $Q_{catálogo}$  e  $Q_{medido}$  (Tabela 8).

Tabela 9 – Lâmina total e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) para as simulações de seleção de bocais para emissores do P180 e P360

|                                   |      | $MQ_{ap}$         |                | $MCd$             |                |
|-----------------------------------|------|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
|                                   |      | Lâmina total (mm) | $CUC_{HH}$ (%) | Lâmina total (mm) | $CUC_{HH}$ (%) |
| $ESP_{uniforme}$<br>$ESP_{campo}$ | P180 | 2,73              | 97,58          | 2,74              | 97,63          |
|                                   |      | 2,71              | 98,18          | 2,72              | 98,16          |
| $ESP_{uniforme}$<br>$ESP_{campo}$ | P360 | 4,39              | 98,49          | 4,41              | 98,46          |
|                                   |      | 4,39              | 98,65          | 4,41              | 98,60          |

Fonte: Autor.

Nota-se que as diferentes combinações apresentaram valores de lâmina total e de  $CUC_{HH}$  próximos entre si. No entanto, é importante destacar que ambos os métodos,  $MQ_{ap}$  e  $MCd$ , para a situação de  $ESP_{campo}$ , resultaram em um valor de  $CUC_{HH}$  ligeiramente superior quanto comparados à situação de  $ESP_{uniforme}$ . Além disso, para a situação de  $ESP_{campo}$ , a necessidade de equipamentos na instalação, como o



número de emissores, válvulas reguladoras de pressão, entre outros, é reduzida. Assim, tem-se menores custos tanto de aquisição quanto de operação adotando-se o  $ESP_{campo}$ .

Devido à extensão do número de emissores para P180 e P360, encontram-se nos Apêndices a listagem de bocais (Apêndices A e B) obtidas tanto pelos métodos  $MQ_{ap}$  e  $MCd$  discutidos neste trabalho para as situações de  $ESP_{uniforme}$  e  $ESP_{campo}$ , como a listagem de bocais fornecida pela empresa parceira.

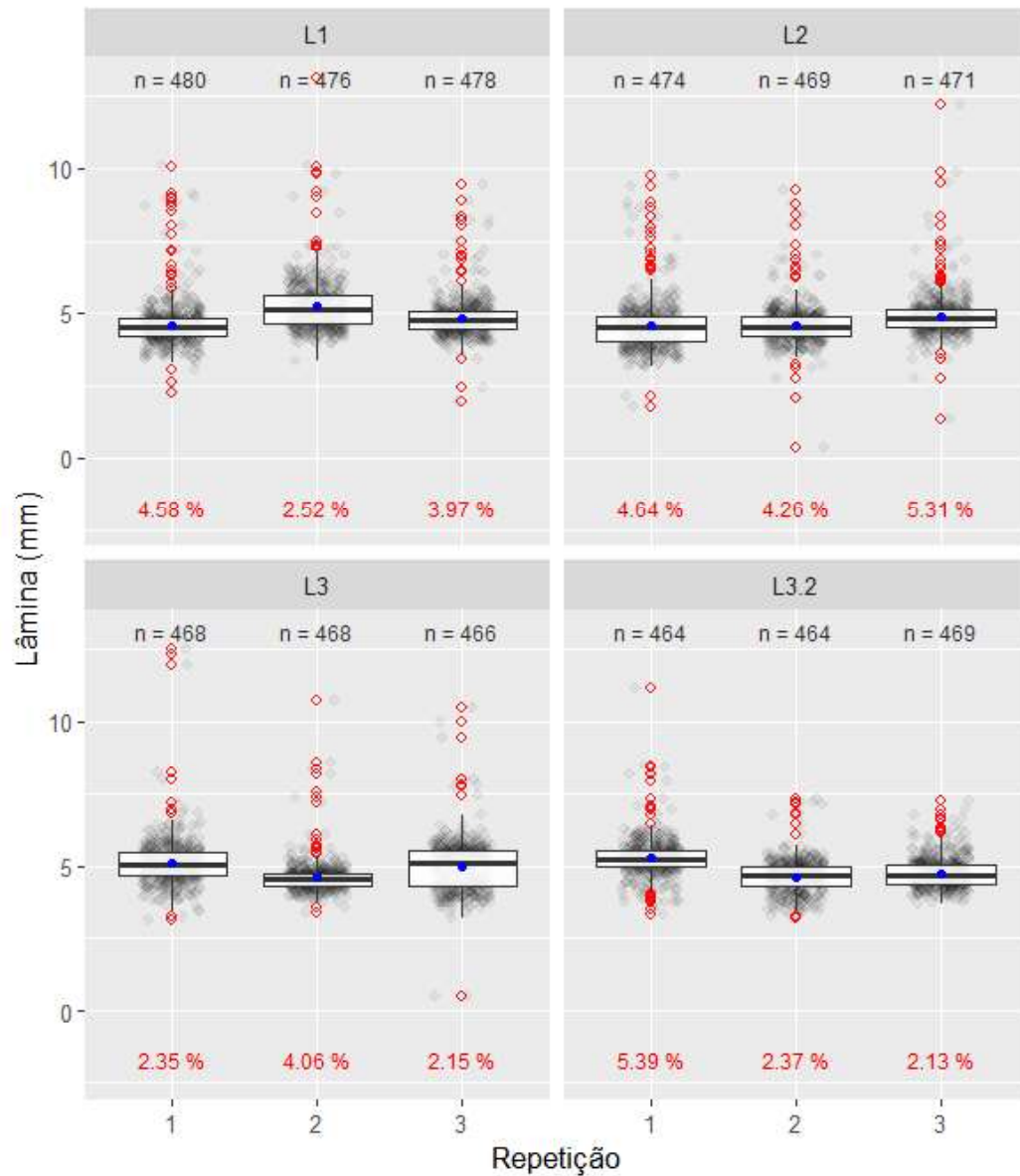
#### 5.4 Lâminas coletadas

Observa-se nas Figuras 19 e 20 os boxplots referentes a cada ensaio realizado para os pivôs para um espaçamento entre coletores de 1 m, agrupados de acordo com as diferentes posições de instalação das linhas de coletores.

Ambas as figuras apresentam pequena amplitude interquartil (1° quartil a 3° quartil) para as repetições, indicando convergência de 50% dos valores lidos para com a mediana. Por outro lado, é possível identificar maior variação da primeira repetição com relação às demais para o P360 referente à posição L2, bem como da última repetição para L4.2. Como justificativa para tal variação, além das interferências climáticas durante os ensaios, supõe-se a possibilidade de uma variação de pressão não detectada durante o ensaio.

Os pontos vermelhos presentes nos gráficos indicam valores discrepantes, ou outliers. Nota-se que a concentração de valores acima do limite superior ou abaixo do limite inferior podem indicar um comportamento sistemático. Percebe-se para o P180 um padrão de outliers elevados para todas as repetições, enquanto para o P360, verifica-se uma distribuição mais uniforme, com exceção de L2 e L3, com valores de outliers reduzidos.

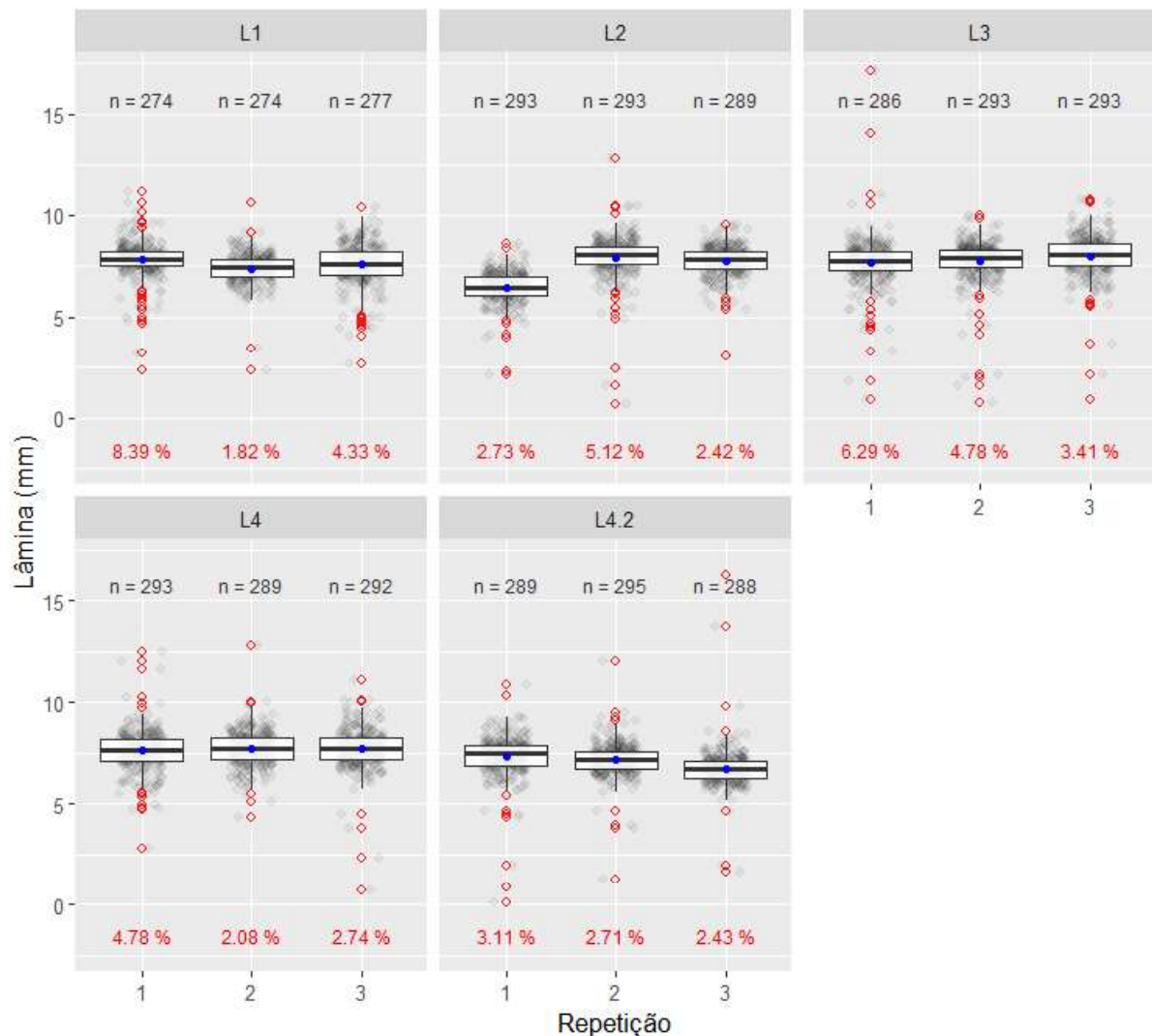
Figura 19 – Boxplots dos ensaios de uniformidade com espaçamento de 1 m entre coletores para cada posição de linha e repetição do P180



“n” equivale ao número de observações do ensaio. Os pontos em vermelho, bem como a porcentagem indicada representam, respectivamente, os outliers e sua porcentagem em relação ao número de observações. Os pontos em azul representam as médias de cada ensaio.

Fonte: Autor.

Figura 20 – Boxplots dos ensaios de uniformidade com espaçamento de 1 m entre coletores para cada posição de linha e repetição do P360



“n” equivale ao número de observações do ensaio. Os pontos em vermelho, bem como as porcentagens indicadas representam, respectivamente, os outliers e sua porcentagem em relação ao número de observações. Os pontos em azul representam as médias de cada ensaio.

Fonte: Autor.

Dado o espaçamento enxuto de 1 m entre coletores, é esperada uma maior sensibilidade dos volumes de água coletados às variações e ocorrências em campo. Consequentemente, observou-se durante os ensaios a comum ocorrência de um fluxo de água em forma de gotejamento caindo dos emissores, em decorrência de seu molhamento pelos emissores vizinhos. Assim, visto o espaçamento reduzido, os coletores que coincidentemente foram instalados imediatamente abaixo da trajetória dos emissores capturaram volumes maiores de água, possivelmente contribuindo para outliers elevados. Nota-se, no entanto, que tal efeito é mais pronunciado quanto maior o raio do pivô, uma vez que além de se ter um aumento da chance de tal

coincidência, maior o tempo de exposição dos coletores ao gotejamento para os lances mais internos do pivô. Assim, acredita-se que, dado o maior raio do P180, mais ocorrências dessa natureza foram captadas pelos coletores, resultando em uma maior concentração de outliers elevados, quando em comparação com P360.

Já para os outliers presentes abaixo do limite inferior, acredita-se que o regime de vento durante os ensaios tenha sido o principal fator devido ao efeito de arraste, notadamente para as posições L2 e L3 referentes ao P360. Soma-se à justifica o fato de que os coletores instalados mais próximos do centro do pivô estiveram sujeitos a menor sobreposição durante as irrigações, como consequência do  $ESP_{campo}$ .

Dada a grande quantidade de ensaios realizados para P180 e P360, encontram-se nos Apêndices os gráficos de linha referentes à cada ensaio com espaçamento entre coletores de 1 m (Apêndices C e D), indicando os valores individuais de  $CUC_{HH}$ , n° de observações, erros (medições perdidas), média e média ponderada, acompanhados de boxplots.

## 5.5 Perdas por evaporação e arraste

Apresenta-se na Tabela 10 as lâminas médias ponderadas e perdas por evaporação e arraste médias entre repetições para cada posição analisada. Adotou-se para os cálculos o conjunto de dados respectivos aos ensaios realizados com espaçamento de 1 metro entre coletores.

Tabela 10 – Médias de lâmina ponderada ( $L_{pon}$ ) e perda por evaporação e arraste ( $P_{E+A}$ ) por posição avaliada para o P360 e P180

| Posição |      | $L_{pon}$ (mm) | $P_{E+A}$ (%) |
|---------|------|----------------|---------------|
| P360    | L1   | 7,52           | 14,34         |
|         | L2   | 7,43           | 15,39         |
|         | L3   | 7,87           | 10,35         |
|         | L4   | 7,80           | 11,21         |
|         | L4.2 | 7,05           | 19,74         |
| P180    | L1   | 4,83           | 10,62         |
|         | L2   | 4,43           | 18,04         |
|         | L3   | 4,84           | 10,57         |
|         | L3.2 | 4,61           | 14,72         |

Fonte: Autor.

De acordo com as especificações técnicas disponibilizadas, tem-se uma lâmina de projeto de 8,78 mm para P360 e 5,41 mm para P180, à regulação de 50% do percentímetro (Tabela 4).

Segundo o exposto na tabela acima, as perdas por evaporação e arraste tiveram um mínimo e máximo de 10,35% e 19,74% respectivamente, com uma média de 14,21% para as posições avaliadas do P360. Já para o P180, observa-se perdas por evaporação e arraste com mínimo e máximo de 10,62% e 18,04% respectivamente, com uma média de 13,49%.

Nota-se que ambos os pivôs apresentaram um comportamento consideravelmente semelhante quanto a  $P_{E+A}$ , com uma diferença entre médias de apenas 0,72%, bem como máximos e mínimos próximos. Tal similaridade sugere que o comportamento geral quanto a  $P_{E+A}$  para os pivôs analisados converge para valores semelhantes, apesar dos resultados ligeiramente superiores para o P360. Essa proximidade nos resultados pode ser atribuída a características em comum de operação, como o horário de ativação dos pivôs, bem como a localização na mesma fazenda de ambos os equipamentos, e, portanto, sujeitos a condições climáticas parecidas em maior escala.

Nota-se que os valores de  $P_{E+A}$  para os pivôs P360 e P180 apresentados na Tabela 10 mostram uma aparente correlação com o comportamento observado nas Figuras 19 e 20. Verificou-se que, para uma maior variação da lâmina entre repetições e(ou) maior presença de outliers, valores mais elevados de  $P_{E+A}$  foram encontrados. Para o P180, a posição L2, que apresentou a maior  $P_{E+A}$ , também foi a que exibiu a maior ocorrência de outliers (Figura 19), com uma média de 4,73%, superior às demais posições. Observou-se, ainda, que os maiores valores de  $P_{E+A}$  levaram a uma redução nos resultados de  $L_{pon}$  para as posições L2 e L3.2, em detrimento das demais.

Para o P360, o mesmo padrão foi identificado, com menores valores de  $L_{pon}$  associados a maiores  $P_{E+A}$ , destacando-se a posição L4.2. Entretanto, é importante ressaltar que, apesar de L4.2 ter registrado o maior valor médio de  $P_{E+A}$ , a média de outliers, de 2,75%, foi a menor entre todas as posições, sugerindo que o aumento da  $P_{E+A}$  não necessariamente está diretamente relacionado à maior presença de outliers.

Acrescenta-se que, devido à amplitude de variação nos valores de  $P_{E+A}$  para ambos os pivôs, ensaios individuais, independentemente da posição que forem instalados, podem não se aproximar da realidade de maneira adequada, podendo apresentar valores de  $P_{E+A}$  significativamente subestimados ou superestimados com

relação à média. No entanto, como este estudo não teve o enfoque em tal análise, recomenda-se pesquisas adicionais quanto à estimativa da  $P_{E+A}$  utilizando-se os ensaios de uniformidade.

Al-Ghobari e Dewidar (2021) avaliaram 8 pivôs regulares em diferentes regiões na Arábia Saudita quanto ao  $CUC_{HH}$  e perdas por evaporação e arraste. Os valores de  $CUC_{HH}$  variaram de 74% a 90%, enquanto as perdas medidas e estimadas estiveram compreendidas no intervalo de 7,5% a 15%. Ortíz, Tarjuelo e de Juan (2009) apresentaram resultados semelhantes em análise realizada em Albacete, Espanha, com perdas por evaporação e arraste durante o dia para emissores rotativos igual a 12,5% para emissores instalados a 2,5 m de altura e de 8,2% para emissores instalados a 1 m. Já Playán *et al.* (2005) avaliaram as perdas para diferentes sistemas em Zaragoza, Espanha, sendo eles aspersão fixo e pivô linear, com perdas de 15,4% e 9,8% durante o dia, respectivamente. Dessa maneira, observa-se que as perdas por evaporação e arraste determinadas para P180 e P360 estão próximas dos valores mais elevados encontrados na literatura.

## **5.6 Uniformidade de distribuição, lâminas médias e ponderadas**

### **5.6.1 Pivô 180° – Análise individual das linhas de coletores**

Na Tabela 11 é apresentado o resumo da análise de variância (ANOVA) para o experimento em esquema fatorial 4x12, no delineamento em blocos casualizados referente ao pivô 180°.

Para os efeitos simples, tem-se que o espaçamento (ES) entre coletores de 1 a 12 m apresentou médias iguais. O fator posição (PO), por outro lado, indicou médias diferentes para a lâmina média ( $L_{med}$ ) e lâmina ponderada ( $L_{pon}$ ), enquanto para o  $CUC_{HH}$ , as médias não apresentaram diferença.

Nota-se ainda que a interação entre a posição das linhas de coletores no terreno e espaçamento entre coletores (PO x ES) não foi significativa para nenhuma das variáveis resposta.

Tabela 11 – Resumo da ANOVA para as linhas de coletores separadas, em relação à posição e espaçamento para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P180

| FV <sup>(1)</sup>      | GL <sup>(2)</sup> | Quadrado médio       |                      |                      |
|------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                        |                   | $L_{med}$            | $L_{pon}$            | $CUC_{HH}$           |
| Bloco                  | 2                 | 0,1478               | 0,2641               | 28,6100              |
| PO <sup>(3)</sup>      | 3                 | 0,2296*              | 0,8595**             | 2,2433 <sup>NS</sup> |
| ES <sup>(4)</sup>      | 11                | 0,0023 <sup>NS</sup> | 0,0056 <sup>NS</sup> | 2,4564 <sup>NS</sup> |
| PO x ES <sup>(5)</sup> | 33                | 0,0031 <sup>NS</sup> | 0,0105 <sup>NS</sup> | 1,2527 <sup>NS</sup> |
| Resíduo                | 94                | 0,0794               | 0,1282               | 3,7774               |
| CV <sup>(6)</sup> (%)  |                   | 5,84                 | 7,68                 | 2,16                 |

Fonte: Autor.

<sup>(1)</sup> FV: Fator de variação; <sup>(2)</sup> GL: Grau de liberdade; <sup>(3)</sup> PO: Posição das linhas de coletores (efeito simples); <sup>(4)</sup> ES: Espaçamento entre coletores (efeito simples); <sup>(5)</sup> PO x ES: Efeito combinado entre posição e espaçamento de coletores. <sup>(6)</sup> CV: Coeficiente de variação. \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; <sup>NS</sup> Não significativo.

Na Tabela 12 estão apresentados os valores médios de  $L_{med}$ ,  $L_{pon}$  e  $CUC_{HH}$  juntamente com o resultado do teste de comparação de médias de Tukey para as variáveis resposta que apresentaram significância na análise anterior (Tabela 11).

Tabela 12 – Médias das posições das linhas de coletores para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P180

| Posições | $L_{med}$ (mm) | $L_{pon}$ (mm) | $CUC_{HH}$ (%) |
|----------|----------------|----------------|----------------|
| L1       | 4,86 a         | 4,82 a         | 90,37          |
| L2       | 4,70 a         | 4,50 c         | 89,94          |
| L3       | 4,87 a         | 4,77 ab        | 89,88          |
| L3.2     | 4,86 a         | 4,56 bc        | 90,30          |

Fonte: Autor.

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não difere entre si, ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Apesar da indicação pela ANOVA de médias diferentes com relação à  $L_{med}$  (Tabela 11), a comparação pelo teste de Tukey não detectou diferenças significativas

entre os valores. Já para a  $L_{pon}$ , conclui-se que a posição L1, sujeita a variações altimétricas mais pronunciadas, é maior que as posições L2 e L3.2, mas igual à posição L3. Ainda, os valores de  $L_{pon}$  referentes às posições L3 e L3.2 foram consideradas como iguais, sendo o esperado dada a proximidade entre elas. Acrescenta-se que o grupo de menores médias de  $L_{pon}$  (L2 e L3.2) são notadamente as posições que apresentaram maiores valores de PEA, conforme indicado anteriormente na Tabela 10.

Nota-se que, dada a igualdade de  $L_{med}$  entre as posições, o fator de ponderação “raio”, em conjunto com a PEA, pode ter contribuído para a diferenciação de  $L_{pon}$ , com lâminas menores conforme aproxima-se da extremidade do pivô na posição L2. Por outro lado, a posição L1, submetida à uma variação de cota mais acentuada, em contraposição com L2, apresentou lâminas maiores conforme a progressão do raio. A extremidade da posição L1 está a 8 m abaixo da extremidade de L2 (Figura 7). Dessa maneira, acredita-se que houve um ganho de pressão suficiente para o aumento da lâmina ponderada, mas sem que houvesse influência significativa no  $CUC_{HH}$ . Tal fato está de acordo com o observado e discutido para a simulação da lâmina bruta de acordo com a  $Q_{medido}$  (Figura 15A), em que se observou vazões maiores a partir de aproximadamente 300 m do centro do pivô.

Ainda assim, destaca-se a importância da ação das válvulas reguladoras de pressão para o P180. Mesmo sujeito a um terreno consideravelmente irregular, as válvulas foram capazes de controlar a variação de pressão de maneira que os valores de  $CUC_{HH}$  foram iguais entre as posições de linhas de coletores.

De acordo com as classificações de Mantovani (2001) e ABNT (2016), os valores de  $CUC_{HH}$  para as posições amostradas podem ser classificados como excelentes, tendo em vista que não são significativamente diferentes entre si e apresentam um valor maior ou consideravelmente próximo do limiar de 90%.

## 5.6.2 Pivô 180° – Análise das metodologias de avaliação

Na Tabela 13 encontra-se o resumo da análise de variância (ANOVA) com relação às metodologias  $MA_{3\text{ linhas}}$ ,  $MA_{ABNT}$  e  $MA_{única}$  de avaliação de uniformidade de distribuição de água. Tendo em vista que o fator espaçamento não foi significativo



(Tabela 11), utilizou-se apenas o conjunto de dados obtidos diretamente em campo, relativo aos ensaios com coletores espaçados de 1 m.

Tabela 13 – Análise das linhas agrupadas para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P180

| FV <sup>(1)</sup>     | GL <sup>(2)</sup> | Quadrado médio       |                      |                      |
|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                       |                   | $L_{med}$            | $L_{pon}$            | $CUC_{HH}$           |
| Bloco                 | 2                 | 0,0891               | 0,0888               | 4,7415               |
| Metodologias          | 2                 | 0,0052 <sup>NS</sup> | 0,0157 <sup>NS</sup> | 0,0734 <sup>NS</sup> |
| Resíduo               | 4                 | 0,0319               | 0,0368               | 1,2179               |
| CV <sup>(3)</sup> (%) |                   | 3,68                 | 4,04                 | 1,22                 |

Fonte: Autor.

(<sup>1</sup>) FV: Fator de variação; (<sup>2</sup>) GL: Grau de liberdade; (<sup>3</sup>) CV: Coeficiente de variação; \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; <sup>NS</sup> Não significativo.

Nota-se que o fator de variação ‘Metodologias’ que compreende os diversos posicionamentos de linhas de coletores em campo apontou para a igualdade entre médias para as três variáveis resposta analisadas. É indicado na Tabela 14 abaixo os valores de lâmina média e média ponderada, bem como o  $CUC_{HH}$  para cada metodologia empregada.

Tabela 14 – Médias das metodologias de avaliação para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P180

| Metodologias           | $L_{med}$ (mm) | $L_{pon}$ (mm) | $CUC_{HH}$ (%) |
|------------------------|----------------|----------------|----------------|
| MA <sub>3</sub> linhas | 4,81           | 4,70           | 90,58          |
| MA <sub>ABNT</sub>     | 4,88           | 4,72           | 90,58          |
| MA <sub>única</sub>    | 4,88           | 4,83           | 90,31          |

Fonte: Autor.

Os valores de  $CUC_{HH}$  obtidos para os métodos de avaliação de uniformidade  $MA_{3 \text{ linhas}}$ ,  $MA_{ABNT}$  e  $MA_{única}$  podem ser classificados como excelentes e muito bons, de acordo com Mantovani (2001) e ABNT (2016).

Observa-se que as metodologias avaliadas para o P180 não apresentaram médias diferentes para a  $L_{pon}$ , em contraste com o verificado na análise individual das linhas de coletores, conforme indicado na Tabela 12. É importante ressaltar que os métodos de avaliação  $MA_{3 \text{ linhas}}$  e  $MA_{ABNT}$  representam os valores médios de  $L_{med}$ ,  $L_{pon}$  e  $CUC_{HH}$  das linhas de coletores que os compõe. Dessa maneira, as diferenças entre os valores das variáveis mencionadas relativas às linhas de coletores compreendidas pelas metodologias tendem a diminuir.

Dada a quantidade de materiais e mão de obra envolvidos para as avaliações de uniformidade de distribuição, observa-se que a metodologia mais otimizada para uma avaliação geral do P180 é a  $MA_{única}$ . No entanto, de acordo com a Tabela 12, dada a diferença entre médias para a  $L_{pon}$ , o posicionamento dos coletores em locais de maior variação de cota é a abordagem mais apropriada a fim de avaliar a  $L_{pon}$  nessas localidades críticas.

### 5.6.3 Pivô 360° – Análise individual das linhas de coletores

Na Tabela 15 é apresentado o resumo da análise de variância (ANOVA) para o experimento em esquema fatorial 5x12 delineado em blocos casualizados, referente ao P360.

Semelhante à análise referente ao P180, para o P360 nota-se que a interação entre a posição das linhas no terreno e o espaçamento entre coletores (PO x ES) não foi significativa para nenhuma das variáveis resposta. Ao analisar os efeitos simples, tem-se que o espaçamento (ES) entre coletores de 1 a 12 m apresentou médias iguais. O fator posição (PO), por outro lado, apresentou médias diferentes para a lâmina média ( $L_{med}$ ), lâmina ponderada ( $L_{pon}$ ) e  $CUC_{HH}$ .

Na Tabela 16 estão apresentados os valores médios de  $L_{med}$ ,  $L_{pon}$  e  $CUC_{HH}$ , juntamente com o resultado do teste de comparação de médias de Tukey para as variáveis resposta que apresentaram significância na análise anterior (Tabela 15).

Tabela 15 – Resumo da ANOVA para as linhas de coletores separadas, em relação à posição e espaçamento para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P360

| FV <sup>(1)</sup>      | GL <sup>(2)</sup> | Quadrado médio       |                      |                      |
|------------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                        |                   | $L_{med}$            | $L_{pon}$            | $CUC_{HH}$           |
| Bloco                  | 2                 | 1,0225               | 1,5400               | 40,635               |
| PO <sup>(3)</sup>      | 4                 | 3,0532**             | 5,2582**             | 42,3200**            |
| ES <sup>(4)</sup>      | 11                | 0,0060 <sup>NS</sup> | 0,0270 <sup>NS</sup> | 2,5763 <sup>NS</sup> |
| PO x ES <sup>(5)</sup> | 44                | 0,0106 <sup>NS</sup> | 0,0319 <sup>NS</sup> | 1,500 <sup>NS</sup>  |
| Resíduo                | 118               | 0,1666               | 0,1701               | 4,9710               |
| CV(%)                  |                   | 5,46                 | 5,49                 | 2,43                 |

Fonte: Autor.

<sup>(1)</sup> FV: Fator de variação; <sup>(2)</sup> GL: Grau de liberdade; <sup>(3)</sup> PO: Posição das linhas de coletores (efeito simples); <sup>(4)</sup> ES: Espaçamento entre coletores (efeito simples); <sup>(5)</sup> PO x ES: Efeito combinado entre posição e espaçamento de coletores. \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; <sup>NS</sup> Não significativo.

Tabela 16 – Médias das posições das linhas de coletores para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P360

| Posição | $L_{med}$ (mm) | $L_{pon}$ (mm) | $CUC_{HH}$ (%) |
|---------|----------------|----------------|----------------|
| L1      | 7,56 ab        | 7,53 bc        | 93,35 a        |
| L2      | 7,35 b         | 7,39 c         | 92,20 ab       |
| L3      | 7,80 a         | 7,89 a         | 92,11 ab       |
| L4      | 7,62 a         | 7,79 ab        | 91,49 bc       |
| L4.2    | 7,04 c         | 6,92 d         | 90,39 c        |

Fonte: Autor.

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não difere entre si, ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Todas as posições das linhas de coletores apresentaram um valor de  $CUC_{HH}$  classificado como excelente e muito bom, de acordo com Mantovani (2001) e ABNT (2016).

Destaca-se que para a posição L4.2,  $L_{med}$ ,  $L_{pon}$  e  $CUC_{HH}$  apresentaram médias menores com relação às demais posições, com exceção do  $CUC_{HH}$  para a posição

L4. Tendo em vista que a linha L4.2 é próxima à linha L4, era esperado maior semelhança com ela para  $L_{med}$  e  $L_{pon}$ . Pelo boxplot referente ao P360 (Figura 20), percebe-se que todas as repetições da posição L4.2 apresentaram valores menores em comparação com a L4, contribuindo para uma menor média. Durante os ensaios no P360, a linha lateral moveu-se no sentido anti-horário, irrigando, portanto, de maneira sistemática, inicialmente a linha L4.2. Dessa maneira, acredita-se que, devido principalmente à ação do vento, o efeito da deriva favoreceu maiores valores de  $L_{med}$  e  $L_{pon}$  para a posição L4, em detrimento de valores reduzidos para L4.2. Como suporte a essa afirmação, conforme indicado anteriormente na Tabela 10, o valor médio de PEA foi consideravelmente superior para L4.2, apesar da proximidade com L4. Ainda, conforme indicado anteriormente para os dados climáticos (Tabela 6), como só foram coletadas informações no início do ensaio, tornou-se impraticável a análise de maneira mais ampla do regime do vento durante as avaliações.

Já para L2, apesar de ser a única posição sujeita à variação relevante de cota (Figura 9), com sua extremidade a aproximadamente 5 m abaixo do centro do pivô, os valores de  $CUC_{HH}$  foram iguais às demais posições, com exceção da L4.2. Por outro lado, para  $L_{med}$  e  $L_{pon}$ , os resultados foram estatisticamente iguais a L1, sendo esta uma linha em nível e diametralmente oposta, indicando assim que o declive em L2 possivelmente não afetou de maneira considerável os resultados.

Em geral, observou-se maior variação dos valores de  $L_{med}$ ,  $L_{pon}$  e  $CUC_{HH}$  em função das posições das linhas de coletores para o P360 quando em comparação ao P180. Tal resultado foi surpreendente, tendo em vista a natureza acentuadamente mais irregular do terreno observada para o P180. Acredita-se que tal divergência pode ser decorrente de variações não registradas das variáveis climáticas na localidade do P360, notadamente para o vento, tendo em vista que o P360 está localizado em uma área mais plana. Em concordância, os valores de  $P_{E+A}$  (Tabela 10) para o P360 apresentaram maior amplitude, com média superior à observada para o P180. No entanto, ao se convencionar a captação de dados climáticos para somente o início dos ensaios, a verificação da variação da velocidade do vento, temperatura e umidade fica impossibilitada, indicando a necessidade de mudança da abordagem para análises futuras.

#### 5.6.4 Pivô 360° – Análise das metodologias de avaliação

Na Tabela 17, está apresentado o resumo da análise de variância (ANOVA) referente às metodologias MA<sub>4</sub> linhas, MA<sub>3</sub> linhas\*, MA<sub>ABNT</sub>, e MA<sub>única</sub> de avaliação de uniformidade de distribuição de água. Analogamente à análise das metodologias para P180, apenas o conjunto de dados referente ao espaçamento de 1 m entre coletores foi utilizado.

Tabela 17 – Análise das linhas agrupadas para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P360

| FV <sup>(1)</sup>     | GL <sup>(2)</sup> | Quadrado médio       |                      |                      |
|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                       |                   | $L_{med}$            | $L_{pon}$            | $CUC_{HH}$           |
| Bloco                 | 2                 | 0,0870               | 0,0177               | 0,4239               |
| Metodologias          | 3                 | 0,0482 <sup>NS</sup> | 0,0715 <sup>NS</sup> | 0,5732 <sup>NS</sup> |
| Resíduo               | 6                 | 0,0513               | 0,0578               | 0,1383               |
| CV <sup>(3)</sup> (%) |                   | 3,01                 | 3,16                 | 0,4                  |

Fonte: Autor.

<sup>(1)</sup> FV: Fator de variação; <sup>(2)</sup> GL: Grau de liberdade; <sup>(3)</sup> CV: Coeficiente de variação; \* significativo a 5%; \*\* significativo a 1%; <sup>NS</sup> Não significativo.

De maneira semelhante ao observado para o P180, as diferentes metodologias avaliadas não apontaram diferenças entre as médias de  $L_{med}$ ,  $L_{pon}$  e  $CUC_{HH}$ . É indicado na Tabela 18 os valores de lâmina média e média ponderada, bem como o  $CUC_{HH}$  para cada metodologia empregada.

Os valores de  $CUC_{HH}$  obtidos para os métodos de avaliação de uniformidade MA<sub>4</sub> linhas, MA<sub>3</sub> linhas\*, MA<sub>ABNT</sub> e MA<sub>única</sub> podem ser classificados como excelentes e muito bons, de acordo com Mantovani (2001) e ABNT (2016).

Apesar de ter sido verificado na Tabela 16 médias diferentes para  $L_{med}$ ,  $L_{pon}$  e  $CUC_{HH}$  relativas às diferentes posições de linhas de coletores, de maneira análoga ao observado para a análise das metodologias de avaliação para P180 (Tabela 14), as diferenças foram atenuadas.

Tabela 18 – Médias das metodologias de avaliação para a lâmina média ( $L_{med}$ ), ponderada ( $L_{pon}$ ) e coeficiente de uniformidade de Christiansen modificado ( $CUC_{HH}$ ) referentes ao P360

| Metodologias             | $L_{med}$ (mm) | $L_{pon}$ (mm) | $CUC_{HH}$ (%) |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
| MA <sub>4</sub> linhas   | 7,59           | 7,65           | 92,51          |
| MA <sub>3</sub> linhas * | 7,51           | 7,61           | 92,31          |
| MA <sub>ABNT</sub>       | 7,36           | 7,42           | 91,57          |
| MA <sub>única</sub>      | 7,65           | 7,79           | 91,80          |

Fonte: Autor.

Ressalta-se que quanto maior a amostragem em um pivô, representada pelo número de linhas de coletores instaladas em diferentes posições, maior a tendência de se obter os valores médios de lâminas e  $CUC_{HH}$  para toda a área irrigada. No entanto, observa-se que a metodologia MA<sub>única</sub> foi capaz de fornecer médias iguais quando comparadas aos demais métodos. Assim, a metodologia MA<sub>única</sub> se mostrou como a alternativa mais interessante para uma avaliação geral do P360. Por outro lado, aconselha-se o posicionamento de coletores ao longo dos raios com maior variação da cota do relevo para melhor conhecimento da  $L_{med}$  e  $L_{pon}$ , como observado e indicado anteriormente para o P180.

#### 5.6.5 Discussão adicional

Nota-se que os resultados encontrados a partir dos ensaios de uniformidade para os  $CUC_{HH}$  expostos neste trabalho, tanto para o P360 quanto para P180, estão, em média, acima de 90%, podendo ser classificados como excelentes ou muito bons, de acordo com Mantovani (2001) e ABNT (2016). Também foi possível observar que, de maneira geral, os valores de uniformidade encontrados para as combinações de linhas de coletores (Tabelas 14 e 18) foram ligeiramente maiores quando em comparação com as linhas isoladas (Tabelas 12 e 16). Esse tipo de comportamento não é incomum, com Bernardo *et al.* (2019) reforçando sua ocorrência. Isso acontece devido ao fato de que, ao combinar diferentes linhas de coletores, os efeitos das variações individuais são diluídos no conjunto, proporcionando uma média mais representativa da uniformidade. Por outro lado, as avaliações com linhas isoladas

tendem a ter resultados com maior interferência, resultando em valores de uniformidade mais baixos. Pode-se tomar como exemplo a influência do vento, em que é possível uma redução significativa na uniformidade para a avaliação de uma linha isolada, enquanto para a combinação com outras linhas, seu efeito será atenuado. Não por acaso, ASABE (2020) e ABNT (2016) afirmam que quanto mais elevadas forem as velocidades do vento durante os ensaios, mais comprometidos estarão os resultados encontrados.

Toledo, Albuquerque e Souza (2017) analisaram 21 pivôs em diferentes regiões do estado de Minas Gerais, Brasil, e encontraram na maior parte das avaliações valores de  $CUC_{HH}$  superiores a 80%. Lecina, Hill e Barker (2016) citam diversos trabalhos em que o  $CUC_{HH}$  apresentou valores mínimos na ordem dos 49%, com máximos de até 93%, sendo a média entre os citados de aproximadamente 81,5%. Assim, em comparação com as avaliações de uniformidade que constam nos trabalhos mencionados, ambos os pivôs centrais performaram bem, se aproximando dos valores máximos usualmente reportados.

De acordo com Borghi *et al.* (2016), o município de Rio Paranaíba, onde foram conduzidos os ensaios, se destaca no cultivo irrigado para culturas como a cenoura e o alho. Acrescentam, ainda, que a região em que o município se localiza possui uma atividade econômica acentuadamente direcionada à agropecuária. Não obstante, verificou-se durante o estudo um considerável investimento humano e material por parte da empresa parceira, bem como com a assessoria de terceiros, na operação e manutenção dos pivôs centrais, objetivando o melhor rendimento possível. Foi relatado que periodicamente são realizadas análises de uniformidade e redimensionamento dos pivôs, a fim de detectar quaisquer desvios com relação ao funcionamento esperado.

Quanto à disposição de coletores em campo, Rogers *et al.* (2009) avaliaram o efeito do tamanho dos recipientes em conjunto do espaçamento entre os mesmos, sendo de 1,22 m e 2,44 m para avaliações de uniformidade com emissores rotativos, I-Wob e placa fixa. Concluiu-se que o  $CUC_{HH}$  não apresentou diferenças significativas para os espaçamentos testados, acrescentando, de maneira geral, que distâncias maiores são capazes de determinar a performance global do sistema, enquanto distâncias menores podem detectar problemas pontuais em emissores.

De maneira análoga, porém para espaçamentos consideravelmente maiores, verificou-se neste trabalho a insensibilidade do  $CUC_{HH}$  em função do espaçamento

entre coletores para os pivôs analisados. Têm-se, assim, o indicativo da adoção de diferentes valores de distâncias entre coletores como um resultado da finalidade proposta do ensaio a ser realizado, bem como a disponibilidade de material para a avaliação, objetivando maior ou menor sensibilidade do teste.

No entanto, é fundamental destacar que a insensibilidade dos valores de  $CUC_{HH}$  para espaçamentos entre coletores de 1 a 12 m indicados no presente trabalho decorrem da avaliação de dois pivôs acentuadamente uniformes, com manutenção frequente e operação por mão de obra especializada, como mencionado anteriormente. Embora possa parecer contraintuitivo imaginar que existam pivôs centrais com operação e manutenção inadequadas, os resultados deste trabalho demonstram que os pivôs analisados apresentaram uniformidades de irrigação de alto nível. No entanto, isso não permite concluir que outros pivôs compartilhem das mesmas características. Logo, em cenários que tais equipamentos apresentem condições de operação e manutenção menos otimizadas, implicando em menor uniformidade, os resultados encontrados podem não se repetir, evidenciando a necessidade de estudos adicionais.



## 6 CONCLUSÕES

As conclusões aqui apresentadas são resultado das especificidades dos pivôs e emissores avaliados neste estudo. Portanto, os resultados podem variar conforme o equipamento, configurações ou combinações adotadas. Assim, para as condições em que este trabalho foi conduzido, conclui-se que:

- As metodologias de avaliação da uniformidade, que compreendem a combinação de variadas posições de linhas de coletores, não apresentaram diferenças entre médias.
- O efeito combinado do espaçamento e posição das linhas de coletores, assim como o efeito simples do espaçamento de 1 a 12 metros não influenciaram significativamente os resultados para os pivôs centrais amostrados.
- Os valores de  $L_{pon}$ ,  $L_{med}$  e  $CUC_{HH}$  apresentaram médias diferentes para o P360 em relação às variadas posições das linhas de coletores, enquanto para o P180, a diferença entre médias foi observada apenas para  $L_{pon}$ .
- A seleção de emissores por meio dos métodos  $MQ_{ap}$  e  $MCd$ , tanto para  $ESP_{uniforme}$ , quanto para  $ESP_{campo}$ , apresentou valores de  $CUC_{HH}$  teóricos superiores aos simulados de acordo com a listagem de bocais observada em campo para ambos os pivôs.
- As lâminas totais, bem como os  $CUC_{HH}$  simulados com a  $Q_{medido}$  foram respectivamente superiores e inferiores de acordo com o simulado com a  $Q_{catálogo}$ .
- Os valores de  $CUC_{HH}$  médios para ambos os pivôs podem ser classificados como excelentes, enquanto as perdas por evaporação e arraste são semelhantes aos valores máximos reportados na literatura.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985-2017)**. 2.ed. Brasília, DF: Ana, 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil (1985-2022)**. Brasília, DF: Ana, 2023. (Boletim do SNIRH, 4).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023**. Brasília, DF: Ana, 2024.
- AL-GHOBARI, H.; DEWIDAR, A. Z. A comparative study of standard center pivot and growers-based modified center pivot for evaluating uniformity coefficient and water distribution. **Agronomy**, v. 11, n. 8, 2021.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMARE, M. D.; TOMPAI, Z. A review on factors affecting the uniformity of sprinkler Irrigation. **Acta Technica Jaurinensis**, v. 15, n. 2, p. 99-109, 2022.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Field test procedure for determining irrigation water distribution uniformity of center pivot and lateral move systems**. St. Joseph, MI: Asabe, 2020.
- AMIR, I.; ALCHANATIS, V. Procedure for predicting and designing moving sprinkler application patterns. **Irrigation Science**, v. 13, n. 2, p. 93-98, 1992.
- ASCOUGH, G. W.; KIKER, G. A. The effect of irrigation uniformity on irrigation water requirements. **Water SA**, v. 28, n. 2, p. 235-241, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 11545**: equipamentos de irrigação agrícola - máquinas de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com sprayers ou aspersores - determinação da uniformidade de distribuição e água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9.ed. Viçosa, MG: UFV, 2019. 545 p.
- BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; GONTIJO NETO, M. M.; SANTANA, D. P.; SOUSA, G. F.; SILVA, M. A.; SOUZA, C. H. E. **Sistemas de cultivo de soja e milho na região do Alto Paranaíba - MG e resultados de avaliações na safra 2014/15**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2016. 47 p.
- BREMOND, B.; MOLLE, B. Characterization of rainfall under center pivot: influence of measuring procedure. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 121, n. 5, p. 347-353, 1995.

CHAUHDARY, J. N.; LI, H.; JIANG, Y.; PAN, X.; HUSSAIN, Z.; JAVAID, M.; RIZWAN, M. Advances in sprinkler irrigation: a review in the context of precision irrigation for crop production. **Agronomy**, v. 14, n. 1, p. 47, 2023.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942.

DAVIS, J. R. Measuring water distribution from sprinklers. **Transactions of the ASABE**, v. 9, n. 1, p. 94-97, 1966.

ELHAJ, H.; ALSAYIM, H. Technical performance evaluation of center pivot sprinkler irrigation systems in the Atbara river region, Sudan. **Journal of Agricultural Science and Engineering**, v. 7, n. 1, p. 1-7, 2021.

ELSHAIKH, A. E.; JIAO, X.; YANG, S. Performance evaluation of irrigation projects: Theories, methods, and techniques. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 87-96, 2018.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt**: pacote experimental designs (português). 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=ExpDes.pt>. Acesso em: 19 jan. 2024.

FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; CAMARGO, A. P.; COLOMBO, A. **Irrigação por aspersão**: sistema pivô central. Maringá, PR: Eduem, 2018. 355 p.

HART, W. E. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineering**, v. 42, n. 7, p. 354-355, 1961.

HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968.

HEINEMANN, A. B.; FRIZZONE, J. A.; PINTO, J. M.; FEITOSA FILHO, J. C. Influence of sprinkler height on the uniformity of water distribution of a central pivot system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 9, p. 1487-1491, 1998.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1990.

KUSHWAHA, N.; KANOJIA, V. Evaluation of central pivot irrigation system under different soil and climatic conditions. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 4, p. 2551-2553, 2018.

LECINA, S.; HILL, R. W.; BARKER, J. B. Irrigation uniformity under different socio-economic conditions: evaluation of centre pivots in Aragon (Spain) and Utah (USA). **Irrigation and Drainage**, v. 65, n. 4, p. 549-558, 2016.

LI, Y.; HUI, X.; YAN, H.; CHEN, D. Effects of travel speed and collector on evaluation of the water application uniformity of a center pivot irrigation system. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020.

LIMA, A. S.; ZOCOLER, J. L. Uniformidade de distribuição e lâmina de água aplicada em sistema pivô central em função da posição relativa da linha lateral. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 3, n. 2, p. 27-32, 2010.

MANTOVANI, E. C. **Avalia: programa de avaliação da irrigação por aspersão e localizada**. Viçosa: UFV, 2001.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3.ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 355 p.

MARJANG, N.; MERKLEY, G. P.; SHABAN, M. Center-pivot uniformity analysis with variable container spacing. **Irrigation Science**, v. 30, n. 2, p. 149-156, 2012.

MARTIN, D. L.; KRANZ, W. L.; THOMPSON, A. L.; LIAND, H. Selecting sprinkler packages for center pivots. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 2, p. 513-523, 2012.

MOHAMED, A. Z.; PETERS, R. T.; SARWAR, A.; MOLAEI, B.; McMORAN, D. Impact of the intermittency movement of center pivots on irrigation uniformity. **Water**, v. 13, n. 9, p. 1167, 2021.

MOHAMMED, H. M.; AHMED, I. A. Hydraulic performance and soil moisture distribution under central pivot irrigation system. **Middle East Journal of Agriculture Research**, p. 81-88, 2022.

ORTÍZ, J. N.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A. Characterisation of evaporation and drift losses with centre pivots. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 11, p. 1541-1546, 2009.

PLAYÁN, E.; SALVADOR, R.; FACI, J. M.; ZAPATA, N.; MARTÍNEZ-COB, A.; SÁNCHEZ, I. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. **Agricultural Water Management**, v. 76, n. 3, p. 139-159, 2005.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2022.

RAJAN, N.; MAAS, S.; KELLISON, R.; DOLLAR, M.; CUI, S.; SHARMA, S.; ATTIA, A. Emitter uniformity and application efficiency for centre - pivot irrigation systems. **Irrigation and Drainage**, v. 64, n. 3, p. 353-361, 2015.

REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FREITAS, P. S. L. Influência do espaçamento entre aspersores na uniformidade de distribuição de água acima e abaixo da superfície do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 257-261, 1998.

ROCHA, M. O.; CUNHA, F. F.; VIANA, F. J.; OLIVEIRA, J. T. Classification and use of emitters used in spray irrigation systems. **Engenharia Agrícola**, v. 43, n. 6, 2023.

RODRIGUES, G. C.; PEREIRA, L. S. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 4, p. 536-551, 2009.

ROGERS, D. H.; ALAM, M.; SHAW, L. K. **Considerations for nozzle package selection for center pivots**. Manhattan, KS: Kansas State University, Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, 2008. (Irrigation Management Series). Disponível em: [https://bookstore.ksre.ksu.edu/download/considerations-for-nozzle-package-selection-for-center-pivots\\_L908](https://bookstore.ksre.ksu.edu/download/considerations-for-nozzle-package-selection-for-center-pivots_L908). Acesso em: 20 jan. 2024.

ROGERS, D. H.; ALAM, M.; SHAW, L. K.; CLARK, G. A. **Impact of collector size and spacing on center pivot uniformity evaluations**. Reno, NV: ASABE, 2009. (Meeting Paper, 09-6522).

ROVELO, C. O. R.; RUIZ, N. Z.; TOLOSA, J. B.; FÉLIX, J. R. F.; LATORRE, B. Characterization and simulation of a low-pressure rotator spray plate sprinkler used in center pivot irrigation systems. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 8, 2019.

SADEGHI, S. H.; SAEDI, S. I.; PETERS, R. T.; STÖCKLE, C. Towards improving the global water application uniformity of centre pivots through lateral speed adjustment. **Biosystems Engineering**, v. 215, p. 215-227, 2022.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. **Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô-central**. Planaltina, DF: Embrapa-CPAC, 1998. 54 p.

SOLOMON, K. H. **Sprinkler irrigation uniformity**. Fresno, CA: Centre for Irrigation Technology, California State University, 1990.

TAMBO, F. L. R.; LIMA, L. A.; THEBALDI, M. S.; CORRÊA, F. V. Sampling patterns may influence the evaluation of irrigation uniformity of center pivot systems. **Water Supply**, v. 22, n. 8, p. 6532-6542, 2022.

TARJUELO, J. M.; MONTERO, J.; HONRUBIA, F. T.; ORTIZ, J. J.; ORTEGA, J. F. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area. **Agricultural Water Management**, v. 40, n. 2-3, p. 315-331, 1999.

TOLEDO, C. E.; SOUZA, C. M. P.; ALBUQUERQUE, P. E. P. Eficiência da aplicação da água por pivô central em diferentes regiões de Minas Gerais. **Irriga**, v. 22, n. 4, p. 821-831, 2017.

VALÍN, M. I.; CAMEIRA, M. R.; TEODORO, P. R.; PEREIRA, L. S. DEPIVOT: a model for center-pivot design and evaluation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 87, p. 159-170, 2012.

WALKER, W. R. **Sprinkler and trickle irrigation**. 3.ed. Fort Collins, CO: Department of Agricultural and Chemical Engineering, Colorado State University, 1979.

WALLER, P.; YITAYEW, M. Center pivot irrigation systems. In: WALLER, P.; YITAYEW, M. **Irrigation and drainage engineering**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 209-228.

WICKHAM, H. **Ggplot2**: elegant graphics for data analysis. 2.ed. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

WILCOX, J. C.; SWAILES, G. E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, v. 27, n. 11, p. 565-583, 1947.

## APÊNDICE A – Mapa de bocais para o P180

Mapa de bocais para o P180, conforme a listagem da empresa parceira (lista), e os métodos de vazão aproximada ( $MQ_{ap}$ ) e coeficiente de descarga ( $MCd$ ) para espaçamento uniforme ( $ESP_{uniforme}$ ) e espaçamento observado em campo ( $ESP_{campo}$ )

| Lance | Spray | Lista | $ESP_{uniforme}$ |       | $ESP_{campo}$ |       |
|-------|-------|-------|------------------|-------|---------------|-------|
|       |       |       | $MQ_{ap}$        | $MCd$ | $MQ_{ap}$     | $MCd$ |
| 1     | 1     | 0     | 0                | 0     | 0             | 0     |
| 1     | 2     | 0     | 0                | 0     | 0             | 0     |
| 1     | 3     | 0     | 0                | 0     | 0             | 0     |
| 1     | 4     | 6     | 6                | 6     | 6             | 6     |
| 1     | 5     | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 6     | 6     | 6                | 6     | 6             | 6     |
| 1     | 7     | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 8     | 6     | 6                | 6     | 6             | 6     |
| 1     | 9     | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 10    | 6     | 6                | 6     | 6             | 6     |
| 1     | 11    | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 12    | 6     | 6                | 6     | 6,5           | 6,5   |
| 1     | 13    | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 14    | 6,5   | 6                | 6     | 7             | 7     |
| 1     | 15    | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 16    | 7     | 6                | 6     | 7,5           | 7,5   |
| 1     | 17    | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 18    | 7,5   | 6                | 6     | 7,5           | 7,5   |
| 1     | 19    | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 20    | 8     | 6                | 6     | 8             | 8     |
| 1     | 21    | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 2     | 1     | 8,5   | 6                | 6     | 8,5           | 8,5   |
| 2     | 2     | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 2     | 3     | 8,5   | 6,5              | 6,5   | 9             | 9     |
| 2     | 4     | 0     | 6,5              | 6,5   | 0             | 0     |
| 2     | 5     | 9     | 6,5              | 6,5   | 9,5           | 9,5   |
| 2     | 6     | 0     | 7                | 6,5   | 0             | 0     |
| 2     | 7     | 9,5   | 7                | 7     | 9,5           | 9,5   |
| 2     | 8     | 0     | 7                | 7     | 0             | 0     |
| 2     | 9     | 10    | 7                | 7     | 10            | 10    |
| 2     | 10    | 0     | 7                | 7     | 0             | 0     |
| 2     | 11    | 10    | 7,5              | 7,5   | 10,5          | 10,5  |
| 2     | 12    | 0     | 7,5              | 7,5   | 0             | 0     |
| 2     | 13    | 10,5  | 7,5              | 7,5   | 10,5          | 10,5  |
| 2     | 14    | 0     | 7,5              | 7,5   | 0             | 0     |
| 2     | 15    | 11    | 8                | 8     | 11            | 11    |
| 2     | 16    | 0     | 8                | 8     | 0             | 0     |
| 2     | 17    | 11    | 8                | 8     | 11,5          | 11,5  |
| 2     | 18    | 0     | 8                | 8     | 0             | 0     |

| Lance | Spray | Lista | ESP <sub>uniforme</sub> |      | ESP <sub>campo</sub> |      |
|-------|-------|-------|-------------------------|------|----------------------|------|
|       |       |       | MQ <sub>ap</sub>        | MCd  | MQ <sub>ap</sub>     | MCd  |
| 2     | 19    | 11,5  | 8                       | 8    | 11,5                 | 11,5 |
| 2     | 20    | 0     | 8,5                     | 8,5  | 0                    | 0    |
| 2     | 21    | 10,5  | 8,5                     | 8,5  | 10,5                 | 10,5 |
| 3     | 1     | 8,5   | 8,5                     | 8,5  | 8,5                  | 8,5  |
| 3     | 2     | 8,5   | 8,5                     | 8,5  | 8,5                  | 8,5  |
| 3     | 3     | 8,5   | 8,5                     | 8,5  | 8,5                  | 8,5  |
| 3     | 4     | 8,5   | 9                       | 9    | 9                    | 9    |
| 3     | 5     | 8,5   | 9                       | 9    | 9                    | 9    |
| 3     | 6     | 8,5   | 9                       | 9    | 9                    | 9    |
| 3     | 7     | 9     | 9                       | 9    | 9                    | 9    |
| 3     | 8     | 9     | 9                       | 9    | 9                    | 9    |
| 3     | 9     | 9     | 9,5                     | 9,5  | 9,5                  | 9,5  |
| 3     | 10    | 9     | 9,5                     | 9,5  | 9,5                  | 9,5  |
| 3     | 11    | 9     | 9,5                     | 9,5  | 9,5                  | 9,5  |
| 3     | 12    | 9,5   | 9,5                     | 9,5  | 9,5                  | 9,5  |
| 3     | 13    | 9,5   | 9,5                     | 9,5  | 9,5                  | 9,5  |
| 3     | 14    | 9,5   | 9,5                     | 9,5  | 9,5                  | 9,5  |
| 3     | 15    | 9,5   | 10                      | 10   | 10                   | 10   |
| 3     | 16    | 9,5   | 10                      | 10   | 10                   | 10   |
| 3     | 17    | 9,5   | 10                      | 10   | 10                   | 10   |
| 3     | 18    | 10    | 10                      | 10   | 10                   | 10   |
| 3     | 19    | 10    | 10                      | 10   | 10                   | 10   |
| 3     | 20    | 10    | 10,5                    | 10   | 10,5                 | 10   |
| 3     | 21    | 10,5  | 10,5                    | 10,5 | 10,5                 | 10,5 |
| 4     | 1     | 10,5  | 10,5                    | 10,5 | 10,5                 | 10,5 |
| 4     | 2     | 10    | 10,5                    | 10,5 | 10,5                 | 10,5 |
| 4     | 3     | 10,5  | 10,5                    | 10,5 | 10,5                 | 10,5 |
| 4     | 4     | 10,5  | 10,5                    | 10,5 | 10,5                 | 10,5 |
| 4     | 5     | 10,5  | 10,5                    | 10,5 | 10,5                 | 10,5 |
| 4     | 6     | 10,5  | 11                      | 11   | 11                   | 11   |
| 4     | 7     | 10,5  | 11                      | 11   | 11                   | 11   |
| 4     | 8     | 11    | 11                      | 11   | 11                   | 11   |
| 4     | 9     | 11    | 11                      | 11   | 11                   | 11   |
| 4     | 10    | 11    | 11                      | 11   | 11                   | 11   |
| 4     | 11    | 11    | 11                      | 11   | 11                   | 11   |
| 4     | 12    | 11    | 11,5                    | 11,5 | 11,5                 | 11,5 |
| 4     | 13    | 11    | 11,5                    | 11,5 | 11,5                 | 11,5 |
| 4     | 14    | 11    | 11,5                    | 11,5 | 11,5                 | 11,5 |
| 4     | 15    | 11,5  | 11,5                    | 11,5 | 11,5                 | 11,5 |
| 4     | 16    | 11,5  | 11,5                    | 11,5 | 11,5                 | 11,5 |
| 4     | 17    | 11,5  | 11,5                    | 11,5 | 11,5                 | 11,5 |
| 4     | 18    | 11,5  | 11,5                    | 11,5 | 11,5                 | 11,5 |
| 4     | 19    | 11,5  | 12                      | 12   | 12                   | 12   |
| 4     | 20    | 11,5  | 12                      | 12   | 12                   | 12   |



| Lance | Spray | Lista | ESP <sub>uniforme</sub> |      | ESP <sub>campo</sub> |      |
|-------|-------|-------|-------------------------|------|----------------------|------|
|       |       |       | MQ <sub>ap</sub>        | MCd  | MQ <sub>ap</sub>     | MCd  |
| 4     | 21    | 12    | 12                      | 12   | 12                   | 12   |
| 5     | 1     | 12    | 12                      | 12   | 12                   | 12   |
| 5     | 2     | 12    | 12                      | 12   | 12                   | 12   |
| 5     | 3     | 12    | 12                      | 12   | 12                   | 12   |
| 5     | 4     | 12    | 12                      | 12   | 12                   | 12   |
| 5     | 5     | 12    | 12,5                    | 12,5 | 12,5                 | 12,5 |
| 5     | 6     | 12    | 12,5                    | 12,5 | 12,5                 | 12,5 |
| 5     | 7     | 12    | 12,5                    | 12,5 | 12,5                 | 12,5 |
| 5     | 8     | 12    | 12,5                    | 12,5 | 12,5                 | 12,5 |
| 5     | 9     | 12,5  | 12,5                    | 12,5 | 12,5                 | 12,5 |
| 5     | 10    | 12,5  | 12,5                    | 12,5 | 12,5                 | 12,5 |
| 5     | 11    | 12,5  | 12,5                    | 12,5 | 12,5                 | 12,5 |
| 5     | 12    | 12,5  | 12,5                    | 13   | 12,5                 | 13   |
| 5     | 13    | 12,5  | 13                      | 13   | 13                   | 13   |
| 5     | 14    | 12,5  | 13                      | 13   | 13                   | 13   |
| 5     | 15    | 12,5  | 13                      | 13   | 13                   | 13   |
| 5     | 16    | 12,5  | 13                      | 13   | 13                   | 13   |
| 5     | 17    | 12,5  | 13                      | 13   | 13                   | 13   |
| 5     | 18    | 13    | 13                      | 13   | 13                   | 13   |
| 5     | 19    | 13    | 13                      | 13   | 13                   | 13   |
| 5     | 20    | 13    | 13,5                    | 13,5 | 13,5                 | 13,5 |
| 5     | 21    | 13,5  | 13,5                    | 13,5 | 13,5                 | 13,5 |
| 6     | 1     | 13,5  | 13,5                    | 13,5 | 13,5                 | 13,5 |
| 6     | 2     | 13    | 13,5                    | 13,5 | 13,5                 | 13,5 |
| 6     | 3     | 13    | 13,5                    | 13,5 | 13,5                 | 13,5 |
| 6     | 4     | 13    | 13,5                    | 13,5 | 13,5                 | 13,5 |
| 6     | 5     | 13,5  | 13,5                    | 13,5 | 13,5                 | 13,5 |
| 6     | 6     | 13,5  | 13,5                    | 13,5 | 13,5                 | 13,5 |
| 6     | 7     | 13,5  | 14                      | 14   | 14                   | 14   |
| 6     | 8     | 13,5  | 14                      | 14   | 14                   | 14   |
| 6     | 9     | 13,5  | 14                      | 14   | 14                   | 14   |
| 6     | 10    | 13,5  | 14                      | 14   | 14                   | 14   |
| 6     | 11    | 13,5  | 14                      | 14   | 14                   | 14   |
| 6     | 12    | 13,5  | 14                      | 14   | 14                   | 14   |
| 6     | 13    | 14    | 14                      | 14   | 14                   | 14   |
| 6     | 14    | 14    | 14                      | 14   | 14                   | 14   |
| 6     | 15    | 14    | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 6     | 16    | 14    | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 6     | 17    | 14    | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 6     | 18    | 14    | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 6     | 19    | 14    | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 6     | 20    | 14    | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 6     | 21    | 14,5  | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 7     | 1     | 15    | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |

| Lance | Spray | Lista | ESP <sub>uniforme</sub> |      | ESP <sub>campo</sub> |      |
|-------|-------|-------|-------------------------|------|----------------------|------|
|       |       |       | MQ <sub>ap</sub>        | MCd  | MQ <sub>ap</sub>     | MCd  |
| 7     | 2     | 14,5  | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 7     | 3     | 14,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 7     | 4     | 14,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 7     | 5     | 14,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 7     | 6     | 14,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 7     | 7     | 14,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 7     | 8     | 14,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 7     | 9     | 14,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 7     | 10    | 15    | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 7     | 11    | 15    | 15                      | 15,5 | 15                   | 15,5 |
| 7     | 12    | 15    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 7     | 13    | 15    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 7     | 14    | 15    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 7     | 15    | 15    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 7     | 16    | 15    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 7     | 17    | 15    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 7     | 18    | 15    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 7     | 19    | 15    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 7     | 20    | 15,5  | 15,5                    | 16   | 15,5                 | 16   |
| 7     | 21    | 16    | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 1     | 16    | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 2     | 15,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 3     | 15,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 4     | 15,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 5     | 15,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 6     | 15,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 7     | 15,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 8     | 15,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 8     | 9     | 16    | 16                      | 16,5 | 16                   | 16,5 |
| 8     | 10    | 16    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 8     | 11    | 16    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 8     | 12    | 16    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 8     | 13    | 16    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 8     | 14    | 16    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 8     | 15    | 16    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 8     | 16    | 16    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 8     | 17    | 16    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 8     | 18    | 16,5  | 16,5                    | 17   | 16,5                 | 17   |
| 8     | 19    | 16,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 8     | 20    | 16,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 8     | 21    | 17    | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 9     | 1     | 17    | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 9     | 2     | 16,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 9     | 3     | 16,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |

| Lance | Spray | Lista | ESP <sub>uniforme</sub> |      | ESP <sub>campo</sub> |      |
|-------|-------|-------|-------------------------|------|----------------------|------|
|       |       |       | MQ <sub>ap</sub>        | MCd  | MQ <sub>ap</sub>     | MCd  |
| 9     | 4     | 16,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 9     | 5     | 16,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 9     | 6     | 16,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 9     | 7     | 17    | 17                      | 17,5 | 17                   | 17,5 |
| 9     | 8     | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 9     | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 10    | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 11    | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 12    | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 13    | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 14    | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 15    | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 16    | 17    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 9     | 17    | 17,5  | 17,5                    | 18   | 17,5                 | 18   |
| 9     | 18    | 17,5  | 17,5                    | 18   | 17,5                 | 18   |
| 9     | 19    | 17,5  | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 9     | 20    | 17,5  | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 9     | 21    | 18    | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 10    | 1     | 18    | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 10    | 2     | 17,5  | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 10    | 3     | 17,5  | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 10    | 4     | 17,5  | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 10    | 5     | 17,5  | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 10    | 6     | 18    | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 10    | 7     | 18    | 18                      | 18,5 | 18                   | 18,5 |
| 10    | 8     | 18    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 9     | 18    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 10    | 18    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 11    | 18    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 12    | 18    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 13    | 18    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 14    | 18    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 15    | 18,5  | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 16    | 18,5  | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 17    | 18,5  | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 10    | 18    | 18,5  | 18,5                    | 19   | 18,5                 | 19   |
| 10    | 19    | 18,5  | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| 10    | 20    | 18,5  | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| 10    | 21    | 18,5  | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| B     | 1     | 19,5  | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| B     | 2     | 18,5  | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| B     | 3     | 19    | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| B     | 4     | 19    | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| B     | 5     | 22,5  | 19                      | 19   | 19                   | 19   |

## APÊNDICE B – Mapa de bocais para o P360

Mapa de bocais para o P360, conforme a listagem da empresa parceira (lista), e os métodos de vazão aproximada ( $MQ_{ap}$ ) e coeficiente de descarga ( $MCd$ ) para espaçamento uniforme ( $ESP_{uniforme}$ ) e espaçamento observado em campo ( $ESP_{campo}$ )

| Lance | Spray | Lista | $ESP_{uniforme}$ |       | $ESP_{campo}$ |       |
|-------|-------|-------|------------------|-------|---------------|-------|
|       |       |       | $MQ_{ap}$        | $MCd$ | $MQ_{ap}$     | $MCd$ |
| 1     | 1     | 0     | 0                | 0     | 0             | 0     |
| 1     | 2     | 0     | 0                | 0     | 0             | 0     |
| 1     | 3     | 0     | 0                | 0     | 0             | 0     |
| 1     | 4     | 6     | 6                | 6     | 6             | 6     |
| 1     | 5     | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 6     | 6,5   | 6                | 6     | 7             | 7     |
| 1     | 7     | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 8     | 7,5   | 6                | 6     | 8             | 8     |
| 1     | 9     | 0     | 6                | 6     | 0             | 0     |
| 1     | 10    | 8,5   | 6,5              | 6,5   | 9             | 9     |
| 1     | 11    | 0     | 6,5              | 6,5   | 0             | 0     |
| 1     | 12    | 9     | 7                | 7     | 10            | 10    |
| 1     | 13    | 0     | 7,5              | 7,5   | 0             | 0     |
| 1     | 14    | 10    | 7,5              | 7,5   | 10,5          | 10,5  |
| 1     | 15    | 0     | 8                | 8     | 0             | 0     |
| 1     | 16    | 10,5  | 8                | 8     | 11,5          | 11,5  |
| 1     | 17    | 0     | 8,5              | 8,5   | 0             | 0     |
| 1     | 18    | 11,5  | 8,5              | 8,5   | 12            | 12    |
| 1     | 19    | 0     | 9                | 9     | 0             | 0     |
| 1     | 20    | 12    | 9                | 9     | 13            | 13    |
| 1     | 21    | 0     | 9,5              | 9,5   | 0             | 0     |
| 1     | 22    | 12,5  | 9,5              | 9,5   | 13,5          | 13,5  |
| 1     | 23    | 0     | 10               | 10    | 0             | 0     |
| 1     | 24    | 13    | 10               | 10    | 14            | 14    |
| 2     | 1     | 0     | 10               | 10    | 0             | 0     |
| 2     | 2     | 13,5  | 10,5             | 10,5  | 14,5          | 14,5  |
| 2     | 3     | 0     | 10,5             | 10,5  | 0             | 0     |
| 2     | 4     | 14    | 11               | 11    | 15            | 15,5  |
| 2     | 5     | 0     | 11               | 11    | 0             | 0     |
| 2     | 6     | 14,5  | 11               | 11    | 16            | 16    |
| 2     | 7     | 0     | 11,5             | 11,5  | 0             | 0     |
| 2     | 8     | 15    | 11,5             | 11,5  | 16,5          | 16,5  |
| 2     | 9     | 0     | 11,5             | 11,5  | 0             | 0     |
| 2     | 10    | 15,5  | 12               | 12    | 17            | 17    |
| 2     | 11    | 0     | 12               | 12    | 0             | 0     |
| 2     | 12    | 16    | 12,5             | 12,5  | 17,5          | 17,5  |
| 2     | 13    | 0     | 12,5             | 12,5  | 0             | 0     |
| 2     | 14    | 16    | 12,5             | 12,5  | 18            | 18    |

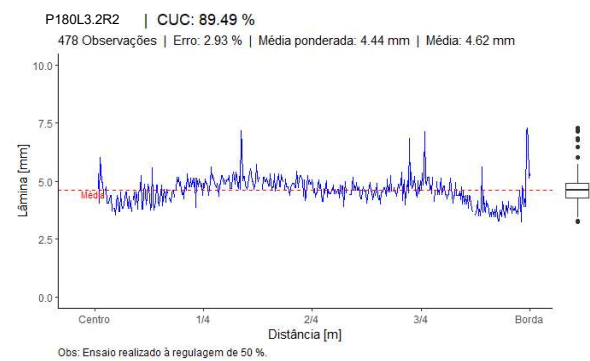
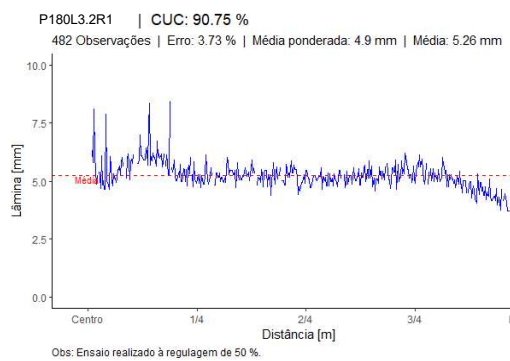
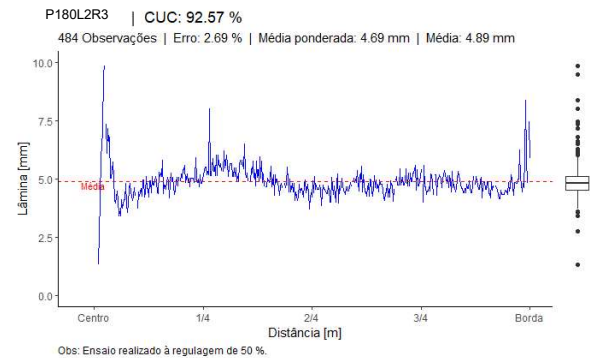
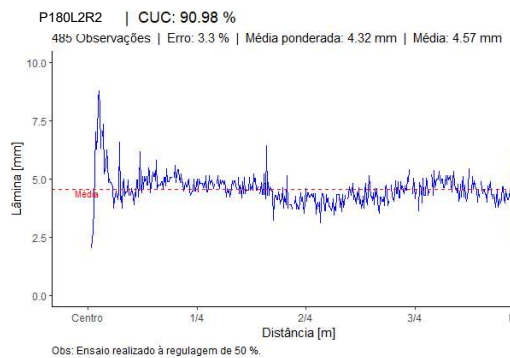
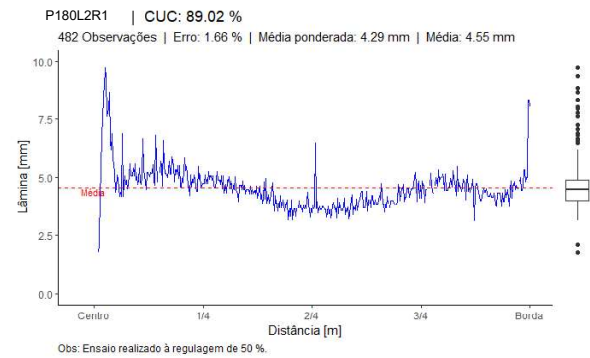
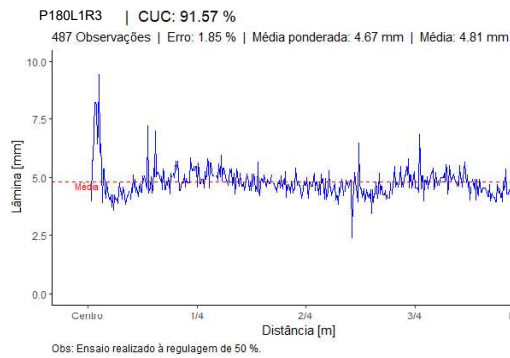
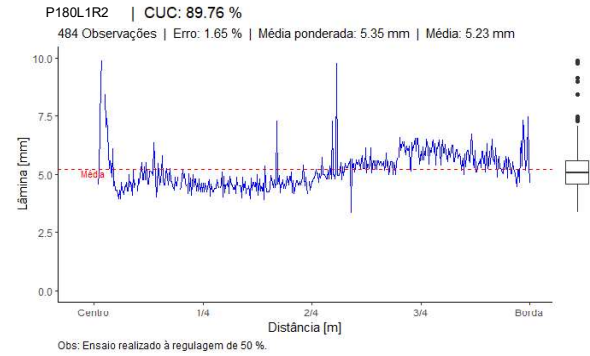
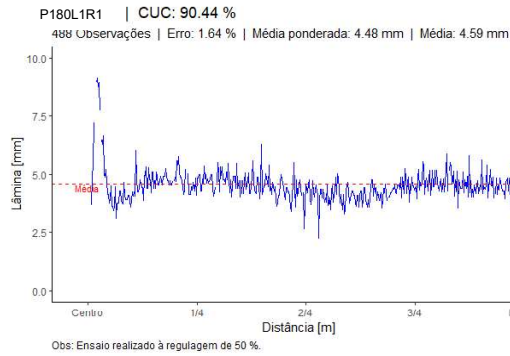
| Lance | Spray | Lista | ESP <sub>uniforme</sub> |      | ESP <sub>campo</sub> |      |
|-------|-------|-------|-------------------------|------|----------------------|------|
|       |       |       | MQ <sub>ap</sub>        | MCd  | MQ <sub>ap</sub>     | MCd  |
| 2     | 15    | 0     | 13                      | 13   | 0                    | 0    |
| 2     | 16    | 16,5  | 13                      | 13   | 18,5                 | 18,5 |
| 2     | 17    | 0     | 13                      | 13   | 0                    | 0    |
| 2     | 18    | 17    | 13                      | 13,5 | 18,5                 | 19   |
| 2     | 19    | 0     | 13,5                    | 13,5 | 0                    | 0    |
| 2     | 20    | 17,5  | 13,5                    | 13,5 | 19                   | 19   |
| 2     | 21    | 0     | 13,5                    | 13,5 | 0                    | 0    |
| 2     | 22    | 18    | 14                      | 14   | 19,5                 | 19,5 |
| 2     | 23    | 0     | 14                      | 14   | 0                    | 0    |
| 2     | 24    | 16    | 14                      | 14   | 17,5                 | 17,5 |
| 3     | 1     | 13,5  | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 3     | 2     | 13    | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 3     | 3     | 13,5  | 14,5                    | 14,5 | 14,5                 | 14,5 |
| 3     | 4     | 13,5  | 14,5                    | 15   | 14,5                 | 15   |
| 3     | 5     | 13,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 3     | 6     | 13,5  | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 3     | 7     | 14    | 15                      | 15   | 15                   | 15   |
| 3     | 8     | 14    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 3     | 9     | 14    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 3     | 10    | 14    | 15,5                    | 15,5 | 15,5                 | 15,5 |
| 3     | 11    | 14,5  | 15,5                    | 16   | 15,5                 | 16   |
| 3     | 12    | 14,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 3     | 13    | 14,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 3     | 14    | 14,5  | 16                      | 16   | 16                   | 16   |
| 3     | 15    | 15    | 16                      | 16,5 | 16                   | 16,5 |
| 3     | 16    | 15    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 3     | 17    | 15    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 3     | 18    | 15    | 16,5                    | 16,5 | 16,5                 | 16,5 |
| 3     | 19    | 15    | 16,5                    | 17   | 16,5                 | 17   |
| 3     | 20    | 15,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 3     | 21    | 15,5  | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 4     | 1     | 16    | 17                      | 17   | 17                   | 17   |
| 4     | 2     | 15,5  | 17                      | 17,5 | 17                   | 17,5 |
| 4     | 3     | 16    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 4     | 4     | 16    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 4     | 5     | 16    | 17,5                    | 17,5 | 17,5                 | 17,5 |
| 4     | 6     | 16    | 17,5                    | 18   | 17,5                 | 18   |
| 4     | 7     | 16    | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 4     | 8     | 16,5  | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 4     | 9     | 16,5  | 18                      | 18   | 18                   | 18   |
| 4     | 10    | 16,5  | 18                      | 18,5 | 18                   | 18,5 |
| 4     | 11    | 16,5  | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 4     | 12    | 17    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 4     | 13    | 17    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |

| Lance | Spray | Lista | ESP <sub>uniforme</sub> |      | ESP <sub>campo</sub> |      |
|-------|-------|-------|-------------------------|------|----------------------|------|
|       |       |       | MQ <sub>ap</sub>        | MCd  | MQ <sub>ap</sub>     | MCd  |
| 4     | 14    | 17    | 18,5                    | 18,5 | 18,5                 | 18,5 |
| 4     | 15    | 17    | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| 4     | 16    | 17    | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| 4     | 17    | 17,5  | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| 4     | 18    | 17,5  | 19                      | 19   | 19                   | 19   |
| 4     | 19    | 17,5  | 19                      | 19,5 | 19                   | 19,5 |
| 4     | 20    | 17,5  | 19,5                    | 19,5 | 19,5                 | 19,5 |
| 4     | 21    | 18    | 19,5                    | 19,5 | 19,5                 | 19,5 |
| 5     | 1     | 18,5  | 19,5                    | 19,5 | 19,5                 | 19,5 |
| 5     | 2     | 18    | 19,5                    | 19,5 | 19,5                 | 19,5 |
| 5     | 3     | 18    | 20                      | 20   | 20                   | 20   |
| 5     | 4     | 18    | 20                      | 20   | 20                   | 20   |
| 5     | 5     | 18,5  | 20                      | 20   | 20                   | 20   |
| 5     | 6     | 18,5  | 20                      | 20   | 20                   | 20   |
| 5     | 7     | 18,5  | 20                      | 20   | 20                   | 20   |
| 5     | 8     | 18,5  | 20,5                    | 20,5 | 20,5                 | 20,5 |
| 5     | 9     | 18,5  | 20,5                    | 20,5 | 20,5                 | 20,5 |
| 5     | 10    | 19    | 20,5                    | 20,5 | 20,5                 | 20,5 |
| 5     | 11    | 19    | 20,5                    | 20,5 | 20,5                 | 20,5 |
| 5     | 12    | 19    | 20,5                    | 21   | 20,5                 | 21   |
| 5     | 13    | 19    | 21                      | 21   | 21                   | 21   |
| 5     | 14    | 19,5  | 21                      | 21   | 21                   | 21   |
| 5     | 15    | 19,5  | 21                      | 21   | 21                   | 21   |
| 5     | 16    | 19,5  | 21                      | 21   | 21                   | 21   |
| 5     | 17    | 19,5  | 21                      | 21,5 | 21                   | 21,5 |
| 5     | 18    | 19,5  | 21,5                    | 21,5 | 21,5                 | 21,5 |
| 5     | 19    | 20    | 21,5                    | 21,5 | 21,5                 | 21,5 |
| 5     | 20    | 20    | 21,5                    | 21,5 | 21,5                 | 21,5 |
| 5     | 21    | 20,5  | 21,5                    | 21,5 | 21,5                 | 21,5 |
| 6     | 1     | 20,5  | 21,5                    | 22   | 21,5                 | 22   |
| 6     | 2     | 20,5  | 22                      | 22   | 22                   | 22   |
| 6     | 3     | 20,5  | 22                      | 22   | 22                   | 22   |
| 6     | 4     | 20,5  | 22                      | 22   | 22                   | 22   |
| 6     | 5     | 20,5  | 22                      | 22   | 22                   | 22   |
| 6     | 6     | 20,5  | 22                      | 22   | 22                   | 22   |
| 6     | 7     | 21    | 22,5                    | 22,5 | 22,5                 | 22,5 |
| 6     | 8     | 21    | 22,5                    | 22,5 | 22,5                 | 22,5 |
| 6     | 9     | 21    | 22,5                    | 22,5 | 22,5                 | 22,5 |
| 6     | 10    | 21    | 22,5                    | 22,5 | 22,5                 | 22,5 |
| 6     | 11    | 21,5  | 22,5                    | 22,5 | 22,5                 | 22,5 |
| 6     | 12    | 21,5  | 23                      | 23   | 23                   | 23   |
| 6     | 13    | 21,5  | 23                      | 23   | 23                   | 23   |
| 6     | 14    | 21,5  | 23                      | 23   | 23                   | 23   |
| 6     | 15    | 21,5  | 23                      | 23   | 23                   | 23   |

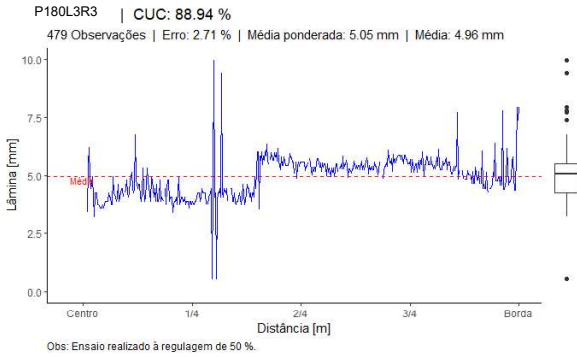
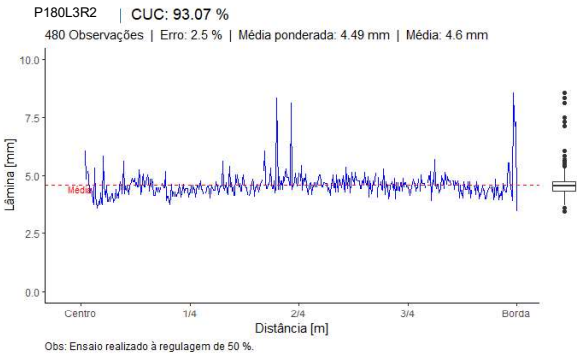
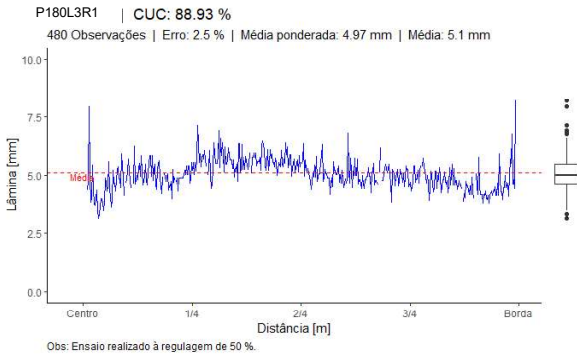
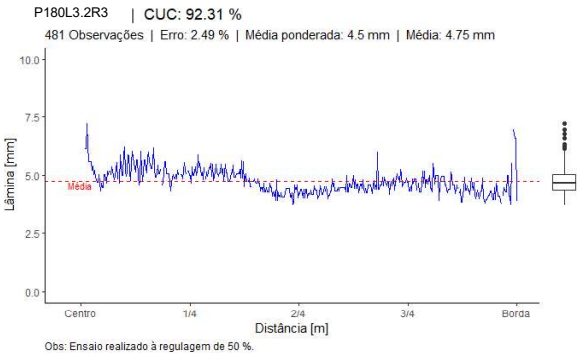
| Lance | Spray | Lista | ESP <sub>uniforme</sub> |      | ESP <sub>campo</sub> |      |
|-------|-------|-------|-------------------------|------|----------------------|------|
|       |       |       | MQ <sub>ap</sub>        | MCd  | MQ <sub>ap</sub>     | MCd  |
| 6     | 16    | 22    | 23                      | 23   | 23                   | 23   |
| 6     | 17    | 22    | 23,5                    | 23,5 | 23,5                 | 23,5 |
| 6     | 18    | 22    | 23,5                    | 23,5 | 23,5                 | 23,5 |
| 6     | 19    | 22    | 23,5                    | 23,5 | 23,5                 | 23,5 |
| 6     | 20    | 23,5  | 23,5                    | 23,5 | 23,5                 | 23,5 |
| 6     | 21    | 23,5  | 23,5                    | 23,5 | 23,5                 | 23,5 |
| B     | 1     | 22    | 24                      | 23,5 | 24                   | 23,5 |
| B     | 2     | 22,5  | 24                      | 24   | 24                   | 24   |
| B     | 3     | 23    | 24                      | 24   | 24                   | 24   |
| B     | 4     | 26    | 24                      | 24   | 24                   | 24   |

## APÊNDICE C – Gráficos para o P180

CUC<sub>HH</sub>, N° de observações, erro e médias dos ensaios individuais para o P180



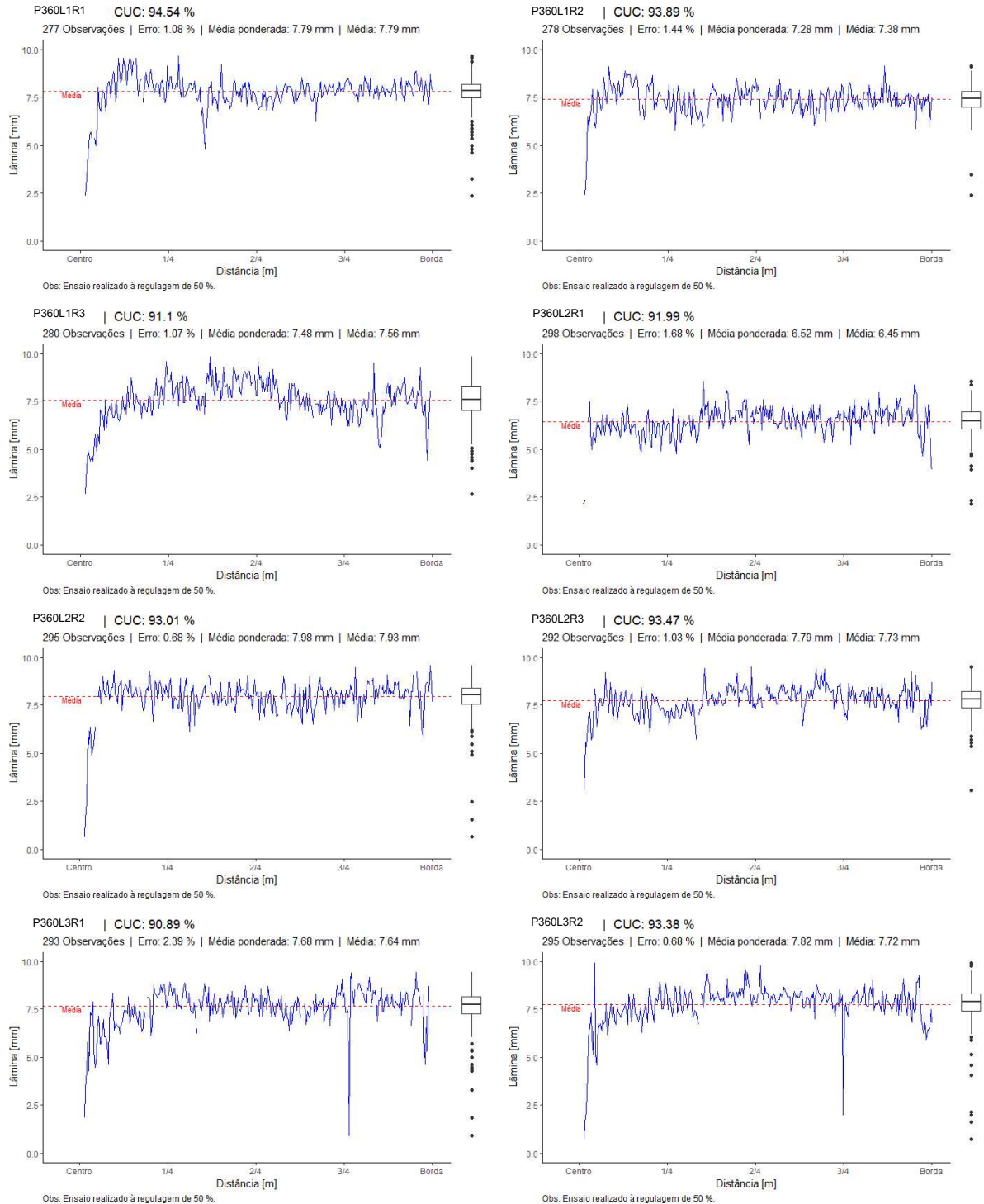


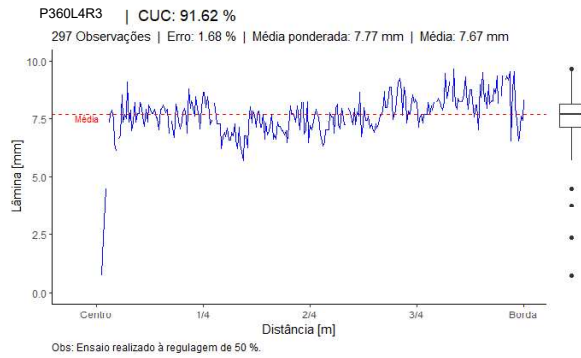
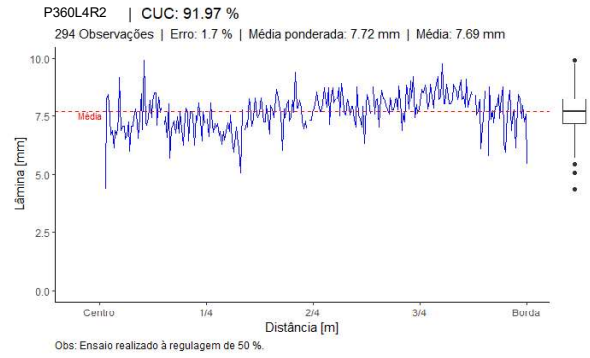
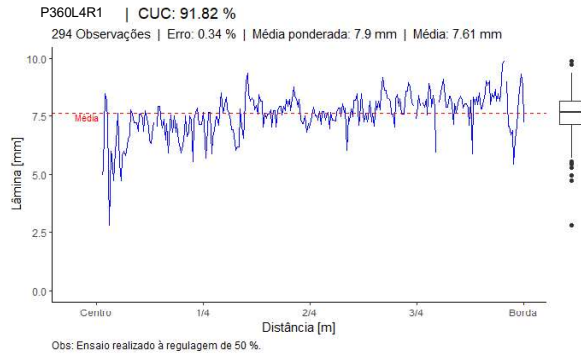
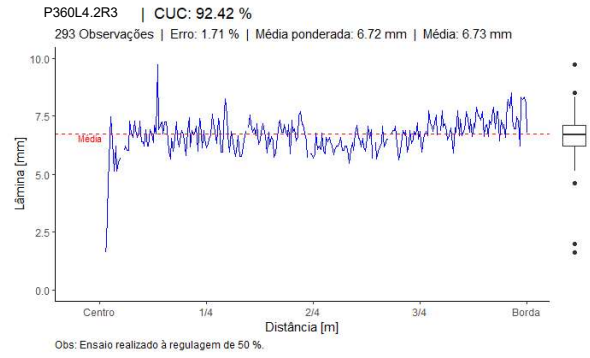
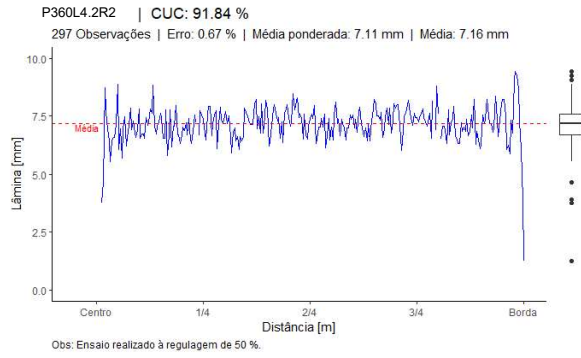
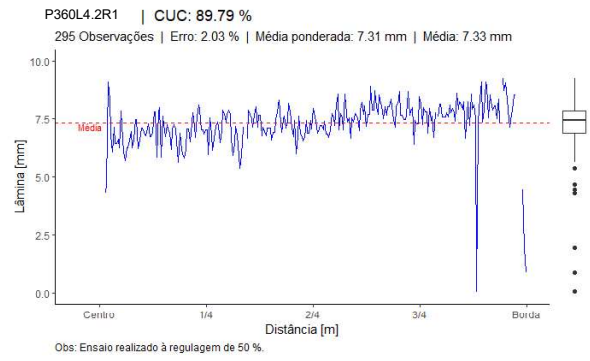
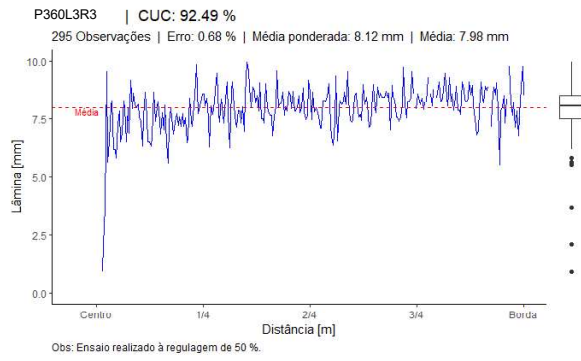


Fonte: Autor.

## APÊNDICE D – Gráficos para o P360

CUC<sub>HH</sub>, N° de observações, Erro e médias dos ensaios individuais para o P360





Fonte: Autor.